



LÍVIA FREIRE BALIZA

**USO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO
PRÓXIMO PARA MONITORAR O GRADIENTE DE
UMIDADE DA MADEIRA DURANTE A SECAGEM**

LAVRAS – MG

2021

LÍVIA FREIRE BALIZA

**USO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA
MONITORAR O GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA DURANTE A
SECAGEM**

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

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador
Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2021**

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

Baliza, Lívia Freire.

Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para
monitorar o gradiente de umidade da madeira durante a secagem /
Lívia Freire Baliza. - 2021.

48 p. : il.

Orientador(a): Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Coorientador(a): Fernanda Maria Guedes Ramalho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Espectroscopia no NIR. 2. Gradiente de umidade. 3.
Secagem da madeira. I. Hein, Paulo Ricardo Gherardi. II. Ramalho,
Fernanda Maria Guedes. III. Título.

LÍVIA FREIRE BALIZA

**USO DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA
MONITORAR O GRADIENTE DE UMIDADE DA MADEIRA**

**NEAR INFRARED SPECTROSCOPY USE TO MONITORING THE WOOD
MOISTURE GRADIENT**

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

Aprovada em 31 de agosto de 2021.

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA
Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin	UFES
Prof. Dr. Allan Motta Couto	UEMS

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador
Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2021**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), aos docentes e técnico-administrativos do Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), todos por fornecerem subsídios para a execução da pesquisa.

Ao professor Paulo Ricardo Gherardi Hein, pela orientação, pela confiança e ajuda durante a execução do trabalho e, principalmente, pelos ensinamentos práticos e objetivos que contribuíram para meu crescimento profissional. Agradeço-lhe também pela paciência e pela preocupação.

A fazenda Praia Grande por ceder, abater e transportar as toras que foram utilizadas no estudo. A equipe NIR que sempre esteve por perto quando precisei de ajuda nos trabalhos, em especial a amiga Evelize por toda paciência, disponibilidade e parceria desde o início, que não poupou esforços para me ajudar a concluir o projeto. Aos meus pais e irmãs por todo apoio e exemplo, ao Fernando pela parceria e incentivo de sempre. Muito obrigada!

RESUMO

A umidade da madeira está entre as características que mais afeta o desempenho e as aplicações da madeira na indústria e por isso é importante monitorá-la. Contudo, os métodos mais comumente empregados não permitem o monitoramento do gradiente umidade em peças de madeira. O objetivo deste estudo foi desenvolver modelos para estimar o gradiente de umidade da madeira durante a secagem com base nos espectros no infravermelho próximo (NIR) e monitorar a variação espacial da umidade durante a secagem. Caibros de madeira de árvore de *Eucalyptus* recém abatida foram processados e originaram dez corpos de prova prismáticos com dimensão de 50 (radial) x 50 (tangencial) x 150 mm (longitudinal) utilizados para medição dos espectros no NIR e das massas durante a secagem. Amostras adjacentes aos caibros foram obtidas para determinação da umidade inicial das peças por gravimetria e para estimativa do valor de umidade das peças durante o monitoramento da perda de massa e aquisição espectral. Metade das peças foram submetidas à secagem natural em ambiente controlado enquanto o restante das amostras de madeira foram secas em estufa a 60°C. As peças foram analisadas em 5 etapas durante a secagem a cada perda de 20% de massa de água. Espectros foram medidos em 100 pontos distribuídos espacialmente dentro de cada peça de madeira e em cada fase de secagem. Inicialmente, 25 espectros foram coletados em pontos equidistantes cobrindo toda a superfície longitudinal x radial do corpo de prova. Para acessar o interior da madeira e coletar espectros, as peças foram aplainadas até determinada profundidade. Assim, o corpo de prova teve sua altura inicial de 50 mm reduzida a 41.67 mm na direção radial (redução de 16.67%) por meio de uma plaina elétrica. Imediatamente após o aplainamento, 25 espectros foram coletados na superfície recém produzida. Assim, outras operações de aplainamento foram executadas no corpo de prova até acessar a região central da peça (50% da altura original). Após a monitoramento espacial da primeira peça, as outras peças permaneceram em secagem e foram processadas e analisadas ao perder 20%, 40%, 60% e 80% de massa de água inicial. Os espectros coletados nas superfícies de cada peça em cada etapa de secagem foram aplicados a uma regressão de mínimos quadrados parciais pré-estabelecida para estimativa da umidade da madeira a partir das assinaturas espectrais. O modelo preditivo apresentou R^2 de 0.90 e RMSEV de 11.55% e permitiu monitorar a variação espacial do gradiente de umidade dentro das peças de madeira durante a secagem.

Palavras-chave: Espectroscopia no NIR. Gradiente de umidade. Secagem da madeira.

ABSTRACT

Wood humidity is among the characteristics that most affect the performance and applications of wood in the industry and that is why it is important to monitor it. However, the most used methods do not allow monitoring the humidity gradient in wooden pieces. The aim of this study was to develop models to estimate the wood humidity gradient during drying based on Near Infrared (NIR) spectra and monitor the spatial variation of humidity during drying process. Newly felled Eucalyptus tree wood rafters were processed and resulted in ten prismatic specimens with dimensions of 50 (radial) x 50 (tangential) x 150 mm (longitudinal) used to measure the NIR spectra and the masses during drying. Samples adjacent to the rafters were obtained to determine the initial humidity of the pieces by gravimetry and to estimate the humidity value of the pieces during the monitoring of mass loss and spectral acquisition. Half of the pieces were submitted to natural drying in a controlled environment while the rest of the wood samples were dried in an oven at 60°C. The pieces were analyzed in 5 steps during drying at each 20% loss of water mass. Spectra were measured at 100 points spatially distributed within each piece of wood and at each drying stage. Initially, 25 spectra were collected at equidistant points covering the entire original longitudinal x radial surface of the specimen. To access the interior of the wood and collect spectra, the pieces were flattened to a certain depth. Thus, the specimen had its initial height of 50 mm reduced to 41.67 mm in the radial direction (reduction of 16.67%) by means of an electric planer. Immediately after planing, 25 spectra were collected on the newly produced surface. Thus, other planing operations were performed on the specimen until accessing the central region of the part (50% of the original height). After spatial monitoring of the first part, the other parts remained in drying and were processed and analyzed by losing 20%, 40%, 60% and 80% of the initial water mass. The spectra collected on the surfaces of each piece at each drying stage were applied to a pre-established partial least squares regression to estimate the wood humidity from the spectral signatures. The predictive model presented R^2 of 0.90 and RMSEV of 11.55% and allowed to monitor the spatial variation of the moisture gradient inside the pieces of wood during drying.

Keywords: NIR spectroscopy. Humidity gradient. Drying the wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectrômetro eletromagnético.	17
Figura 2 - Esquema de um espectrômetro.	19
Figura 3 - Calibração e predição para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR da faia europeia e do pinheiro-silvestre.	21
Figura 4 - Imagem preditiva de controle de umidade e imagem RGB (R = 700 nm, G = 546 nm, B = 436 nm) da faia europeia e pinheiro silvestre.	22
Figura 5 - Distribuição espacial do teor de umidade estimado por PLS para cada amostra no estudo. A linha superior mostra as amostras nos estágios iniciais de secagem, a linha inferior mostra as mesmas amostras aproximadamente 20 h de secagem mais tarde.	24
Figura 6 - Espectro de absorvância médio de cada imagem hiperespectral, após o pré-processamento de dados ao longo da região de 953 a 2516 nm.	24
Figura 7 - Distribuição da umidade em discos previstos pelo NIR.	25
Figura 8 - Toras de madeira úmida de Eucalyptus com topos impermeabilizados por papel filme e sacos plásticos.	26
Figura 9 - Caibros de madeira úmida de Eucalyptus para confecção das amostras.	27
Figura 10 - Peças embaladas com papel filme.	27
Figura 11 - Corpos de prova para calibração do modelo.	28
Figura 12 - Espectrofotômetro no NIR baseado em transformada de Fourier.	29
Figura 13 - Coleta espectral com variação espacial na peça de Eucalyptus.	29
Figura 14 - Etapas de monitoramento de perda de massas das peças para coleta espectral.	30
Figura 15 - Valores de umidade determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição anidra.	32
Figura 16 - Média da umidade obtidas pelo espectro NIR em cada uma das dez etapas de secagem, sem e com aplicação da primeira derivada.	33
Figura 17 - Gráfico dos scores da análise de componentes principais dos espectros no NIR medidos em dez classes de umidade diferente.	34
Figura 18 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR, sem e com tratamento da primeira derivada.	36
Figura 19 - Predição para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR.	37
Figura 20 - Variação da umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro um que obteve secagem natural em ambiente controlado.	40
Figura 21 - Variação de umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro dois que obteve secagem em estufa 60°.	41
Figura 22 - Variação da umidade nas superfícies da peça quatro (40% da massa de água inicial) do caibro um (secagem natural) e do caibro dois (secagem em estufa).	42
Figura 23 - Variação da umidade nas superfícies das peças cinco (20% da massa de água inicial) do caibro 1 submetido à secagem ao ar (esquerda) e caibro 2 submetido à secagem em estufa (direita).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira a partir de espectros NIR obtidos através da esfera de integração (IS) e sonda de fibra óptica (FO) em superfícies de madeira.	23
Tabela 2 - Calibração, validação cruzada e predição para estimativa da umidade da madeira por PLS-R.	35
Tabela 3 - Valores médios e coeficiente de variação da umidade estimada pelo modelo NIR nas peça secas ao ar e em estufas nas diferentes posições espaciais, desde a superfície inicial.	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Secagem de madeira de <i>Eucalyptus</i>	12
2.2 Umidade da madeira.....	13
2.2.1 Métodos para determinação da umidade da madeira.....	14
2.3 Espectroscopia no Infravermelho Próximo	16
2.3.1 Fundamentos da tecnologia NIR.....	17
2.3.2 Vantagens e desvantagens da espectroscopia no NIR	19
2.3.3 Aplicação da técnica NIR para estimativa da umidade da madeira.....	20
3 OBJETIVOS	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Origem do material vegetal e preparação das amostras	26
4.2 Secagem das amostras	27
4.3 Calibração do modelo.....	28
4.4 Aquisição dos espectros no NIR	28
4.5 Determinação e monitoramento da umidade.....	30
4.6 Estatística multivariada	31
4.7 Critérios para a seleção da calibração	31
4.8 Plotagem de gráficos	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Dessorção de água nas amostras	32
5.2 Espectros no NIR	33
5.3 Desenvolvimento e validação dos modelos	35
5.4 Predição da umidade nas peças de madeira durante a secagem.....	37
5.5 Mapeamento da variação de umidade no interior das peças de madeira durante a secagem	39
5.6 Influência dos métodos de secagem na variação espacial da dessorção	41
6 CONCLUSÃO	43
7 REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A umidade está entre as propriedades mais importantes da madeira, visto que sua variação afeta o comportamento do material durante as fases de processamento, secagem e preservação. Na indústria de madeira serrada o monitoramento da umidade durante o processo de secagem é fundamental no procedimento de fabricação da maioria dos produtos e os métodos utilizados e o controle adequado são indispensáveis para atingir um alto nível de qualidade final do produto.

O teor de água na madeira, além de ser diferente entre as espécies, apresenta uma variação significativa dentro de uma mesma árvore. Este fato pode ser comprovado durante a fase de secagem, onde em uma mesma tora de madeira, são verificadas velocidades diferentes na secagem de suas posições, o que mostra a existência de gradientes de umidades.

Quanto à secagem da madeira de *Eucalyptus* o processo pode ocasionar sérios defeitos, dado que o material se encontra inicialmente em estado verde e em função da dificuldade da água em se movimentar no interior das paredes, formam-se elevados gradientes de umidade. Essa dificuldade de movimentação da água pode ser um fator preponderante no surgimento de tensões internas que resultam na ocorrência de colapso e rachaduras e pode trazer perdas significativas de madeira durante o processamento industrial. O gênero se caracteriza por apresentar reduzida permeabilidade o que implica em uma secagem lenta, sua constituição anatômica caracterizada pela alta fração da parede celular também impede a remoção de umidade do seu interior, além disso a presença de tilos nos vasos também torna mais difícil o seu processo. Portanto, o controle adequado da secagem influencia na qualidade do material seco e na umidade desejada para seu uso final.

Vários procedimentos são utilizados para determinar a umidade da madeira, sendo que o método por secagem em estufa ou gravimétrico, preconizado pela NBR 14929 (ABNT, 2003) é um dos mais empregados por ser um método preciso e de fácil execução, necessitando-se apenas de uma estufa e uma balança de precisão, no entanto a técnica é destrutiva, demanda tempo para obtenção dos resultados além de fornecer apenas o valor médio da umidade. Outro método muito utilizado é com medidores elétricos no qual é considerado rápido, prático e semi destrutivo, porém apresenta-se baixa precisão acima do ponto de saturação das fibras e abaixo de 7% de umidade.

Ambos os métodos, tanto por gravimetria quanto com medidores elétricos detêm de suas limitações e muitas das vezes se tornam inviáveis de serem executados em processos industriais, além de não permitirem a determinação da variação espacial da umidade em

madeiras.

Diante do exposto é necessário o desenvolvimento e o aprimoramento de novas metodologias para o controle do processo de secagem concentrando-se em novos meios de medir a umidade e a variação de seu gradiente. Logo, para mensurar o teor de água da madeira durante a secagem com o propósito de monitorar o gradiente de umidade, é necessário a adoção de métodos para sua determinação.

Alguns métodos não destrutivos são utilizados para caracterização de materiais lignocelulósicos e dentre eles a espectroscopia no infravermelho próximo. Esta possui destaque por ser uma técnica não destrutiva, por permitir resultados rápidos, não fazer uso de reagentes químicos e realizar as aplicações on-line. Adicionalmente, a técnica permite avaliar os materiais através da correlação entre espectros gerados do material e suas propriedades anatômicas, mecânicas químicas e físicas.

Assim, a espectroscopia no NIR apresenta-se como uma alternativa promissora para estimar a umidade da madeira e mostra-se como potencial ferramenta para gestão e tomada de decisões em processos da indústria madeireira. No entanto, o monitoramento do gradiente de umidade da madeira de *Eucalyptus* durante a secagem ainda não é totalmente compreendido e não se sabe como este estudo irá responder com a utilização da técnica NIR. Além disso, trabalhos que realizam o acompanhamento da variação espacial da umidade da madeira usando técnicas não destrutivas são escassos na literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Secagem de madeira de *Eucalyptus*

Atualmente a matéria prima de *Eucalyptus* deixou de ser uma alternativa no setor da indústria de madeira serrada e se tornou realidade, uma vez que o gênero é caracterizado pelo rápido desenvolvimento de povoamentos florestais. Contudo, é necessário cuidado na produção da madeira serrada, principalmente em razão da manifestação de tensões internas de crescimento, que são responsáveis pela formação de rachaduras e deformações durante os processos de decomposição e de secagem do material (ZEN et al., 2020).

