

MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

Sâmara Magdalene Vieira Nunes

**Espectroscopia no infravermelho próximo na avaliação da qualidade de cavacos
destinados à produção de energia**

Montes Claros

2022

Sâmara Magdalene Vieira Nunes

**Espectroscopia no infravermelho próximo na avaliação da qualidade de cavacos
destinados à produção de energia**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador(a): Talita Baldin

Montes Claros

Julho de 2022

Nunes, Sâmara Magdalene Vieira.

N972e
2022

Espectroscopia no infravermelho próximo na avaliação da qualidade de cavacos destinados à produção de energia [manuscrito] / Sâmara Magdalene Vieira Nunes. Montes Claros, 2022.

78 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Talita Baldin.

Banca examinadora: Edy Eime Pereira Baraúna, Paulo Ricardo Gherardi Hein, Talita Baldin.

Inclui referências: f. 19-20; 36-46; 76-77.

I. Madeira - Qualidade - Teses. 2. Umidade - Teses. 6. Calorimetria - Teses. I. Baldin, Talita. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 29 dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois, às 14:00 horas, sob a Presidência da Professora Talita Baldin, D. Sc. (Orientadora - UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Edy Eime Pereira Baraúna, D. Sc. (UFMG/ICA) e Paulo Ricardo Gherardi Hein, D. Sc. (UFLA), reuniu-se, presencialmente, a Banca de Defesa de Dissertação de **SÂMARA MAGDALENE VIEIRA NUNES**, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: "Espectroscopia no infravermelho próximo na avaliação da qualidade de cavacos destinados à produção de energia", sendo a aluna considerada (aprovada/reprovada) Aprovada. E, para constar, eu, Professora Talita Baldin, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir.

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 29 de julho de 2022.



Edy Eime Pereira Baraúna
Membro

Prof. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Ciência e Tecnologia da Madeira / DCF
Universidade Federal de Lavras


Paulo Ricardo Gherardi Hein
Membro



Talita Baldin
Orientadora

Dedico esta dissertação aos meus avós
Alceno, Generina, Terezinha (*in memoriam*) e
Zezé, com todo amor do mundo e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder forças e sabedoria para enfrentar todos os obstáculos encontrados durante a minha trajetória.

Aos meus pais, André e Sandra, que sempre me incentivaram a estudar e me forneceram a melhor educação, com muito amor e carinho, sempre me apoiando e auxiliando no que estava ao seu alcance para realizar os meus sonhos.

Ao meu irmão, meus avós, amigos e todos os familiares que me apoiaram e ajudaram ao longo não só da minha carreira acadêmica, como durante toda a vida.

À professora Talita pelos conselhos, por sempre me orientar com muita paciência e dedicação, acreditar no meu trabalho e na minha capacidade de aprender a cada desafio proposto.

Ao professor Edy, Fernando Collen e todos os professores e servidores que compartilharam ensinamentos que levarei comigo por toda a vida.

Ao Taldo Loiolinha, pela compreensão e apoio em todos os momentos. Ao Gabriel pelos momentos de descontração e parceria.

A todos os membros do Grupo de Estudos em Tecnologia da madeira (GETEM) que apoiaram e auxiliaram na execução deste trabalho, me proporcionaram a oportunidade de adquirir conhecimentos que vão além da esfera técnica.

Aos membros do laboratório de biotecnologia, pela disponibilização do espectrômetro para as análises.

À Empresa Nova Esperança, que cedeu o material das análises e confiou no nosso trabalho.

Agradeço a CAPES, pela disponibilização da bolsa que possibilitou a minha permanência no programa de pós-graduação.

ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE CAVACOS DESTINADOS À PRODUÇÃO DE ENERGIA

RESUMO

Para que as empresas produtoras de biomassa florestal entreguem produtos que atendam às demandas do mercado, é necessário que realizem avaliações precisas dos seus materiais. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica que se apresenta com potencial viabilidade para aplicação na caracterização de materiais lignocelulósicos, visto que entrega resultados rápidos e precisos. Diante disso, objetivou-se neste trabalho aplicar a espectroscopia no infravermelho próximo para avaliar a qualidade de cavacos utilizados para a geração de energia por meio da técnica de NIR. Avaliaram-se as características de densidade básica, umidade e poder calorífico superior dos cavacos. Para isso, foram coletados dois lotes com 100 amostras de cavacos, em dias diferentes, no pátio da empresa fornecedora, os quais foram utilizados nas análises laboratoriais de rotina e na obtenção dos espectros no NIR. Assim, os dados espectrais foram correlacionados com os valores obtidos por meio de análises convencionais para geração de modelos preditivos. Após a criação dos modelos, eles foram aplicados na predição de características de novos lotes de cavacos. Os modelos foram avaliados por meio de Coeficiente de determinação (R^2), Raiz quadrada do erro médio da validação cruzada e Raiz quadrada do erro médio da calibração, Número de variáveis latentes (Rank) e o Bias da validação. A validação dos modelos apresentou estatísticas satisfatórias para a densidade básica ($R^2=0,83$), umidade ($R^2=0,90$) e poder calorífico superior ($R^2=0,74$), possuindo potencial para aplicação em avaliação de madeira na indústria energética. Os resultados estatísticos dos modelos matemáticos foram satisfatórios para os propósitos do trabalho e podem ser utilizados para análises de cavacos de novos lotes.

Palavras-chave: Qualidade da madeira. Avaliação não destrutiva. NIR. Densidade básica. Umidade. Poder calorífico.

DISSERTATION TITLE

ABSTRACT

So that companies producing forest biomass to deliver products that meet market demands, it is necessary that they carry out accurate assessments of their materials. Near infrared spectroscopy (NIR) is a technique that presents itself with potential feasibility for application in the characterization of lignocellulosic materials, as it delivers fast and accurate results. Faced with this, the objective of this work was to apply near infrared spectroscopy to evaluate the quality of chips used for energy generation using the NIR technique. They were evaluated the characteristics of basic density, moisture and higher calorific value of the chips. For this, two batches with 100 chip samples were collected, on different days, in the supplier company's yard, which were used in routine laboratory analyzes and in obtaining the spectra in the NIR. Thus, the spectral data were correlated with the values obtained through conventional analyzes to generate predictive models. After creating the models, they were applied to predict the characteristics of new batches of chips. The models were evaluated through Coefficient of determination (R^2), Root square of the mean cross-validation error and Square root of the mean calibration error, Number of latent variables (Rank) and Bias of validation. The validation of the models presented satisfactory statistics for the basic density ($R^2=0.83$), moisture ($R^2=0.90$) and superior calorific value ($R^2=0.74$), having potential for application in wood evaluation in the energy industry. The statistical results of the mathematical models were satisfactory for the purposes of the work and can be used for chip analysis from new batches.

Keywords: Wood quality. Non-destructive evaluation. NIR Basic density. Moisture. calorific power.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 . Objetivos Específicos	18
3. Referências	19
4. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA	21
4.1 Parâmetros de avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos	21
4.1.1 Densidade básica	21
4.1.2 Umidade	23
4.1.3 Poder calorífico	25
4.2 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	27
4.3 Calibração dos modelos	31
4.4 Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada a previsão a densidade básica, teor de umidade e poder calorífico da madeira	33
4.5 Referências	36
5. CAPÍTULO II: CALIBRAÇÃO DE MODELOS COM NIR PARA AVALIAÇÃO DE DENSIDADE BÁSICA, UMIDADE E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE CAVACOS	47
5.1 Introdução	47
5.2 Material e métodos	49
5.2.1 Material genético e procedimento de coleta dos cavacos.....	50
5.2.2 Preparação dos cavacos para as análises	50
5.2.3 Determinação da Densidade Básica.....	51
5.2.4 Determinação da umidade da madeira	51
5.2.5 Determinação do Poder calorífico Superior dos cavacos	52
5.2.6 Coleta dos espectros no infravermelho próximo	52
5.2.7 Calibração do modelo	53
5.2.8 Seleção das calibrações	53
5.3 Resultados	54
5.3.1 Valores médios obtidos nas análises convencionais	54
5.3.2 Calibração e validação dos modelos	55
5.4 Discussão	61
5.5 Conclusão	65
5.6 Referências	65
6. CAPÍTULO III: Predição da densidade básica, umidade e poder calorífico superior de cavacos para produção de energia com espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	68