Conforme Carrasco (1998) a madeira de *Eucalyptus* apresenta secagem lenta e a propensão a defeitos é elevada. Dessa forma para obter sucesso no procedimento é necessário conhecer as características da madeira, os equipamentos e o processos físicos que serão utilizados. O autor complementa que a fase inicial de secagem deve ser cuidadosamente

conduzida devido sua estrutura anatômica desfavorável ao fluxo de líquidos. De acordo com Severo (2000) a secagem da madeira de eucaliptos, em sua fase inicial, deve ser realizada empregando-se baixas temperaturas, alta umidade relativa e baixa velocidade do ar. Já na segunda fase do processo de secagem as temperaturas mais altas são aceitas sem maiores problemas.

A madeira de *Eucalyptus* tem ocorrência de praticamente todos os defeitos que se manifestam durante o processo de secagem como as rachaduras, empenamentos, gradientes de umidade, colapso, endurecimento superficial e tensões de secagem (JANKOWSKY, 1995). Para Gonzalez et al. (2006) os problemas iniciais mais graves com a madeira de eucalipto são as rachaduras excessivas e as deformações em que a presença de certas características desfavoráveis, como a elevada retratibilidade, a propensão ao colapso e a presença de altos níveis de tensão de crescimento, explicam esses principais defeitos.

Segundo Souza et al. (2012) o conhecimento da variabilidade da madeira de *Eucalyptus* quando sujeita às condições de secagem, pode resultar no controle de possíveis defeitos e melhorar a qualidade do material. Do mesmo modo, ainda revela que a secagem adequada da madeira serrada é notoriamente uma fase importante do processamento que visa agregar valor ao produto. Redman et al. (2017) acrescentam que durante a fase de secagem da madeira, para se obter o controle eficaz dos defeitos é necessário a manutenção do balanço entre a taxa de evaporação de umidade da superfície e da taxa de movimento da umidade do interior da madeira para seu exterior.

Quando o processo de secagem é realizado corretamente é possível que proporcione uma série de benefícios para o produto, como a melhoria nas características de trabalhabilidade, redução da movimentação dimensional e de ataque por fungos e insetos. De um modo geral as propriedades físicas e mecânicas baseiam-se na umidade existente na madeira (SILVEIRA et al., 2013).

2.2 Umidade da madeira

O fluxo de água constituinte da madeira apresenta variação em seu estado físico, na sua forma e em seu movimento. Dessa maneira, costuma-se classificar os tipos de água basicamente em dois grupos: 1) água livre ou capilar: aquela localizada nos lumes celulares e nos espaços intercelulares na forma líquida e gasosa, e disponível quando a umidade está acima do ponto de saturação das fibras (PSF); 2) água ligada por adesão ou impregnação: aquela que se encontra adsorvida pelas paredes celulares das fibras, na forma gasosa e

encontrada abaixo do PSF (SIAU, 1971; MONTEIRO et al., 2020).

A madeira recém cortada se apresenta em estado verde, nesse contexto as paredes celulares estão totalmente saturadas com água. A umidade da madeira verde apresenta uma variação tanto entre as espécies das árvores quanto dentro de uma mesma árvore. A umidade varia entre partes do mesmo indivíduo, material genético, entre as estações do ano e possivelmente durante o decorrer de um dia (ENGELUND et al., 2013). Essa variação também ocorre em relação aos fatores inerentes à madeira, como a densidade, anatomia e as dimensões da peça (ZANUNCIO et al., 2016). A remoção dessa água presente na madeira, na maioria das vezes, está diretamente relacionada com o uso final pretendido e com as condições de serviço às quais está sujeita (FIORESE et al., 2014).

A passagem de água na madeira processa-se de diferentes formas. O fluxo da água livre é gerado por forças capilares, já o da água gasosa e adsorvida dá-se pela parede celular por difusão, em razão do gradiente de umidade (MONTEIRO et al., 2020).

Conforme Monteiro et al. (2017) a água se movimenta no caule das angiospermas sobretudo através dos pares de pontoações e dos elementos de vasos. Nesse caso a passagem dos fluidos na madeira processa-se com maior intensidade quando os vasos possuem placa de perfuração simples. No entanto, existem tipos de abertura que facilitam a deposição de substâncias incrustantes, o que pode acarretar bloqueio do fluxo de fluidos pelos vasos além de dificultar o processo. Dessa maneira, verifica-se a redução da permeabilidade da madeira. Os autores ainda revelam que a formação de tilos também reduz a permeabilidade, visto que podem obstruir parcialmente ou totalmente os vasos o que dificultará a passagem da água.

A água presente na madeira tem influência em suas propriedades físicas e mecânicas, assim como também está associada com a possibilidade de ser atacada por insetos e fungos xilófagos, dessa forma comprometendo o seu uso (MORAES NETO, 2017). Donato et al. (2014) acrescentam que a umidade da madeira é uma propriedade física que detém de uma grande influência na utilização final do material. Assim, para se obter um produto com características desejáveis é necessário realizar o controle adequado utilizando métodos para sua determinação.

2.2.1 Métodos para determinação da umidade da madeira

Para determinar a umidade da madeira existem diferentes métodos, dentre eles os mais utilizados são os métodos por pesagens, apontados como os mais usuais, os métodos que utilizam aparelhos elétricos, caracterizados por sua praticidade e rapidez, os métodos

químicos por destilação e os por titulação, que são considerados precisos (MORESHI, 2005).

Dentre os métodos por pesagens, o gravimétrico, também conhecido como método tradicional, é considerado como um dos mais exatos. A metodologia consiste na introdução dos corpos-de-prova com dimensões padronizadas em estufa com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até alcançar massa constante (DIAS et al., 2019). Calonego et al. (2006) complementam que o método apresenta resultados com boa precisão para qualquer umidade em que a madeira se encontrar. No entanto, apresenta desvantagens como exigência de muito tempo para obtenção dos resultados, ser uma técnica destrutiva e ser inviável para espécies com componentes voláteis.

Uma técnica eficiente, de fácil aplicação e muito empregada em processos industriais, é com medidores elétricos. Entre os tipos de medidores elétricos de umidade da madeira merecem destaque os resistivos e os capacitivos (RODRIGUES; SALES, 2014). O aparelho permite o resultado do teor de umidade de forma instantânea, contudo o método não fornece resultados com margens confiáveis para todas as classes de umidade. A utilização do aparelho é indicada para intervalos entre 7% e 30% de umidade (DONATO et al., 2015). A medição também pode sofrer intervenções causadas pela direção das fibras, temperatura e pela profundidade de cravação dos eletrodos (CALONEGO et al., 2006).

Já na determinação da umidade da madeira por métodos químicos, o método da destilação se destaca e é indicado para madeiras que contém teores significativos de extrativos voláteis. A quantidade de água é obtida volumetricamente, dessa maneira, se utiliza produtos químicos específicos como xileno ou tolueno como extratores, por não se misturarem com a água que está na madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Moreshi (2005) destaca que a metodologia apresenta alguns inconvenientes, como necessidade de laboratório adequado e pessoal técnico habilitado, necessidade de vidraria de laboratório frágil, emprego de solventes caros e escapamento de vapores que são insalubres e facilmente inflamáveis.

Outras técnicas também são utilizadas para determinar o teor de água na madeira. A utilização de micro-ondas é uma alternativa viável, visto que proporciona resultados rápidos, porém o custo é elevado e a metodologia ainda é pouca desenvolvida (DONATO et al., 2014). Instrumentos baseados em raios X, como SilviScan-1 e SilviScan-2 e scanners de tomografia computadorizada também são empregados para prever a umidade da madeira. Todavia, os instrumentos dependem de laboratórios e não foram preparados para aplicação em ambientes industriais, além disso para adquiri-los o investimento é considerado alto (LEBLON et al., 2013). Métodos como técnicas de radiação solar, ressonância magnética nuclear e moderação de nêutrons também podem ser empregadas para determinação da umidade da madeira

(KLOCK et al., 2005).

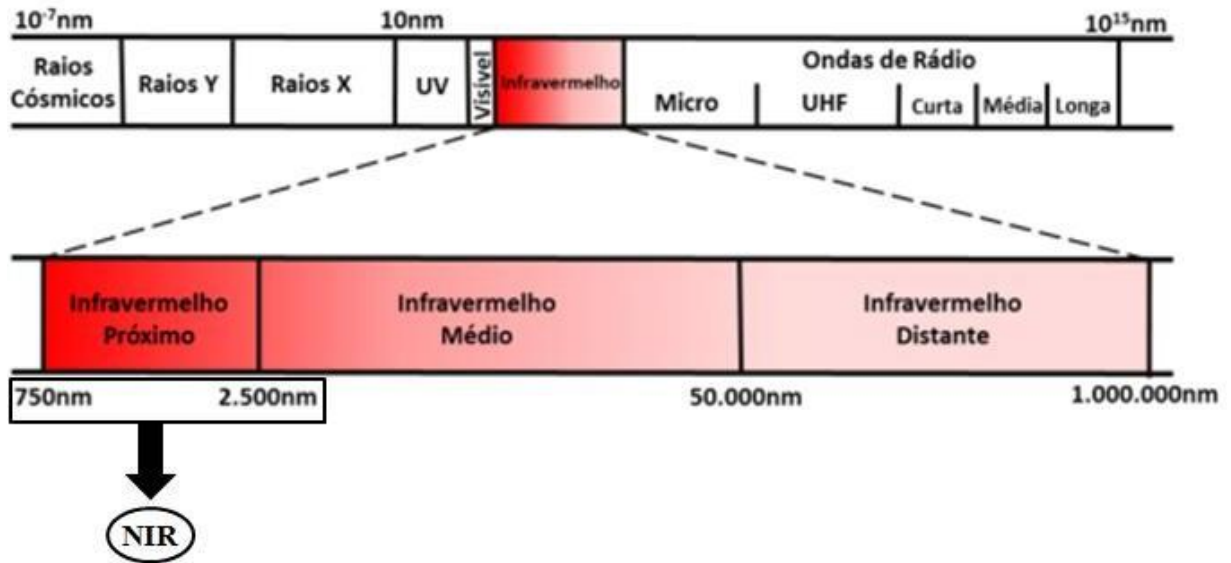
Yuan et al. (2020) ressalta que muitas técnicas espectroscópicas, como espectroscopia no infravermelho próximo, espectroscopia por transformada de Fourier (FTIR) e espectroscopia Raman estão sendo empregadas para estimar a umidade da madeira. Entre esses métodos, a espectroscopia no NIR vem ganhando destaque por ser uma metodologia precisa, rápida, não destrutiva e de baixo custo. O NIRS tem sido amplamente utilizado para caracterizar as propriedades da madeira, logo, a técnica é recomendada para prever a quantidade de água contida no material (LI; LI, 2012).

2.3 Espectroscopia no Infravermelho Próximo

A espectroscopia no infravermelho próximo (Near Infrared Spectroscopy – NIRS) tem sido empregada continuamente como uma técnica analítica que permite resultados eficientes para determinação de moléculas orgânicas e variáveis quantitativas (NASCIMENTO et al., 2017). A técnica é não destrutiva e suas análises são precoces, dessa forma, tem se mostrado promissora no setor florestal sendo empregada para avaliar materiais que apresentam em sua estrutura ligações químicas C-H, N-H, S-H ou O-H (ESTOPA et al., 2017). Na madeira o NIR interage com as ligações do tipo C-H, C-O, CO-H e com a água que está presente no material (HEIN et al., 2010).

A metodologia utiliza a espectroscopia vibracional que emprega energia nos comprimentos de onda de 750 a 2500 nm para obter informações dos constituintes químicos dos materiais analisados (Figura 1). As informações são obtidas por meio da interação da onda eletromagnética na região do infravermelho próximo com a amostra (VIANA et al., 2010). Para Tham, Inagaki e Tsuchiawa (2019) a absorção de luz na região do infravermelho próximo propicia um espectro correspondente aos modos vibracionais específicos sendo exclusivo para cada estrutura molecular examinada.

Figura 1 - Espectrômetro eletromagnético.



Fonte: Amaral (2018).

Hein et al. (2010) destacam que a coleta dos espectros é rápida, leva menos de um minuto ou menos para obtê-los, as amostras requerem preparação mínima ou nenhuma e o método é adequado para controle de processos on-line. Estopa et al. (2017) acrescenta que o propósito da técnica NIR é quantificar as características do material analisado, dessa forma faz-se necessário a utilização de análises em laboratórios da característica avaliada para gerar as referências, nas quais serão empregadas para gerar os modelos de predição.

2.3.1 Fundamentos da tecnologia NIR

A espectroscopia no infravermelho próximo é um método rápido e não destrutivo empregado para avaliar as características de materiais lignocelulósicos a partir de uma única amostra (BALDIN et al., 2018). A interação da radiação NIR com o material a ser analisado pode ser medida por diferentes formas: transmitância, refletância difusa, transmitância difusa, interatividade e transflectância. Todos esses termos se referem a diferentes arranjos geométricos da radiação de sondagem, sistema de feixe e de detecção que são utilizados para coletar os dados analíticos e as informações espectrais sobre a amostra (PASQUINI, 2018).

A ferramenta NIR baseia-se na espectroscopia vibracional, com exposição de amostras a radiação eletromagnética na faixa entre $14\ 285\text{ cm}^{-1}$ a 4000 cm^{-1} (750 a 2500 nm), enquanto a região da luz visível varia entre $25\ 000\text{ cm}^{-1}$ a $14\ 285\text{ cm}^{-1}$ (400 e 700 nm) (LEBLON et al., 2013). Schwanninger et al. (2011) destacam que normalmente a espectroscopia no infravermelho é definida como o estudo da eletrônica de baixa energia, transições, conotações

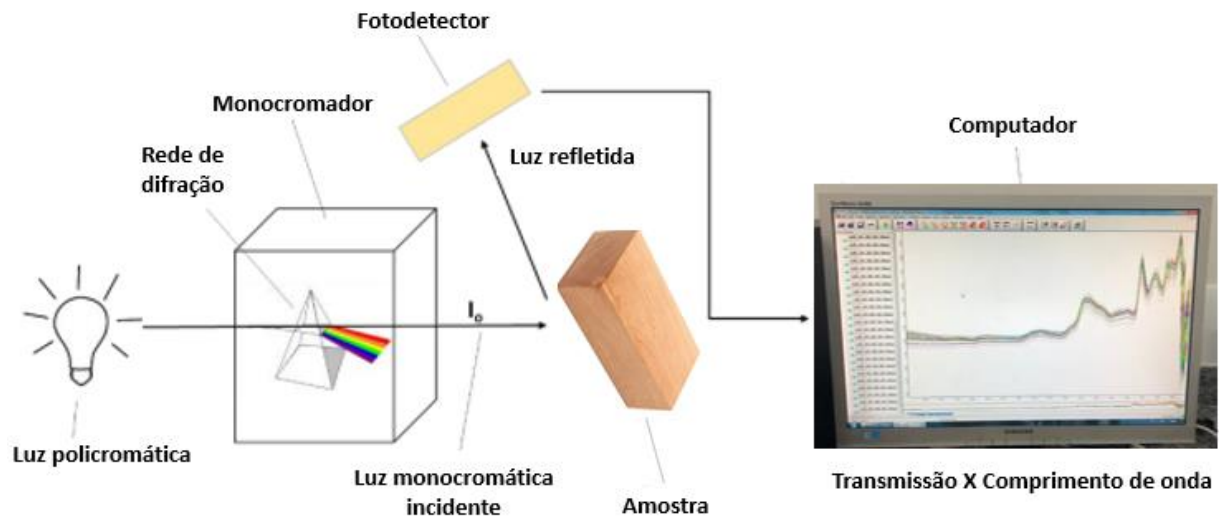
e bandas de combinação de vibrações devido a constantes de grande forças e baixas massas envolvidas.