6.1	Introdução	68
6.2	Material e métodos	69
6.2.1	Material genético e procedimento de coleta dos cavacos.....	69
6.2.2	Modelos utilizados para predição.....	69
6.2.3	Coleta dos espectros das amostras	69
6.2.4	Análise dos resultados	70
6.3	Resultados	70
6.4	Discussão	72
6.5	Conclusão	74
6.6	Referências	75
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial, o Brasil apresenta grande vantagem competitiva no crescimento de florestas, devido, primordialmente, às suas condições edafoclimáticas. Devido ao clima, ao solo e também ao desenvolvimento da biotecnologia, em 2019, o país conseguiu atingir a marca de nove milhões de hectares de florestas plantadas (IBÁ, 2020).

Esses valores refletem as diversas possibilidades de utilização da madeira, principal material consumido da floresta. De sua produção é possível retirar matéria-prima para diversos fins, como para indústria de biomassa energética, carvão vegetal, celulose e papel, para construção civil e fabricação de móveis.

Existem diversos estímulos para utilização da madeira na geração de energia, visto que ela faz parte do grupo de fontes energéticas renováveis, as quais, segundo Silva *et al.* (2009), são aquelas que resultam dos ciclos naturais da conversão da radiação solar – a fonte primária de quase toda energia disponível no planeta. Quando destinada para produção de energia, a madeira pode ser representada por cavacos, que consistem em fragmentos de toras ou restos de madeiras, que posteriormente são armazenados ou levados diretamente ao processo de produção de energia em caldeiras. (DINIZ, 2014).

Em um contexto de vendas no mercado nacional e internacional, o setor de produção de biomassa deve ofertar produtos com características que permitem sua aplicação para atingir o objetivo final e com preços competitivos. Nesse sentido, são necessárias avaliações que comprovem que o produto possui os parâmetros de qualidade ideais para o mercado.

Pesquisas desenvolvidas sobre a biomassa vegetal têm utilizado a análise do poder calorífico para representar seu potencial energético. Assim, esse parâmetro torna-se de suma importância na avaliação da biomassa para tais finalidades (ROSA, 2016). Já a densidade básica reflete fundamentalmente a produção da biomassa seca de cada indivíduo (TRUGILHO *et al.*, 2010), sendo expressa em massa por volume e, por isso, tende a atuar na velocidade de queima durante a produção de energia (ELOY *et al.*, 2014). A aferição da umidade também é importante para o aproveitamento energético da biomassa, pois a água ocasiona a redução do poder calorífico, uma vez que parte do calor gerado é consumida para sua evaporação (SANTOS *et al.*, 2013).

A espectroscopia no infravermelho próximo (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) é uma técnica rápida e com resultados acurados para avaliação de materiais, aplicável em

um grande número de amostras e pode ser utilizada em qualquer substância cujas moléculas contenham, principalmente, ligações C-H, O-H, N-H, S-H ou C=O (MARTINS; SARGENTELLI, 2021). Além disso, essa tecnologia pode ser aplicada para caracterização não destrutiva, sendo capaz de prever características químicas (LENGOWSKI *et al.*, 2018; HANS; ALISSON, 2021), mecânicas (SHUKLA; SHARMA, 2021), físicas (LAZAROTTO; MAGALHÃES, 2014; ROSSO *et al.*, 2013; LIANG *et al.*, 2019; AMARAL *et al.*, 2020; TOSCANO *et al.*, 2022) e anatômicas da madeira (NISGOSKI *et al.*, 2015; HEIN *et al.*, 2012).

A análise de dados espectrais e o desenvolvimento de modelos preditivos baseados em espectros são possíveis com o uso de técnicas de análise univariada e/ou multivariada de dados. Desse modo, informações obtidas no espectrômetro são correlacionadas com informações das propriedades da madeira determinadas por métodos convencionais e modelos são gerados (HEIN, 2008). A partir dos modelos calibrados, podem-se prever propriedades de interesse para novas amostras, com base nos dados registrados no instrumento de medida.

Apesar de já ser amplamente aplicada no setor florestal, observa-se uma ausência de trabalhos envolvendo a calibração de modelos de cavacos com umidade em condições encontradas em campo e caracterização do poder calorífico superior. Faz-se necessária, então, a realização de trabalhos que tragam resultados de modelos calibrados para tais condições, que facilitem sua aplicação diária nas unidades produtivas de madeira.

Nesse sentido, buscaram-se alternativas para a caracterização da madeira de maneira rápida, simples, confiável e não destrutiva. Com o uso da técnica NIR, pode-se obter informações sobre a qualidade da madeira para produção de energia, por meio de ensaios indiretos, reduzindo o custo e o tempo despendido nas análises laboratoriais de rotina.

Baseando-se no conhecimento científico acumulado sobre a utilização do NIRS para análises de materiais lenhosos, formulou-se as seguintes hipóteses para este trabalho:

- H0: Os modelos gerados utilizando-se a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) não são estatisticamente confiáveis na predição de densidade, umidade e poder calorífico da madeira para produção de energia.
- H1: Os modelos gerados utilizando a técnica espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) são estatisticamente confiáveis para prever densidade, umidade

e poder calorífico superior da madeira para produção de energia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade de cavacos utilizados para a geração de energia, por meio da técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).

2.2 . Objetivos Específicos

- Determinar a densidade básica, a umidade e o poder calorífico superior de cavacos em condições de laboratório;
- Calibrar modelos preditivos, utilizando-se a técnica NIR para os parâmetros de umidade, densidade básica e poder calorífico superior;
- Avaliar o desempenho do modelo em lotes independentes de cavacos e a adequação das características dos cavacos para a indústria energética.

O presente trabalho foi organizado em três capítulos:

- **Capítulo I:** Revisão de literatura
- **Capítulo II:** Calibração de modelos com NIR para avaliação de densidade básica, umidade e poder calorífico superior de cavacos
- **Capítulo III:** Predição da densidade básica, umidade e poder calorífico superior de cavacos para produção de energia com espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

3. REFERÊNCIAS

AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M.; COSTA, E. V.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000304>

DINIZ, I.S. **Estudo da influência da umidade no consumo específico do cavaco de madeira para geração de vapor saturado em caldeira de biomassa**. 36 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ELOY, Elder et al. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista. Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 551-559, June 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300018>.

HANS, Guillaume; ALLISON, Bruce. On-line characterization of wood chip brightness and chemical composition by means of visible and near-infrared spectroscopy. **Holzforschung**, v. 75, n. 11, p. 989-1000, 7 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2021-0027>.

HEIN, P. R. G. **Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 88 f, 2008.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T. TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. **Floresta e ambiente**. v.19, n. 2, pp. 194-199. abr./jun. 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.023>.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2020**. IBÁ: Brasília, 2020.

LAZAROTTO, M.; MAGALHÃES, W. L. E.; Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição não destrutiva de densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2014. 6 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 334).

LENGOWSKI, E. C.; MUÑIZ, G. I. B. de; KLOCK, U.; NISGOSKI, S. Potential use of nir and visible spectroscopy to analyze chemical properties of thermally treated wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v.20, n.4, p. 1-20, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2018005041001>.

LIANG, L.; FANG, G.; DENG, Y.; XIONG, Z.; WU, T. Determination of Moisture Content and Basic Density of Poplar Wood Chips under Various Moisture Conditions by Near-Infrared Spectroscopy. **Forest Science**, v. 65, n. 5, p. 548-555, 20 maio 2019. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz007>.