Na região do infravermelho próximo os grupos funcionais que contém carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio absorvem radiação incidente e transformam a energia absorvida em vibrações (LAZZAROTTO et al., 2016). Os modos vibracionais das ligações que compõem as moléculas pertencentes a esses grupos podem ser do tipo alongamento simétrico e assimétrico, tesoura, balanço, torção e abano de leque. Ao absorver radiação na região NIR, o átomo sofre alterações no estado energético, dessa forma fica em evidência que o movimento dos átomos da molécula tem relação direta com a sua energia (BURNS; CIURCZAK, 2008).

De acordo com Lazzarotto et al. (2016) cada grupo funcional absorve em um comprimento de onda específico, e a intensidade da luz absorvida é proporcional à concentração do grupo absorvedor. Dessa forma, as informações das características analisadas do material podem ser inferidas de acordo com a quantidade de luz absorvida e do comprimento de onda gerado. O autor ainda acrescenta que a energia da luz incidente na amostra que não for absorvida é parcialmente transmitida e refletida. E a luz que é refletida de modo difusa, ou seja, que não seja da reflexão especular, é medida por detectores de um equipamento, onde, por diferença se calcula o quanto da intensidade de luz a amostra absorveu.

Os equipamentos utilizados para coletar os espectros são denominados de espectrômetro e geralmente são constituídos de quatro partes fundamentais: fonte luminosa; sistema de separação da luz policromática em função de diferentes comprimentos de onda; sistema para suporte das amostras e fotodetector (Figura 2). O aparelho emite a radiação na faixa do infravermelho próximo que interage com os grupos funcionais da amostra. Após a interação com o material, fotodetores registram a intensidade da luz e produzem um espectro de absorbância, refletância ou transmitância, dependendo do modo de funcionamento do equipamento (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Figura 2 - Esquema de um espectrômetro.



Fonte: Adaptado de Taiz e Zeiger (2004).

Na maioria das aplicações NIR em madeira maciça, os espectros são coletados em modo de refletância, pois a madeira sólida é um material opaco e essa característica não permite que a radiação passe através de amostras espessas. Na espectroscopia de refletância, a energia de radiação refletida a partir da amostra é medida. Essa radiação refletida deve ser medida para evitar radiação especularmente refletida, que é produzida quando o ângulo de iluminação é o mesmo que o ângulo da radiação refletida (LEBLON et al., 2013).

Os espectros NIR possuem algumas dificuldades de interpretações devido ao elevado número de bandas existentes e das fortes sobreposições. Além disso, o espectro sofre efeitos de dispersão dependentes do comprimento de onda, ruídos e efeitos ambientais. Desse modo, a estatística multivariada relacionada a técnicas aplicadas a dados químicos é necessária para extrair informações sobre características de composição que estão ocultas no espectro NIR. A combinação da técnica espectroscópica e análises multivariadas, como análises de componentes principais (PCA) de mínimos quadrados parciais (PLS), análise de regressão por componentes principais (PCR) e rede neural artificial (RNA) oferecem uma ferramenta poderosa para interpretação dos resultados (COZZOLINO, 2009).

2.3.2 Vantagens e desvantagens da espectroscopia no NIR

O uso da espectroscopia no infravermelho próximo tem despertado grandes interesses tanto na área acadêmica quanto nos ambientes industriais, pois a técnica quando comparada a métodos tradicionais apresenta alguns benefícios: é um método não destrutivo e não invasivo,

exige preparo mínimo ou nenhum das amostras, não exige geração de resíduos químicos, as leituras são rápidas, elimina a necessidade de transporte de análises laboratoriais, eliminando custos e tempo com transporte ou perda das amostras destinadas à análises (BRAGA; DE OLIVEIRA, 2018).

Schwanninger et al. (2011) ressalta que a técnica NIR tem duas vantagens principais: a aquisição espectral é adquirida rapidamente, o que facilita a coleta de dados, visto que é um pré-requisito para sistemas de controle que trabalham em tempo real e os espectros são adquiridos dos materiais analisados com quase nenhum tratamento prévio das amostras. Para Amorim et al. (2013) dentre as vantagens, destaca-se o grande volume de material que pode ser analisado com rapidez e precisão, aumentando o rendimento da produção e reduzindo os custos industriais. Dessa forma, a técnica NIR vem demonstrando sua versatilidade analítica e vem se destacando em vários segmentos, como na indústria alimentícia, na agricultura, indústria farmacêutica, de polímeros, de meio ambiente, combustível, solo, silvicultura, madeira e papel (PASQUINE 2018).

Embora a técnica apresente suas vantagens, a tecnologia NIR também exige suas limitações como ser sensível às variações das condições do ambiente como a temperatura e a umidade relativa do ar, o que pode promover modificações nos resultados gerados. Quanto as amostras que são avaliadas, os resultados também podem apresentar alterações pois a técnica pode demonstrar sensibilidade em relação à granulometria, umidade e heterogeneidade (HEIN; LIMA; CHAIX, 2009). Outra desvantagem da tecnologia diz respeito à dependência de métodos destrutivos para realizar a calibração. A modelagem dos dados espectrais depende da acurácia e da reprodução dos resultados obtidos no método de referência, logo, necessita-se de maior tempo para a realização das análises, pois a calibração utiliza dados de laboratórios obtidos por métodos convencionais para correlacionar com os dados espectrais (TIBOLA et al., 2018).

Hell et al. (2016) destaca que a seleção dos materiais a serem analisados, o tamanho da amostragem, a precisão do método de referência e a aplicação do tratamento estatístico são fatores decisivos na construção dos modelos baseados em NIR.

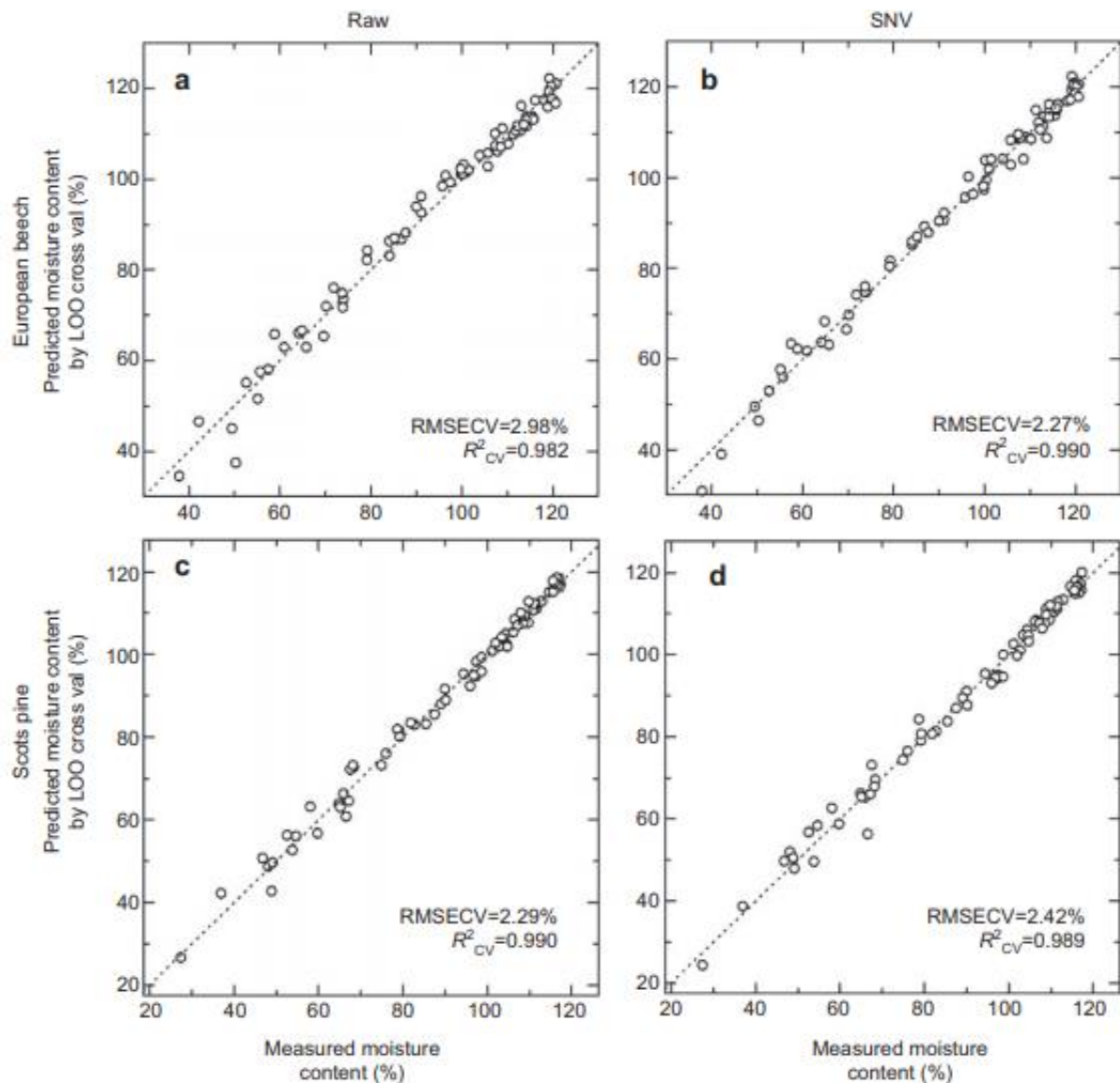
2.3.3 Aplicação da técnica NIR para estimativa da umidade da madeira

A espectroscopia no infravermelho próximo, associada a estatística multivariada, tem sido amplamente aplicada em diversos campos acadêmicos e industriais (ZANUNCIO et al., 2018). A técnica é bem-sucedida para caracterizar muitos biomateriais e, dentre eles, a

madeira. O número de publicações que referem a aplicação da ferramenta NIR na silvicultura, em produtos e propriedades da madeira está aumentando sistematicamente (BALDIN et al., 2018). A técnica tem obtido sucesso em pesquisas que avaliam características físicas da madeira, como no caso de estudos de estimativa de umidade.

Kobori et al. (2013) utilizaram o NIR para monitorar a umidade de amostras de duas madeiras durante a secagem natural, a faia europeia e o pinheiro-silvestre. Com o uso da espectroscopia no NIR os autores obtiveram modelos bem sucedidos para a estimativa da umidade. A faia europeia apresentou coeficiente de determinação (R^2) para a validação do modelo de 0,982 e 0,99 e erro quadrático médio de validação (RMSEV) de 2,98% e 2,27%. O pinheiro silvestre obteve R^2 de 0,99 e 0,989 e RMSEV de 2,29% e 2,42% (Figura 3).

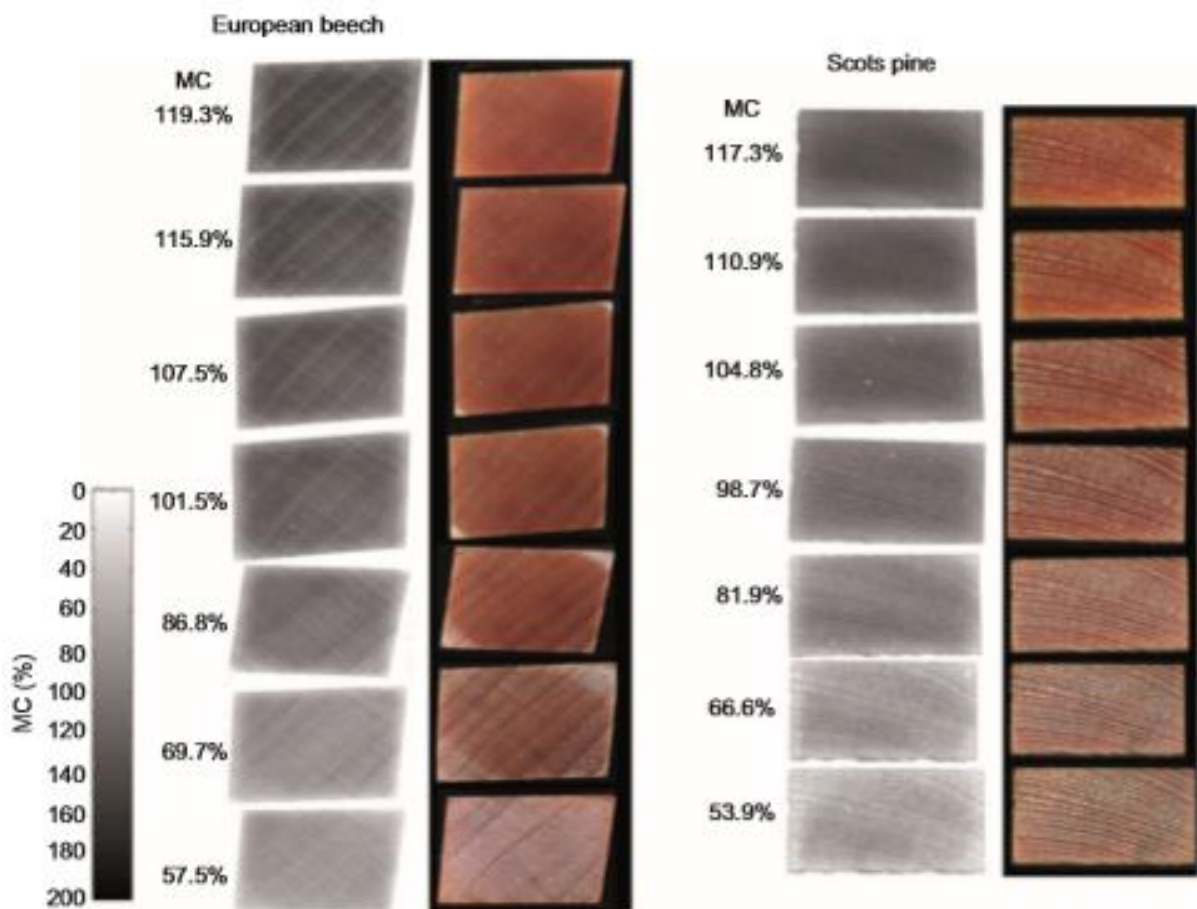
Figura 3 - Calibração e predição para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR da faia europeia e do pinheiro-silvestre.



Fonte: Kobori et al. (2013).

As mudanças na distribuição da umidade durante a secagem das duas madeiras podem ser observadas na Figura 4. A variação da umidade foi expressa por 256 níveis de cinza com resolução cinza de 8 bits, em que preto indica o máximo de umidade (200%) e branco indica o mínimo (0%). Como esperado, os autores puderam constatar que a umidade na borda externa das amostras das duas madeiras diminui mais rápido que na região central.

Figura 4 - Imagem preditiva de controle de umidade e imagem RGB (R = 700 nm, G = 546 nm, B = 436 nm) da faia europeia e pinheiro silvestre.



Fonte: Kobori et al. (2013).

Dos Santos et al. (2020) utilizaram a espectroscopia no infravermelho próximo para estimar o teor de umidade em amostras de madeira de eucalipto. Para o estudo foram construídos modelos preditivos a partir das assinaturas NIR registradas pelo método de aquisição via fibra óptica e esfera integradora, também sendo verificado qual superfície da madeira desenvolveria melhores modelos.

Os autores puderam constatar que os melhores modelos para estimativa de umidade da madeira foram desenvolvidos a partir de espectros NIR gravados na superfície transversal produzida com serra de fita e por método de aquisição da esfera integradora, com R^2 de 0,96 e

RMSEP de 8,56%. Já com a utilização da sonda de fibra óptica obtiveram R^2 de 0,83 e RMSEP de 20,51% (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelos PLS-R para estimar a umidade da madeira a partir de espectros NIR obtidos através da esfera de integração (IS) e sonda de fibra óptica (FO) em superfícies de madeira.

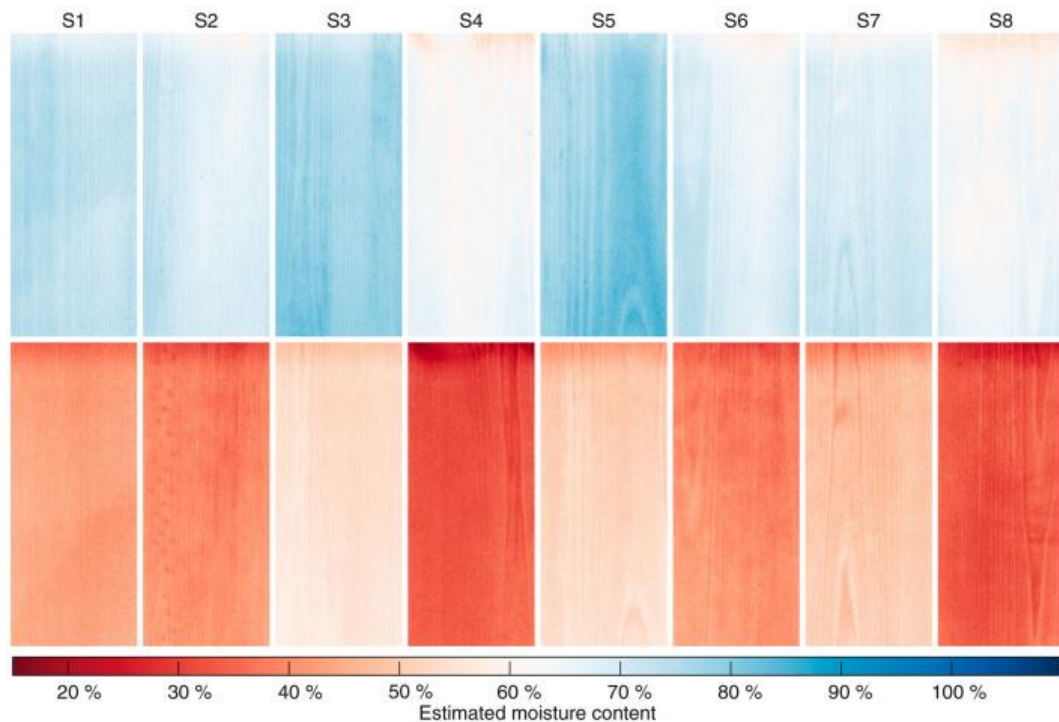
Modelo	Tipo	Superfície da Madeira	R^2	RMSEP (%)
1	IS	tg	0,85	15,05
2			0,51	40,66
3		rd	0,90	12,97
4			0,75	68,22
5		tvcs	0,96	9,01
6			0,72	49,44
7		tvbs	0,96	8,56
8			0,79	53,05
9	FO	tg	0,70	26,86
10			0,33	71,4
11		rd	0,77	24,28
12			0,46	62,98
13		tvcs	0,80	21,79
14			0,70	51,35
15		tvbs	0,83	20,51
16			0,57	47,25

Legenda: IS - esfera de integração; FO - sonda de fibra óptica; tg - superfície tangencial; rd - superfície radial; tvcs - superfície transversal usinada pela serra circular; tvbs – superfície transversal usinado por uma serra de fita.

Fonte: Adaptado de Dos Santos et al., (2020).

Stefansson et al. (2020) investigaram o uso de imagens de séries temporais hiperespectral na região do infravermelho próximo para estimar a dinâmica do teor de umidade em amostras de pinheiro silvestre termicamente modificadas. As imagens hiperespectrais na região do comprimento de onda NIR (953-2516 nm) foram usadas para coletar as informações sobre a absorbância de oito amostras de pinheiro, a cada minuto, conforme sua secagem durante um período de aproximadamente 20h. Após o pré-processamento de dados espectrais coletados, foi utilizada a regressão de mínimos quadrados parciais (PLS) para mapear os dados de absorbância de cada amostra para uma distribuição de umidade em diferentes etapas de tempo durante o processo de secagem (Figura 5). A aplicação do modelo aos dados de validação apresentou resultados satisfatórios com R^2 de 0,97 e RMSEP de 2,7%.

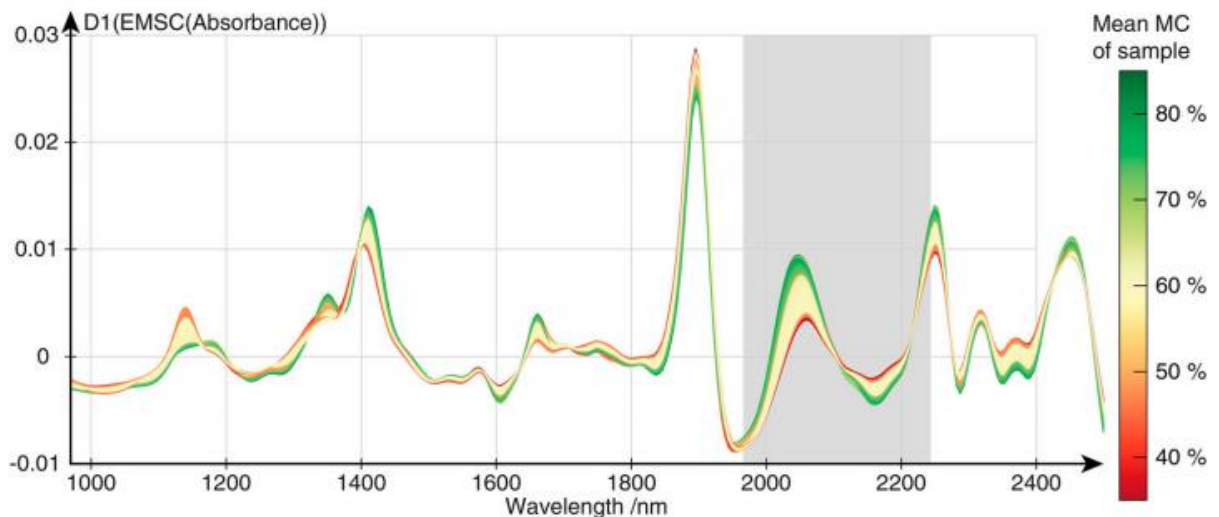
Figura 5 - Distribuição espacial do teor de umidade estimado por PLS para cada amostra no estudo. A linha superior mostra as amostras nos estágios iniciais de secagem, a linha inferior mostra as mesmas amostras aproximadamente 20 h de secagem mais tarde.



Fonte: Stefansson et al. (2020).

Os autores obtiveram resultados que indicaram que a região entre 1966 a 2244 nm de um espectro NIR (Figura 6), quando pré-processado com correção de dispersão multiplicativa estendida e derivação de primeira ordem, pode ser usado para modelar a umidade do pinheiro modificado termicamente.

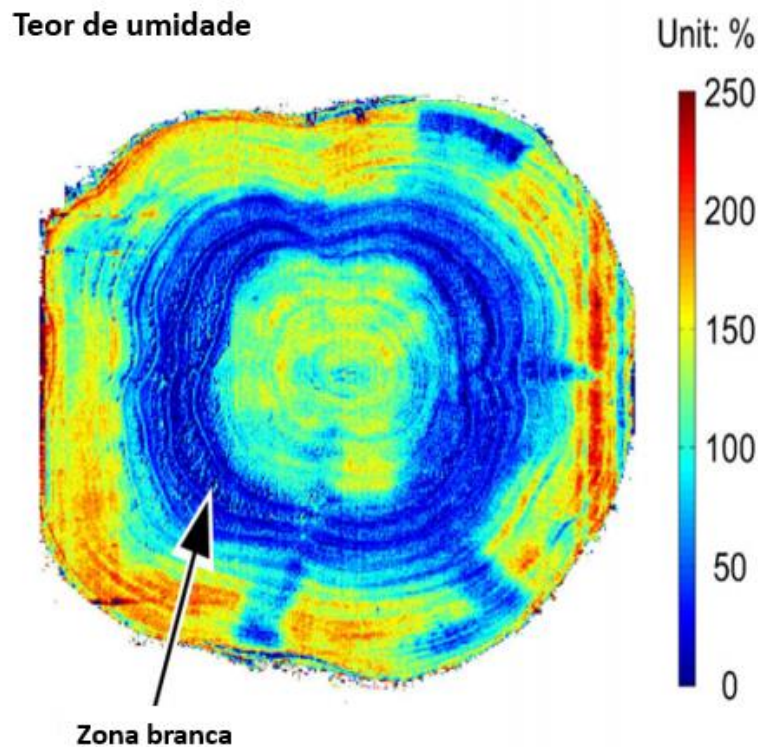
Figura 6 - Espectro de absorvância médio de cada imagem hiperespectral, após o pré-processamento de dados ao longo da região de 953 a 2516 nm.



Fonte: Stefansson et al. (2020)

Fujimoto et al. (2015) quantificaram a distribuição espacial da umidade em discos de *Cryptomeria japonica* (suji) usando imagem hiperespectral no infravermelho próximo e técnicas multivariadas de análise de dados. Os dados hiperespectrais para as amostras dos discos foram adquiridos usando um sistema de imagem por composição NIR com uma faixa espectral de 913 a 2519 nm. Os modelos de calibração para estimativa da umidade foram desenvolvidos usando análises de regressão de mínimos quadrados parciais. Os pesquisadores obtiveram modelo preditivo que apresentou bom desempenho com R^2 de 0,82 e RMSEP de 12,4%. A distribuição da umidade predita do disco detectou claramente a baixa umidade (zona branca) ao redor do cerne, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 - Distribuição da umidade em discos previstos pelo NIR.



Fonte: Adaptado de Fujimoto et al. (2014).

3 OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo foram desenvolver e aplicar modelos multivariados para estimativa da umidade da madeira com espectros no NIR e entender a variação espacial do gradiente de umidade dentro de peças durante a secagem da madeira em diferentes condições.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Origem do material vegetal e preparação das amostras

As amostras utilizadas no estudo são provenientes do clone AEC 144, híbrido de base genética *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos 7 anos de idade, plantadas em espaçamento 3,5 x 2,20 m, procedentes de plantios comerciais da Fazenda Praia Grande, localizada na cidade de Santo Antônio do Amparo - MG.

As árvores, ao serem abatidas, imediatamente foram enviadas para Universidade Federal de Lavras (UFLA), especificamente para a serraria da universidade, em média as toras detinham de 1,50 m de comprimento e 67 cm de diâmetro. Para não perder umidade para o ambiente obtiveram os topos impermeabilizados com papel filme e por sacos plásticos (Figura 8).

Figura 8 - Toras de madeira úmida de *Eucalyptus* com topos impermeabilizados por papel filme e sacos plásticos.

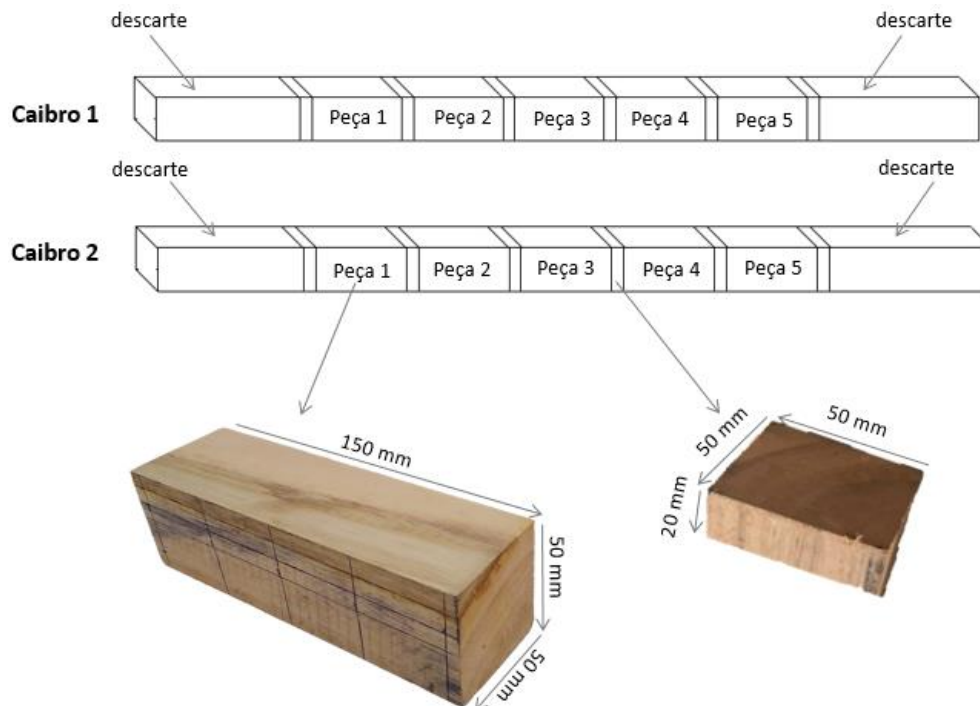


Fonte: Do autor (2021).

As toras foram mecanicamente processadas de modo a se produzir dois caibros necessários ao estudo, cada caibro proveniente de uma tora. A partir de cada um dos caibros foram obtidos cinco corpos de prova prismáticos com dimensões de 50 (radial) x 50 (tangencial) x 150 mm (longitudinal) que foram utilizados para medição dos espectros no NIR e das massas. Amostras adjacentes também foram obtidas dos dois caibros com dimensão 20

x 50 x 50 mm para determinação da umidade por gravimetria, o valor encontrado tornou-se referência para estimativa do teor de umidade que as peças apresentariam no momento que seriam avaliadas com NIR (Figura 9). O estudo foi realizado no laboratório de biomateriais, pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da UFLA.

Figura 9 - Caibros de madeira úmida de *Eucalyptus* para confecção das amostras.



Fonte: Do autor (2021).

Assim que as peças foram preparadas, imediatamente foram embaladas com papel filme para não perderem umidade (Figura 10). As peças permaneceram embaladas até o momento em que foram colocadas para secar.

Figura 10 - Peças embaladas com papel filme.