MARTINS, J. A.; SARGENTELLI, V. INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA AVALIAÇÃO QUANTITATIVA FOLIAR. **Revista Prospectus**, v. 3, n. 1, p. 33-55, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.5813215>.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.I.B.; MORRONE, S.R.; SCHARDOSIN, F.Z.; FRANÇA, R.F.. NIR and anatomy of wood and charcoal from Moraceae and Euphorbiaceae species. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, v. 6, n. 3, p. 183-190, 26 dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p183-190>.

ROSA, T. S.t B. S. **Potencial energético da eichhornia crassipes (aguapé) e da Pistia stratiotes (alface d'água)**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016. Disponível em: < <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/188> >.

ROSSO, S., MUNIZ, G. I. B., MATOS, J. L. M., HASELEIN, C. R., HEIN, P. R. G., & LOPES, M. C. (2013). Density of Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, v.19, n.4,p. 647-652. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000400015>.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria, Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais**. Viçosa, MG, 2013.

SHUKLA, S. R.; SHARMA, S. K.. Estimation of density, moisture content and strength properties of Tectona grandis wood using Near Infrared Spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, [S.L.], v. 23, n. 18, p. 1-12, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100418>.

SILVA, L. L, et al. Princípios de termoelétricas em pequenas propriedades rurais. In: 2º **International workshop advances in cleaner production**. São Paulo, 2009.

TOSCANO, G.; LEONI, E.; GASPERINI, T.; PICCHI, G. Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. **Fuel**, v. 320, p. 123948, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123948>.

TRUGILHO, P. F. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de Eucalyptus urophylla e Eucalyptus grandis. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 33-40, 2010.

4. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Parâmetros de avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos

A qualidade da madeira é o resultado da combinação de suas propriedades que sofrem variações conforme a espécie, a idade e também das composições física, anatômica e química (LIEBL, 2016). Gallio *et al.* (2016) apontou que a utilização da madeira está estritamente relacionada com o conhecimento das propriedades tecnológicas que influenciam diretamente na qualidade do material e são necessários estudos para sua caracterização e obtenção do conhecimento de seu destino, devido às diferentes necessidades de cada produto. Diante das variações existentes nos atributos da madeira, faz-se necessária a avaliação de suas características para determinar sua aplicação (TRUGILHO *et al.*, 2007). Os principais parâmetros para avaliação da qualidade da madeira são os tecnológicos – químicos, físicos, mecânicos e anatômicos – e não tecnológicos – espécie, procedência, idade, ritmo de crescimento, forma e conicidade (BARRICHELO, 1992).

Dentre as principais características utilizadas para qualificar energeticamente um material, estão a densidade básica, a umidade e o poder calorífico superior (PCS). Mediante a disposição de recursos, pode-se realizar a análise imediata (teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) e determinar o teor de lignina, holocelulose e extrativos (FURTADO *et al.*, 2012).

5.1.1 Densidade básica

Dentre os parâmetros que caracterizam a qualidade da madeira para a indústria energética, a densidade básica é um fator que tem se destacado em estudos sobre a madeira (RODRIGUES *et al.*, 2008), principalmente pela relação com outras propriedades físicas, mecânicas e energéticas do xilema secundário (DIAS *et al.*, 2018) e pela facilidade de determinação em condição de laboratório e de campo (BATISTA *et al.*, 2010). Entretanto, o pesquisador não deve considerá-la como único fator de variação no material, já que a idade, as condições climáticas e edáficas, entre outros fatores, também são fontes de variações (TRUGUILHO *et al.*, 1990).