Fonte: Do autor (2021).

4.2 Secagem das amostras

As peças do caibro 1 foram submetidas à secagem em ambiente controlado com

temperatura em torno de 20°C e umidade relativa do ar a cerca de 60%. Já as peças do caibro 2 obtiveram sua secagem controlada em estufa a 60°.

4.3 Calibração do modelo

Dados laboratoriais obtidos por métodos convencionais foram empregados para correlacionar com os dados espectrais. As amostras utilizadas para a calibração do modelo foram provenientes das mesmas toras que foram confeccionados os corpos de prova prismáticos para a realização do estudo com o NIR e das massas. Para gerar o modelo, 45 corpos de prova com dimensão 1,0 x 2,5 x 2,5 cm foram avaliados (Figura 11). A aquisição espectral e a determinação da umidade foram realizadas a cada 10% de perda de água (aproximadamente).

Figura 11 - Corpos de prova para calibração do modelo.



Fonte: Do autor (2021).

4.4 Aquisição dos espectros no NIR

Os espectros dos corpos de prova foram adquiridos em modo de reflexão difusa por meio do espectrômetro baseado em transformada de Fourier (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany, model: MPA) em conjunto com o programa OPUS versão 7.0 (Figura 12). Os espectros foram capturados utilizando fibra óptica na face tangencial do material. A aquisição espectral foi obtida na região do infravermelho próximo, abrangendo a faixa entre 12.500 a 3.600 cm^{-1} (800 a 2.780 nm), com resolução espectral de 3,87 cm^{-1} e 16 scans para leitura. Para calibrar a absorção da luz do infravermelho próximo, uma base com superfície banhada a ouro adotada pelo equipamento, foi utilizada como referência.

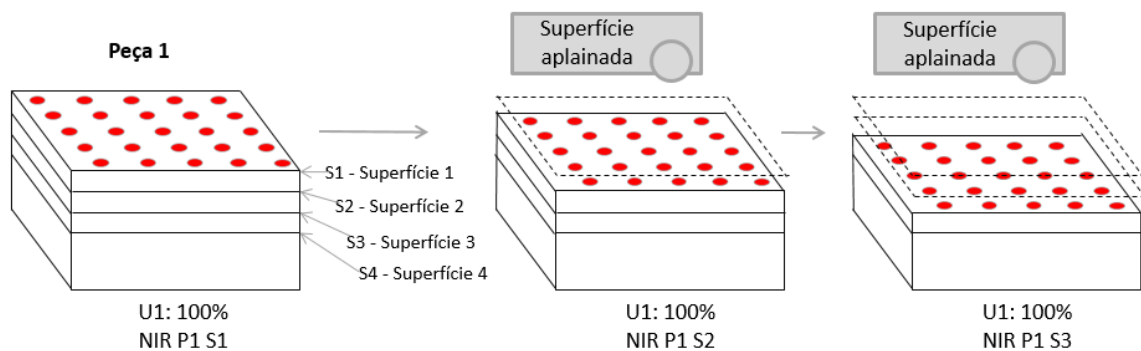
Figura 12 - Espectrofotômetro no NIR baseado em transformada de Fourier.



Fonte: Do autor (2021).

Para a coleta espectral das peças do caibro um, assim que a primeira peça foi desembalada do papel filme, vinte e cinco espectros foram coletados em pontos equidistantes cobrindo toda a superfície tangencial do corpo de prova. Após a aquisição espectral da superfície original, o corpo de prova que detinha de 50 mm de altura obteve sua dimensão reduzida em 8,3 mm na direção radial por meio de uma plaina elétrica e se apresentou com 41,67 mm, uma redução de 16,67%. Imediatamente após o aplainamento, outros 25 espectros foram coletados na nova superfície (mais úmida). Assim, três operações de aplainamento foram executadas no corpo de prova, sendo que a última superfície coincidiu com a região central da peça original. No total, 25 espectros foram coletados por superfície, totalizando 100 espectros por peça. Após a avaliação da primeira peça, as outras quatro peças permaneceram no processo de secagem controlada. Quando verificado que a segunda peça havia perdido 20% de massa de água, a amostra foi submetida as mesmas operações de aplainamento e medição espectral (Figura 13). E assim sucessivamente, a terceira e quarta peça passaram pelo mesmo processo cada vez que perdia mais 20% de massa de água. O mesmo procedimento para aquisição espectral foi feito com as peças do caibro dois que obtiveram secagem em estufa a 60°.

Figura 13 - Coleta espectral com variação espacial na peça de *Eucalyptus*.



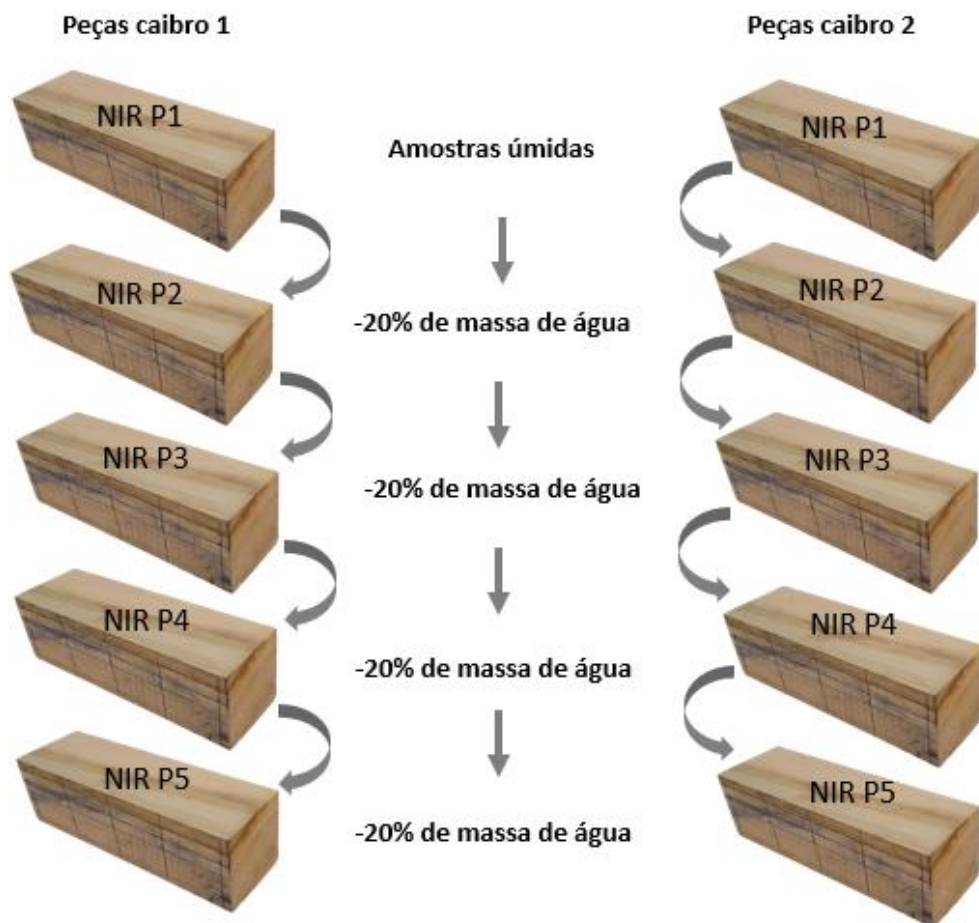
Fonte: Do autor (2021).

4.5 Determinação e monitoramento da umidade

Amostras adjacentes aos caibros foram utilizadas para determinar a umidade inicial das peças. Para isso foi utilizado o método gravimétrico, preconizado pela norma NBR 14929 (ABNT, 2003) e com base nos resultados foi possível definir o teor de umidade que as peças se apresentariam no momento que seriam avaliadas com NIR.

Por apresentar valores pré-estabelecidos de massas as peças obtiveram sua umidade monitorada durante todo processo de secagem, para isso foi realizado o controle constante de perda de massa de água. As peças do caibro um obteve a secagem em ambiente controlado iniciada ao mesmo tempo, mas cada peça foi submetida às operações de aplainamento e medição espectral em etapas distintas. A cada 20% de perda de massa de água uma peça foi avaliada. O mesmo foi feito com as peças do caibro dois que obtiveram secagem em estufa a 60° (Figura 14).

Figura 14 - Etapas de monitoramento de perda de massas das peças para coleta espectral.



Fonte: Do autor (2021).

4.6 Estatística multivariada

Os espectros coletados nas quatro superfícies de cada peça em etapas distintas de secagem foram aplicados numa regressão de mínimos quadrados parciais (Partial Least Square - PLS - regression) e correlacionados com as informações espectrais da umidade que foi determinada pelo método convencional. Para o processamento das análises foi utilizado o programa *Chemoface* versão 9.61 (NUNES et al., 2012).

Os modelos foram ajustados de acordo com o número de componentes principais sugeridos pelo programa *Chemoface*, dado que de acordo com o valor adotado o erro padrão da validação cruzada (RMSECV) deverá diminuir, enquanto o coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2_{cv}) deverá aumentar.

As calibrações foram realizadas a partir dos espectros originais e dos espectros tratados matematicamente pelo método da primeira derivada. O tratamento tem como objetivo, eliminar os ruídos e melhorar a qualidade do sinal da calibração. Para a validação do modelo da calibração, foi empregado o método da validação cruzada e independente.

4.7 Critérios para a seleção da calibração

Os critérios adotados para escolher os modelos de predição mais adequados foram: coeficiente de determinação do modelo da validação cruzada (R^2_{cv}); número de variáveis latentes usadas na calibração (LV); erro padrão da validação cruzada (RMSECV) e relação de desempenho do desvio padrão (RPD).

4.8 Plotagem de gráficos

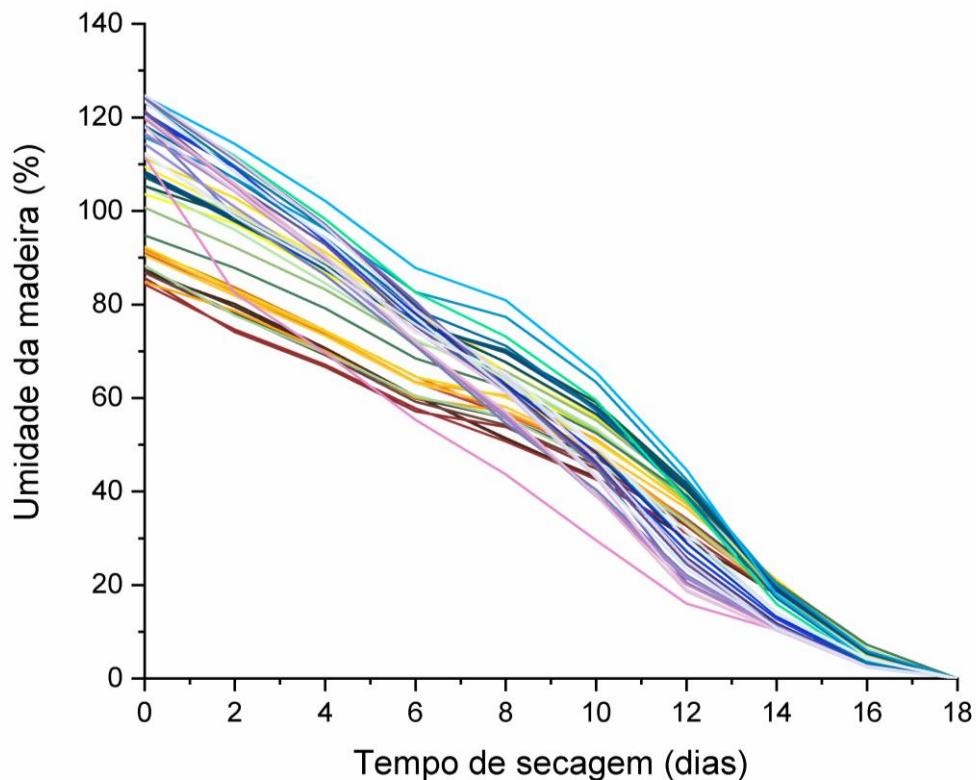
Para gerar os gráficos de duas dimensões representativos da umidade em cada uma das superfícies das peças foi utilizado o Scilab, um software gratuito opensource (código aberto) de programação numérica (v.5.3.1, <http://www.scilab.org/>). O programa permite a solução de problemas numéricos e a geração de gráficos bi e tridimensionais. Os dados foram interpolados (200 estimativas entre cada par de pontos) usando o método *cubic spline* para criar estimativas na superfície inteira, tornando possível gerar gráficos de superfície do teor de água com base nas estimativas do modelo NIR.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dessorção de água nas amostras

As amostras de referência apresentaram umidade média de 52,27% variando entre 0 a 124,71%, com coeficiente de variação de 71% (Figura 15). Os valores foram determinados em laboratórios desde a condição saturada até a condição anidra durante um período de 18 dias.

Figura 15 - Valores de umidade determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição anidra.



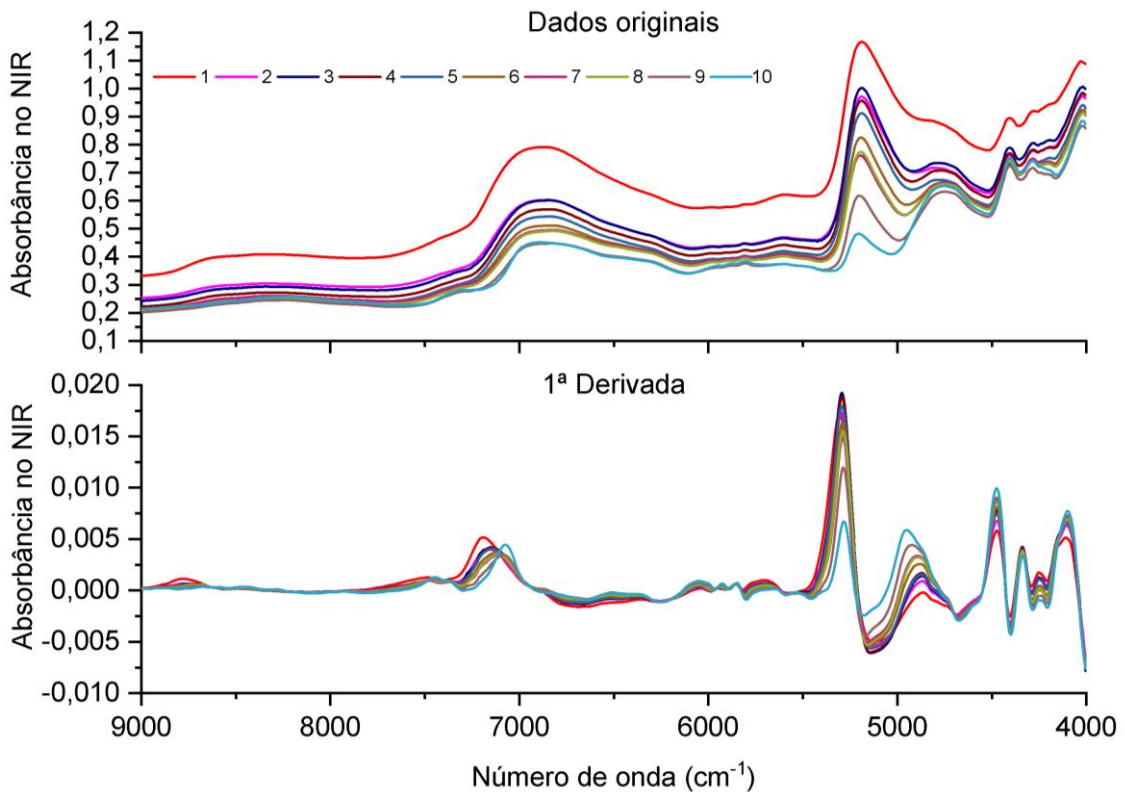
Fonte: Da autora (2021).

No estudo realizado por Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) no qual avaliaram diferentes espécies de *Eucalyptus* foram encontrados valores médios de umidade que variaram de 62 a 102%. Os valores encontrados na literatura estão em conformidade com os obtidos na estatística descritiva do presente trabalho. No entanto observa-se que as umidades obtidas foram determinadas em laboratório da condição saturada até a condição anidra, fator que provavelmente elevou o coeficiente de variação.

5.2 Espectros no NIR

Na Figura 16 é possível observar a média da umidade estimada por meio dos espectros adquiridos no NIR, por modo de reflexão difusa nas 10 etapas de secagem da calibração, da condição saturada a condição anidra, sem e com a aplicação da primeira derivada.

Figura 16 - Média da umidade obtidas pelo espectro NIR em cada uma das dez etapas de secagem, sem e com aplicação da primeira derivada.



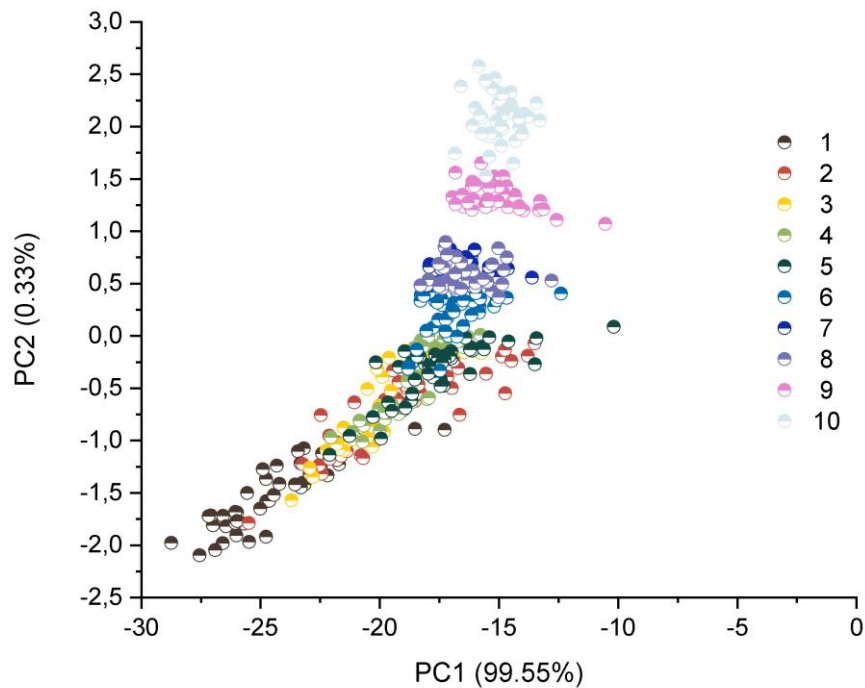
Fonte: Da autora (2021).

Os espectros originais coletados nas diferentes etapas de secagem têm o seu comportamento de acordo com a umidade da amostra analisada, os maiores picos de absorção indicam maiores quantidade de água na amostra. De acordo com o estudo de Zhang et al. (2011) a absorção no NIR aumenta à medida que aumenta o comprimento de onda e o teor de água, a absorção se encontra associada à quantidade de água no material, uma vez que indicam vibrações características de grupos hidroxilas – OH, que aumentam com o aumento da umidade. Os picos de absorção podem ser observados na Figura 17 no comprimento de onda de aproximadamente 5500 cm⁻¹ e 4000 cm⁻¹ (ou 1818 nm e 2500 nm). Esses picos de absorção condizem com os resultados obtidos por Stefansson et al. (2020), que encontrou maior absorção no comprimento de onda de 1900 nm e 1220 nm.

Os espectros tratados pela primeira derivada, segundo Martens e Tormod (1989) tem como propósito melhorar a qualidade do sinal e reduzir os ruídos com a finalidade de obter espectros de melhor qualidade. Porém observa-se que nas 10 etapas de secagem, não houve melhora nos espectros tratados com a primeira derivada.

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada para uma prévia avaliação do comportamento dos espectros e possível separação das amostras. Foram utilizados os espectros originais adquiridos via fibra óptica, na Figura 17 observa-se os scores da PCA das dez etapas de secagem. A componente principal 1 (PC1) explicou 99,55% da variabilidade dos dados e a componente principal 2 (PC2) 0,33%, que juntas conseguiram explicar 99,88% da variância.

Figura 17 - Gráfico dos scores da análise de componentes principais dos espectros no NIR medidos em dez classes de umidade diferente.



Fonte: Da autora (2021).

Nota-se que no início não foi possível observar nítida separação dos scores, em virtude das amostras apresentarem grande quantidade de água. No entanto percebe-se que à medida que o material foi secando e a umidade foi diminuindo, os scores se aproximaram e nas últimas etapas de secagem as amostras apresentaram um comportamento mais homogêneo. Nesse momento as umidades estavam variando entre 8% e 0%.

5.3 Desenvolvimento e validação dos modelos

As calibrações as validações cruzadas e a predição para obtenção de modelos para estimativa da umidade das peças de madeira foram realizadas utilizando análise de regressão do mínimo quadrados parciais (Tabela 2). A análise foi feita a partir dos espectros originais e tratados matematicamente pelo método da primeira derivada, no qual foi utilizado seis variáveis latentes.

Tabela 2 - Calibração, validação cruzada e predição para estimativa da umidade da madeira por PLS-R.

Modelo	Trat	VL	Fase de desenvolvimento	R ²	RMSE	RPD
1	-	6	Calibração	0,90	11,18	3,17
2	1d	6		0,90	11,17	3,17
3	-	6	Validação cruzada	0,90	11,55	3,07
4	1d	6		0,89	11,75	3,01
5	-	6	Validação independente	0,89	11,70	2,99
6	1d	6		0,89	11,79	3,02

Trat – tratamento matemático; “-” – dados originais (não tratados); 1d – primeira derivada; VL – variável latente; R² – coeficiente de determinação; RMSE – raiz quadrática média do erro; RPD – relação de desempenho do desvio padrão.

Fonte: Da autora (2021).

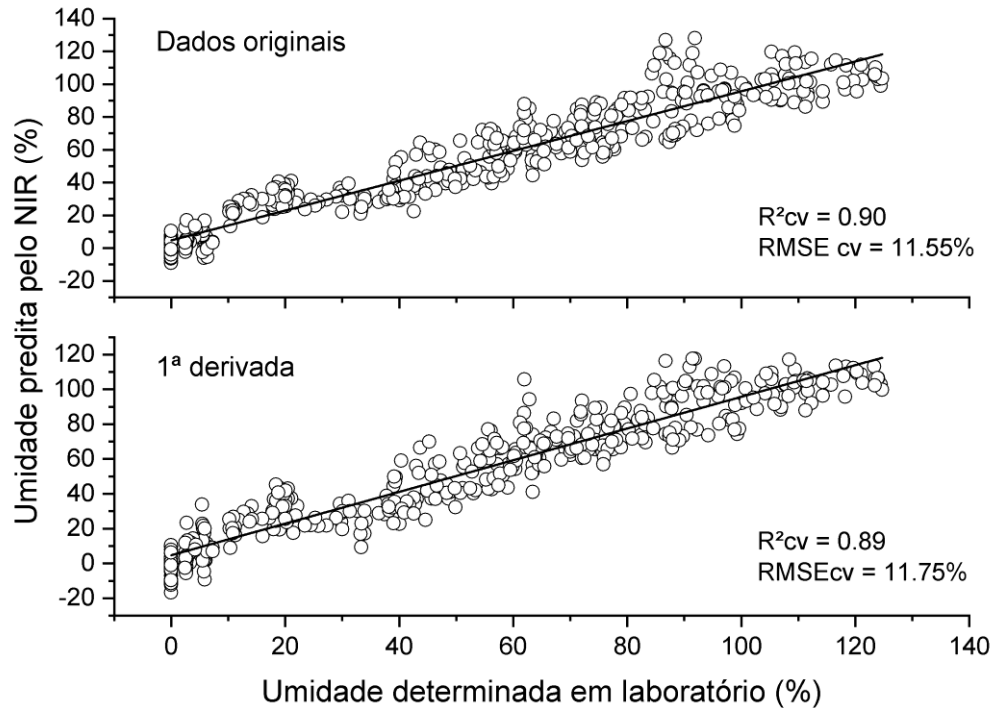
De acordo com a Tabela 2, tanto o modelo de calibração (R²c) quanto para validação cruzada (R²cv) apresentaram bons resultados com coeficiente de determinação de 0,90. Ao tratar os dados com primeira derivada as estatísticas não melhoraram, o RMSEcv aumentou em relação aos dados sem tratamento e o R²cv diminuiu. O modelo de predição se mostrou bem sucedido com coeficiente de determinação da predição (R²p) de 0,89 e erro de 11,70%.

A relação de desvio padrão (RPD) no modelo de calibração e no de validação cruzada foi de 3,17 e 3,07, respectivamente, após aplicação da primeira derivada obteve-se o RPD de 3,17, e 3,01. No modelo de predição o erro padrão obtido foi de 2,99. Segundo Williams e Soberings (1993) as calibrações com valores de RPD entre 3 e 5 indicam que as calibrações são satisfatórias para as predições, já valores de 2 a 3 indicam que as calibrações são aproximadas. De acordo com Schimleck, Doran e Rimbawanto (2003) os valores de RPD maiores que 1,5 são considerados satisfatórios em aplicações na área florestal.

Mora et al. (2011) investigaram a estimativa da umidade da madeira de *Pinus* utilizando a técnica NIR. Os autores obtiveram modelos para estimativa de umidade da madeira com coeficiente de determinação para validação cruzada de 0,85 e erro da validação

de 2,0%, modelo esse que corresponde com os resultados encontrados conforme a Figura 18.

Figura 18 - Calibração e validação cruzada para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR, sem e com tratamento da primeira derivada.

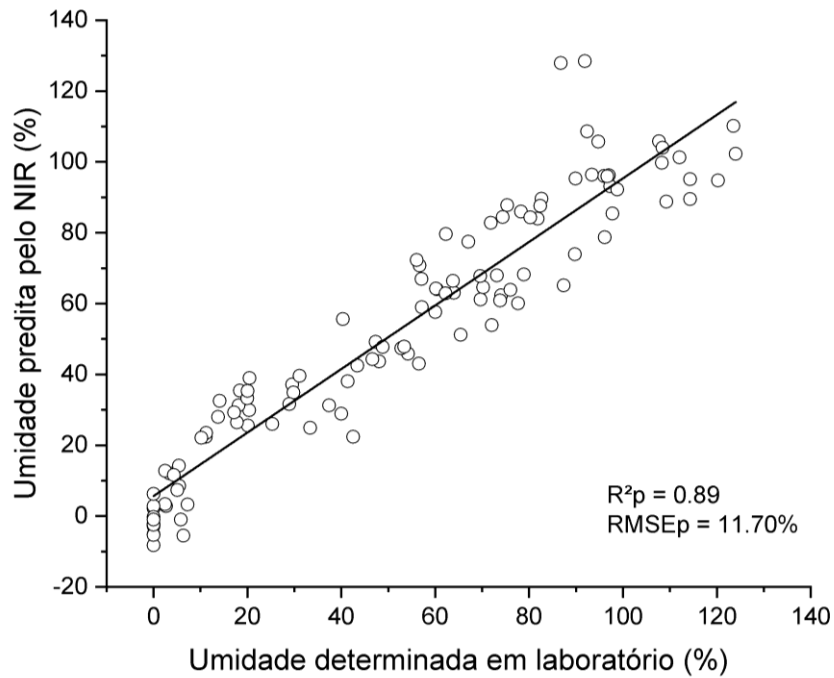


Fonte: Da autora (2021).

O modelo para estimativa de umidade apresentou coeficiente de determinação para validação cruzada (R^2_{cv}), de 0,90. Ao tratar os dados com a primeira derivada, as estatísticas não melhoraram, sendo que o erro médio da validação aumentou em relação aos dados sem tratamento. Para a construção do modelo foi utilizado os dados brutos, gerando resultados mais robustos, uma vez que o tratamento da primeira derivada não se mostrou eficiente.

A Figura 19 mostra boa correlação entre o valor predito pelo NIR e os valores determinados por técnicas gravimétricas.

Figura 19 - Predição para valores de umidade determinados em laboratório e estimados pelo NIR.



Fonte: Da autora (2021).

O coeficiente de determinação e o erro da predição obtidos foram tão satisfatórios quanto aos encontrados por Fujimoto et al. (2015), que quantificaram a distribuição da umidade em discos de madeira e obtiveram modelos de bons desempenhos, com coeficiente de determinação de predição (R^2p) de 0,82 e erro médio de predição (RMSEp) de 12,4%.

5.4 Predição da umidade nas peças de madeira durante a secagem

Os espectros registrados em cada superfície das peças de madeira avaliadas durante a secagem foram aplicados ao modelo 1 (Tabela 2) para predição da umidade em cada ponto. As médias por superfície em cada etapa de secagem e método de secagem foram calculadas e apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios e coeficiente de variação da umidade estimada pelo modelo NIR nas peças secas ao ar e em estufas nas diferentes posições espaciais, desde a superfície inicial.

Peça	Superfície	Secagem natural			Secagem em estufa		
		Média (%)	gradiente	CV (%)	Média (%)	gradiente	CV (%)
1 (100% de água)	1	123.64	sup: 124	7	123.64	sup: 124	7
	2	135.22	int: 126	17	135.22	int: 126	17
	3	127.76	Fator i/s: 1.01	11	127.76	Fator i/s: 1.01	11
	4	114.07		7	114.07		7
2 (80% de água)	1	68.01	sup: 68	21	60.04	sup: 60	24
	2	116.4	int: 120	10	114.28	int: 115	74
	3	120.78	Fator i/s: 1.76	9	117.68	Fator i/s: 1.92	17
	4	122.83		10	114.31		12
3 (60% de água)	1	35.21	sup: 35	14	32.38	sup: 32	31
	2	99.56	int: 101	21	105.66	int: 107	21
	3	101.38	Fator i/s: 2.87	19	108.91	Fator i/s: 3.30	20
	4	101.96		20	106.53		21
4 (40% de água)	1	29.43	sup: 29	29	38.48	sup: 38	65
	2	66.5	int: 79	39	78.51	int: 75	50
	3	82.5	Fator i/s: 2.67	31	70.66	Fator i/s: 1.94	54
	4	87.02		28	74.77		43
5 (20% de água)	1	19.01	sup: 19	39	10.02	sup: 10	96
	2	39.82	int: 48	25	28.41	int: 35	76
	3	49.34	Fator i/s: 2.53	24	39.37	Fator i/s: 3.57	87
	4	55.06		29	39.56		87

*CV – coeficiente de variação.

Fonte: Da autora (2021).

Cinco peças de madeira foram submetidas à secagem natural em ambiente controlado com temperatura a cerca de 20°C e umidade relativa do ar por volta de 60% e tiveram a massa e espectros medidos em cada etapa de secagem. De acordo com os valores encontrados, nota-se que na fase inicial da secagem, as peças apresentaram, em média, altos valores de umidade e a umidade em cada profundidade foi similar, com média de 125% variando de 114% a 135% de água. Durante a secagem, as peças perderam umidade de forma similar, independentemente do método de secagem. A diferença entre a umidade superficial e a média da umidade no interior foi muito pequena.

Na etapa 2 de secagem, a umidade da superfície inicial da madeira apresentou umidade média de 68% para secagem ao ar livre e 60% para secagem em estufa. Assim, a superfície da peça seca ao ar livre apresentou umidade 13.3% maior que a superfície da peça seca em estufa. Contudo, a umidade no interior das peças não apresentou diferença entre os métodos de secagem: o interior da peça seca ao ar apresentou uma umidade média de 120% enquanto a peça seca em estufa apresentou uma umidade de 115% no seu interior. A diferença entre a umidade superficial e a média da umidade no interior das peças passou a ser mais significativa. A umidade média do interior foi 2.87 vezes maior que a umidade média

superficial das peças secas ao ar livre, enquanto a umidade média do interior foi 3.30 vezes maior que a umidade superficial.

Quando a madeira apresentava apenas 60% da massa de água inicial, a umidade superficial foi de 35% (secagem ao ar) e 32% (secagem em estufa). A umidade do interior foi de 100% para peças secas ao ar enquanto a umidade das peças secas em estufa foi de 107%.

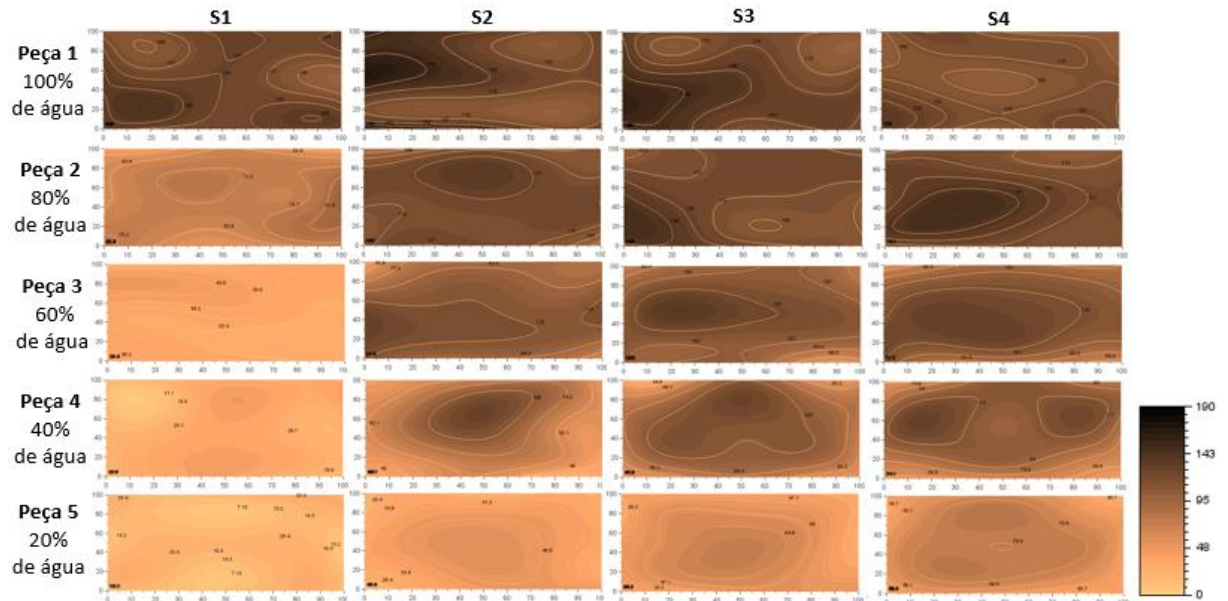
O mesmo fenômeno pode ser observado nas fases seguintes. Contudo, na fase 5 de secagem, quando as peças apresentavam apenas 20% da massa inicial de água, observa-se maior efeito do método de secagem no gradiente de umidade. A umidade média do interior foi 1.76 vezes maior que a umidade média superficial das peças secas ao ar livre enquanto a umidade média do interior foi 1.92 vezes maior que a umidade superficial.

As primeiras peças detêm de maiores teores de umidade e a perda inicia-se acentuada nas superfícies mais externas, sendo que posteriormente é verificada a perda da umidade na parte mais central das amostras. A rápida perda de umidade da região mais externa da peça em relação a parte mais central também foi detectada no estudo realizado por Kobori et al. (2013), que acompanhou a distribuição de umidade em peças de madeira e foi identificado os menores valores de umidade na região mais externa da peça com 57,5% e 53,9%, e as maiores umidades encontradas foram na parte central do material com valores de 119,3% e 117,3%.

5.5 Mapeamento da variação de umidade no interior das peças de madeira durante a secagem

O mapeamento da umidade nas peças de madeira do caibro um que obteve seu processo de secagem natural em ambiente controlado com temperatura por volta de 20° pode ser observada na Figura 20. A variação da umidade foi expressa por diferentes níveis de marrom, em que a cor marrom com a tonalidade mais escura indica o máximo de umidade (190%) e a cor bege com a tonalidade mais clara indica o mínimo de umidade (0%).

Figura 20 - Variação da umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro um que obteve secagem natural em ambiente controlado.

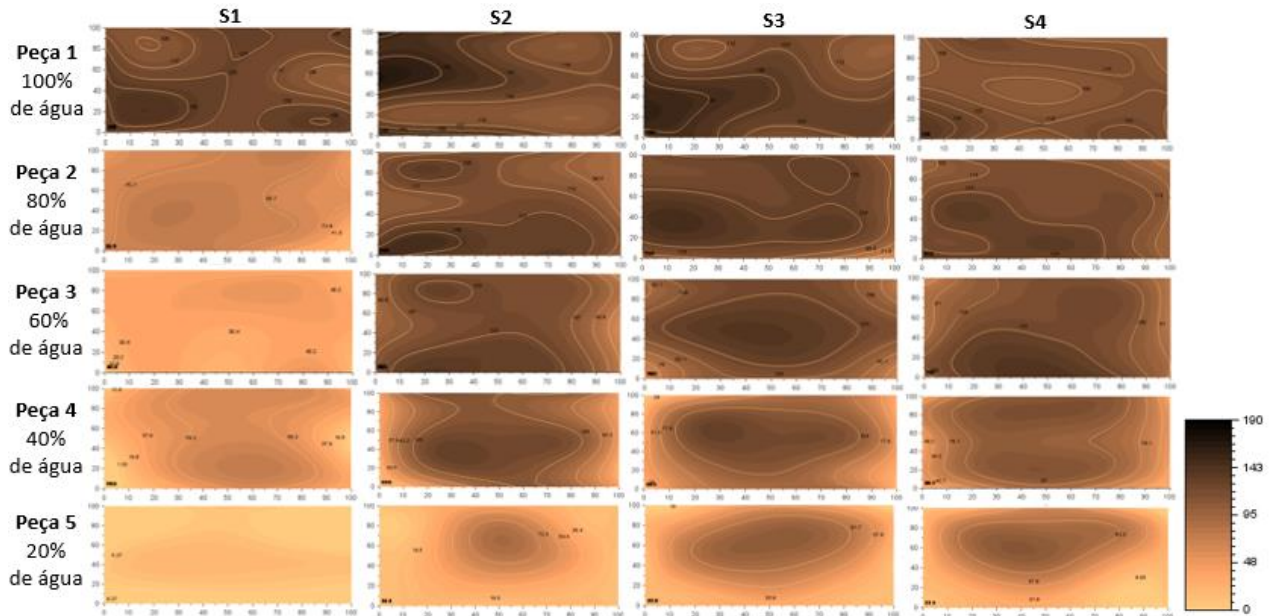


*S1 – superfície inicial 1; S2 – superfície intermediária 2; S3 – superfície intermediária 3; S4 – superfície central 4 (centro da peça).

Fonte: Da autora (2021).

As superfícies das peças iniciais apresentaram-se com maior quantidade de água. Constatou-se que, à medida que as peças perdem umidade para o ambiente, é possível identificar mudanças no comportamento da umidade nas amostras. O mesmo pode ser observado nas peças de madeira do caibro dois (Figura 21), que obteve a secagem em estufa a 60° e os diferentes níveis de marrom determinam a quantidade de água presente na amostra.

Figura 21 - Variação de umidade nas superfícies das peças de madeira do caibro dois que obteve secagem em estufa 60°.



*S1 – superfície inicial 1; S2 – superfície intermediária 2; S3 – superfície intermediária 3; S4 – superfície central 4 (centro da peça).

Fonte: Da autora (2021).

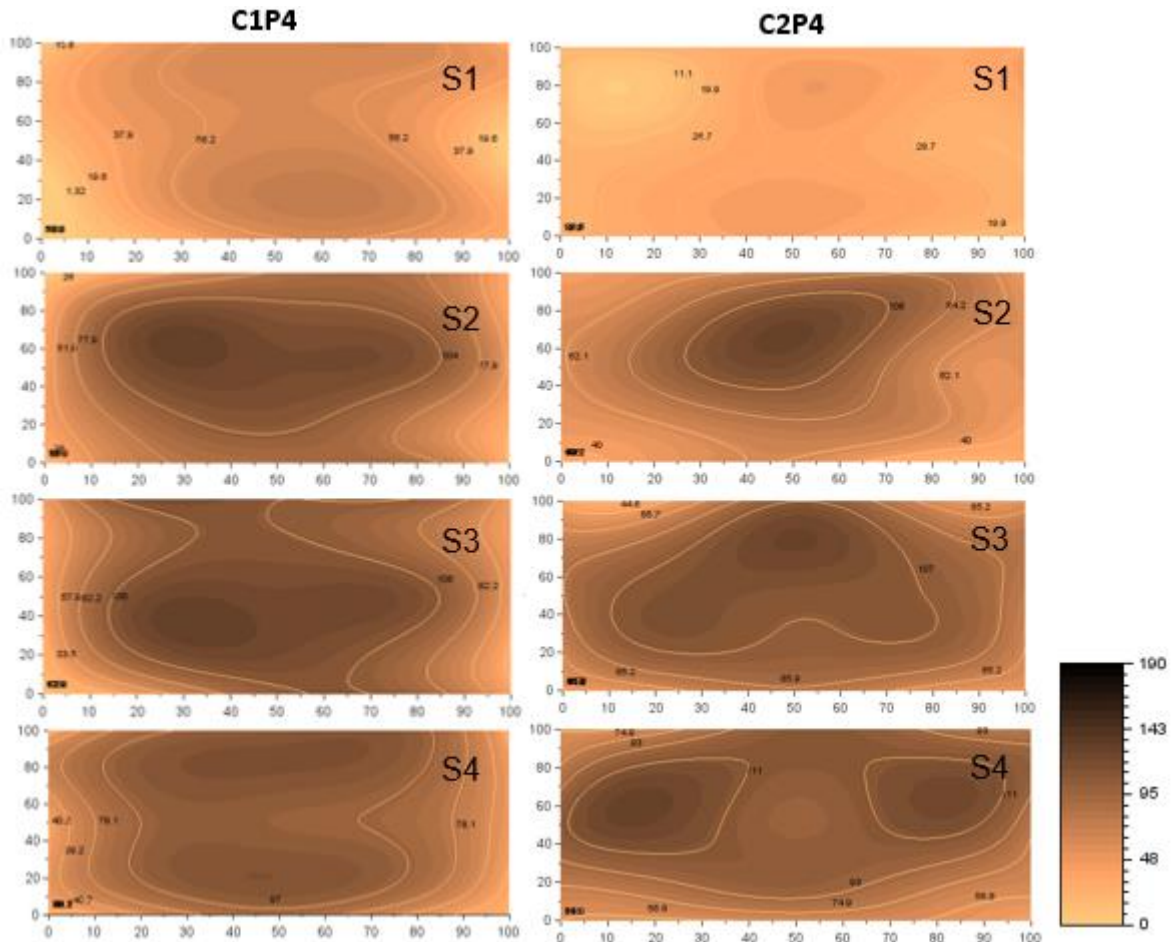
5.6 Influência dos métodos de secagem na variação espacial da desorção

As cinco peças do caibro um que secaram em ambiente natural apresentaram comportamento na variação da umidade de forma gradativa. Esse comportamento foi observado em todas as fases de secagem, desde quando se apresentaram com 100% de massa de água até atingirem 20% de massa. As primeiras peças apresentaram maiores níveis da cor marrom escuro o que identifica maior quantidade de água nas peças, com o decorrer do tempo as amostras apresentaram-se com níveis da cor marrom clara, o que demonstra menor quantidade de água presente. O mesmo acontece nas superfícies avaliadas de cada peça, já que nas superfícies mais próximas a região central da amostra a umidade é maior e diminui à medida em que as superfícies vão ficando mais próximas à parte externa, surgindo assim um gradiente de umidade no interior da peça. Essa variação pode ser observada na Figura 23.

As peças do caibro dois que secaram em estufa a 60° demonstrou um comportamento semelhante as peças do caibro um quando atingiram entre 80 e 40% de massa de água, porém a peça cinco que atingiu 20% de umidade obteve maior intensidade de secagem ao ser comparada com a peça cinco do caibro um. As primeiras peças se apresentaram mais úmidas, sendo identificadas por cor marrom escura, com o decorrer do tempo, devido à perda de água as amostras foram ficando mais secas e sua tonalidade apresentou-se mais clara. Conforme

observa-se na Figura 22 as superfícies avaliadas têm perda de umidade rapidamente na parte externa da amostra, e a umidade se concentra-se na região central da peça.

Figura 22 - Variação da umidade nas superfícies da peça quatro (40% da massa de água inicial) do caibro um (secagem natural) e do caibro dois (secagem em estufa).



C1P4 – caibro um, peça quatro; C2P4 – caibro dois, peça quatro; S1– superfície original); S2 – superfície dois; S3 – superfície três; S4 – superfície quatro (centro da peça).

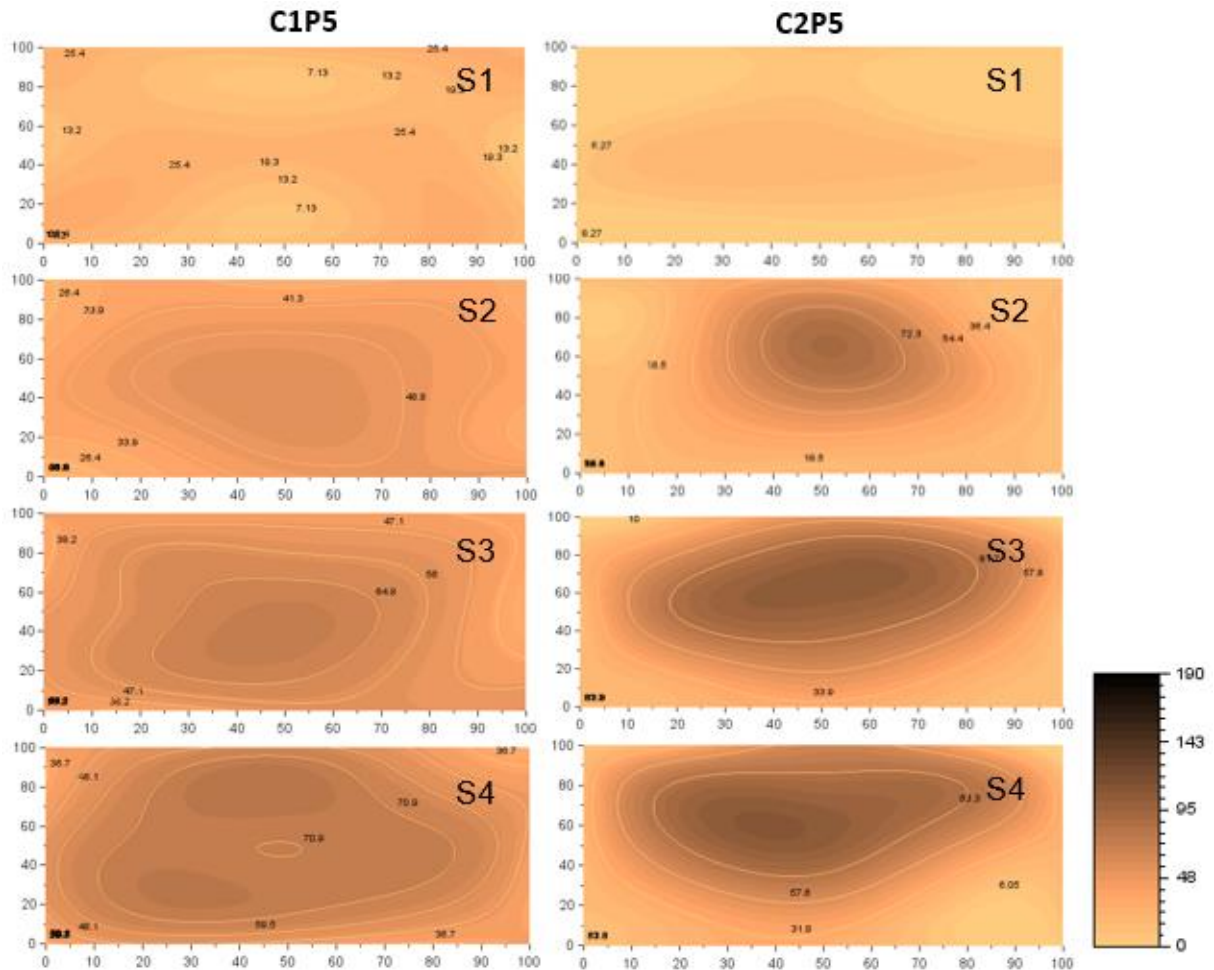
Fonte: Da autora (2021).

Esse comportamento da umidade também foi identificado por Kobori et al. (2013), que utilizaram a técnica NIR para monitorar a umidade de duas madeiras durante a secagem natural. No estudo a variação da umidade foi expressa por 256 níveis de cinza, em que a coloração preta indicava o máximo de umidade e a branca o mínimo. Como esperado os autores puderam constatar que a umidade na borda externa, que se apresentavam com mais níveis de cor branca diminuía mais rapidamente que a região central da peça que se apresentava com maior intensidade de cor preta.

As superfícies avaliadas da peça cinco que secou em estufa, apresentaram comportamento diferente da peça cinco do caibro com secagem natural. Na Figura 23 observa-se a umidade bem distribuída sobre as superfícies do caibro um, já no caibro dois é

possível identificar maior concentração de água na região mais central da peça, e suas bordas externas se apresentaram mais secas.

Figura 23 - Variação da umidade nas superfícies das peças cinco (20% da massa de água inicial) do caibro 1 submetido à secagem ao ar (esquerda) e caibro 2 submetido à secagem em estufa (direita).



*S1 – superfície um; S2 – superfície dois; S3 – superfície três; S4 – superfície quatro.

Fonte: Da autora (2021).

6 CONCLUSÃO

Os modelos baseados em espectros no infravermelho próximo geraram estimativas confiáveis ($R^2=0,90$ e $RMSE=11,5\%$) da umidade local e do gradiente de umidade das peças de madeiras de *Eucalyptus* durante a secagem. Este estudo permite constatar que na fase inicial da secagem, as peças apresentaram altos valores de umidade na superfície original e no seu interior. A medida que as peças perdem umidade, cria-se um gradiente de umidade no interior da peça. Enquanto a peça perde entre 40 e 80% da massa de água, a diferença entre umidade superficial e a umidade do interior da peça sofre pouca influência do método de

secagem. Porém, quando a perda de umidade atinge 20% da massa inicial de água, o método de secagem afeta o gradiente de umidade e as peças secas em estufa apresentam variação mais intensa da umidade da peça na sua superfície até o seu interior.

7 REFERÊNCIAS

- AMARAL, E. A. **Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGO, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribae* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 461–466, 2013.
- BALDIN, T.; MARCHIORI, J. N. C.; dos SANTOS, G. A.; GALLO, R.; Santos, O.; VALENTE, B. M. R. T.; HEIN, P. R. G. Evaluation of alternative sample preparation methods for development of NIR models to assess chemical properties of wood. **BioResources**, v. 13, n. 3, p. 5394–5407, 2018.
- BRAGA, J. W. B.; DE OLIVEIRA, M. L. Equipamentos Portáteis de Espectrometria no Infravermelho Próximo. Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Avaliar Indicadores de Qualidade Tecnológica e Contaminantes em Grãos. **Embrapa Trigo-Livro científico (ALICE)**, Capítulo 9, p. 159-176, 2018.
- BURNS, D. A.; CIURCZAK, E.W. **Handbook of near-infrared analysis**. Boca Raton: CRC, 2008. 808p.
- CALONEGO, F. W.; BATISTA, W. R.; SEVERO; E. T. D.; dos SANTOS, J. E. G.; RIBAS, C. Avaliação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* por medidores elétricos resistivos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, n. único, p. 71–78, 2006.
- CARRASCO, E. V. M. Secagem do Eucalipto Grandis, uma avaliação experimental. In: **VI encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, Florianópolis-SC, v.3 p. 160–172, 1998.
- CHIMLECK, L. R.; DORAN, J. C.; RIMBAWANTO, A. Near infrared spectroscopy for cost - effective screening of foliar oil characteristics in a *Melaleuca cajuputi* breeding population. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 9, p. 2433–2437, 2003.
- COSTA, E. V. S.; ROCHA, M. F. V.; HEIN, P. R. G.; AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M.; BRANDÃO, L. E. V. S.; TRUGILHO, P. F. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, p. 106–116, 2018.
- COZZOLINO, D. Espectroscopia no infravermelho próximo na análise de produtos naturais. **Planta medica**, v. 75, n. 07, p. 746–756, 2009.

DIAS, J. M. S.; OLIVEIRA FILHO, F. M.; DE ARAÚJO, A. Y. F.; CÉSAR, S. F.; CUNHA, R. D. A. Avaliação comparativa entre métodos de aferição do teor de umidade em peças de madeira de dimensões reduzidas. **Impactos das Tecnologias nas Engenharias**, v. 3, cap. 16, p. 171–179, 2019.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L.; OLIVEIRA, A. C.; BARBOSA, C. J. Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 449–453, 2014.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; TEIXEIRA, R. U. Teor de umidade da madeira em tora. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 703–712, 2015.

DOS SANTOS, L. M.; AMARAL, E. A.; NIERI, E. M.; COSTA, E. V. S.; TRUGILHO, P. F.; CALEGÁRIO, N.; HEIN, P. R. G. Estimating wood moisture by near infrared spectroscopy: Testing acquisition methods and wood surfaces qualities. **Wood Material Science & Engineering**, DOI: 10.1080/17480272.2020.1768143, 2020.

ENGELUND, E. T.; THYGESEN, L. G.; SVENSSON, S. et al. Uma discussão crítica da física das interações madeira-água. **Wood Science Technology**, v. 47, n. 1, p. 141–161 2013.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, F. R.; GOMES, F. J. B.; AMARAL, C. A. S. Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia nir. **O Papel**, v. 78, n.2, p. 75–81, 2017.

FUJIMOTO, T.; NUMA, T.; KOBORI, H.; TSUCHIKAWA, S. Visualisation of spatial distribution of moisture content and basic density using near-infrared hyperspectral imaging method in sugi (*Cryptomeria japonica*). **International Wood Products Journal**, v. 6, n. 2, p. 46–48, 2015.

FIORESI, T.; PIROCA, S.; DALLA C. H. W.; TREVISAN, R. OLIVEIRA F. F.; GATTO, D. A. Umidade de equilíbrio da madeira na região Norte do Rio Grande do Sul em diferentes estações do ano. **Ciência da Madeira**, v. 5, n. 1, p. 34–41, 2014.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. **Secagem racional da madeira**. 1985. 112p. São Paulo: Nobel, 1985.

GONÇALEZ, J. C.; BRENDA, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Revista Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329–341, 2006.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung** v. 64, p.45–54, 2010.

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.

HELL, J.; PRÜCKLER, M.; DANNER, L.; HENNIGES, U.; APPRICH, S.; ROSENAU, T.; BÖHMDORFER, S. A comparison between near-infrared (NIR) and mid-infrared (ATR-FTIR) spectroscopy for the multivariate determination of compositional properties in wheat bran samples. **Food Control**, v. 60, n. C, p. 365–369, 2016.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT/IUFRO/LCF/ESALQ/USP, 1995. p. 109-118, 1995.

KLOCK, U. MUNIZ, G.I.B.; ANDRADE, A S.; ANZALDO, J. H. Química da Madeira. 3ª. Ed. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná - Fupef, 2005. 86p. (Série didática).

KOBORI, H.; GORRETTA, N.; RABATEL, G.; BELLON-MAUREL, V.; CHAIX, G.; ROGER, J. M.; and TSUCHIKAWA, S. "Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC)." **Holzforschung**, v. 67, n. 3, p. 307–314, 2013.

LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R. R; MAGALHÃES, W.; AGUIAR, A. V. Espectroscopia no próximo infravermelho para estimativa da densidade básica de *pinus*. **Ciência da Madeira**, v. 7, n.3, p. 119–126, 2016.

LEBLON, B.; ADEDIPE, O.; HANS, G.; HADDADI, A.; TSUCHIKAWA, S.; BURGER, J.; STIRLING, R.; PIROUZ, Z.; GROVES, K.; NADER, J.; LAROCQUE, A. Uma revisão da espectroscopia no infravermelho próximo para monitorar o teor de umidade e a densidade da madeira maciça. **The Forestry Chronicle**, v. 89, n. 5, 595–606, 2013.

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

MARTENS, H. E.; TORMOD, N. **Multivariate calibration**. New York: J. Wiley, 1989.

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.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. D.; TRUGILHO, P. F.; ANDRADE, H. B. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 115, p. 493–505, 2017.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; REZENDE, R. N.; KLITZKE, R. J. Water flow in different directions in *Corymbia citriodora* wood. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 3, p. 385–394, 2020.

MORAES NETO, S. P. **Madeira de Eucalipto para Serraria**. Embrapa Cerrados- Documentos (INFOTECA-E). 55p. 2017.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. Manual Didático. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 168p. 2005.

NASCIMENTO, C. C.; BRASIL, M. M.; NASCIMENTO, C. S.; BARROS, S. V. S. Estimativa da densidade básica da madeira de *eschweilera* (Poepp.) Miers por espectroscopia no infravermelho próximo. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 42–53, 2017.

NUNES, C. A.; FREITAS, M. P.; PINHEIRO, A. C. M.; BASTOS, S. C. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 11, p. 2003–2010, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Árvore**, v. 29, n. 1, p. 115–127, 2005.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: a mature analytical technique winew perspective – A review. **Analytica Chimica Acta**. v. 5, n. 1026, p. 8–36, 2018.

REDMAN, A. L.; BAILLERES, H.; PERRÉ, P.; CARR, E.; TURNER, I. A relevant and robust vacuum-drying model applied to hardwoods. **Wood Science and Technology**, v. 51, n. 4, p. 701–719, 2017.

RODRIGUES, W.; SALES, A. Medidas elétricas para determinação do teor de umidade da madeira. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 3, n. 8, 2014.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 5, p. 287–308, 2011.

SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 109–124, 2000.

SIAU, J. F. Flow in wood. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131p.

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

SOUZA, J. T.; TREVISAN, R.; DENARDI, L.; STANGERLIN, D. M.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Qualidade da Madeira serrada proveniente de árvores dominantes e médias de *Eucalyptus grandis* submetidas à secagem. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 167–174, 2012.

STEFANSSON, P.; THUIS, T.; GOBAKKEN, L. R.; BURUD, I. Hyperspectral NIR time series imaging used as a new method for estimating the moisture content dynamics of thermally modified Scots pine. **Wood Material Science & Engineering**, v. 16, n. 1, p. 49–57, 2020.

TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. **Espectroscopia no infravermelho próximo para avaliar indicadores de qualidade tecnológica e contaminantes em grãos**. Casiane Salete Tibola... [et al.], editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 200 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 719 p. 2004.

THAM, V. T. H.; INAGAKI, T.; TSUCHIKAWA, S. Uma nova abordagem baseada em uma combinação de capacitância e espectroscopia no infravermelho próximo para estimar o teor de umidade da madeira. **Wood Science Technology**, v. 53, p. 579–599, 2019.

VIANA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. M.; LIMA, J. T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades químicas e da densidade da madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 367–376, 2010.

WILLIAMS, P. C.; SOBERING, D. C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 1, n. 1, p. 25–33, 1993.

YUAN, H.; TANG, S.; LUO, Q. et al. Espectroscopia de micro-FTIR e regressão parcial de mínimos quadrados para determinação rápida do teor de umidade da madeira tratada termicamente em escala de nanogramas. **J Wood Science**, v. 66, n. 1, 2020.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, B. D. S. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; COLODETTE, J. L. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* wood. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 723–729, 2016.

ZANUNCIO, A. J. V.; HEIN, P. R. G.; CARVALHO, A. G.; ROCHA, M. F. V.; CARNEIRO, A. C. O. Determination of heat-treated eucalyptus and pinus wood properties using NIR spectroscopy. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 117–125, 2018.

ZEN, L. R.; NASCIMENTO, T. M.; SANTOS, J. H., KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; MONTEIRO, T. C. Drying methods to evaluate the quality of *Eucalyptus* sawn timber. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 14, n. 2, p. 22–30, 2020.

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.