A densidade básica da madeira é o resultado da relação entre a sua massa seca e o volume verde, geralmente expresso em kg/m^3 ou g/cm^3 . É um parâmetro que possui variações entre espécies e no tronco de um mesmo indivíduo arbóreo, no sentido longitudinal e radial, entre cerne e alburno, entre madeira juvenil e adulta, entre lenho inicial e final e dentro do mesmo anel de crescimento (PÁDUA, 2009). Além disso,

também pode ser afetada por variações externas de microclima, solo, precipitação, adubação e idade da árvore (HSING, 2016). De acordo com Oliveira; Silva (2003), as diferenças encontradas na densidade são provocadas pelas mudanças no tamanho dos vasos e da espessura da parede celular das fibras. Os valores elevados desse parâmetro podem resultar do aumento da espessura da parede celular das fibras ou do aumento da proporção das fibras em relação aos vasos. Já sua redução pode ser ocasionada pela situação contrária: o aumento da proporção dos vasos, com ou sem acréscimo na espessura da parede celular.

Carneiro *et al.* (2014) afirmam que a densidade básica é uma característica fortemente correlacionada com a produção energética, pois quanto maior seu valor, também maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico. Diante disso, ela tem sido intensamente utilizada nos trabalhos de avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos.

Barreiros *et al.* (2021) analisaram três clones de eucalipto quanto à aptidão para fins energéticos, por meio de densidade básica, composição química e poder calorífico da madeira. Semelhantemente, Oliveira *et al.* (2019), na determinação das propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira de *Dalbergia cearenses*, utilizaram a densidade básica como parâmetro de avaliação.

Tonini *et al.* (2018) aplicaram a avaliação da densidade básica, como fator determinante em seu trabalho, para avaliar o efeito do espaçamento no crescimento, alocação de biomassa e qualidade da madeira para fins energéticos de *Acacia mangium*. Também Ferreira *et al.* (2017), objetivando estudar a biomassa e a energia de um experimento de plantio clonal de curta rotação com híbridos de *Eucalyptus urophylla* ST Blake x *Eucalyptus grandis* (Monte) Maiden implantados no espaçamento 3 m x 3 m, na Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias – Macaíba/RN, consideraram a densidade básica como quesito avaliador. Já Silva *et al.* (2015) a utilizaram como característica para determinar o potencial energético da madeira de *Eucalyptus benthamii*, encontrando valores médios de 0,471g/cm³ para cavacos.

Cabe destacar que, além da densidade, fatores como o potencial da produção de biomassa do indivíduo (característica específica da árvore, clone, espécie ou gênero), o seu poder calorífico e o teor de umidade (quantidade de água presente na madeira, expressa em percentual da massa total) também devem ser avaliados na madeira para fins energéticos (LIMA; ABDALA; WEZEL, 2008).

5.1.2 Umidade

A madeira se caracteriza por ser um material higroscópico, podendo absorver água na forma líquida ou adsorver vapor da atmosfera circundante (DIAS-JÚNIOR *et al.*, 2016). A quantidade de água presente na madeira também possui variações, por exemplo, entre árvores da mesma espécie, o cerne e alburno de um tronco, discos retirados em diferentes posições, de acordo com estação do ano e em madeiras com diferentes densidades (SKAAR, 1988; LOPES; GARCIA, 2002).

Segundo Ulker (2016), existem três tipos de água na madeira: a água de capilaridade (água livre), que está localizada nos espaços intercelulares – como vasos, meatos, canais e lúmen das células – e pode ser facilmente retirada; a água de adesão ou higroscópica, que possui ligação com as fibras da madeira e para sua retirada é necessária a utilização de energia, na forma de calor, para forçar seu movimento no interior da madeira; e a água de constituição química, que faz parte dos grupamentos hidroxílicos (OH⁻) das moléculas de celulose, hemiceluloses e também interliga esses dois tipos de polissacarídeos à lignina na formação da parede celular, e sua retirada ocorre durante o processo de carbonização ou pirólise da madeira, em que, ao final, não existe mais a madeira, mas sim um subproduto derivado da mesma.

Quando toda água denominada como livre ou de capilaridade é removida da madeira, permanecendo apenas a água de adesão e química, significa que esta atingiu seu ponto de saturação das fibras (PSF), o qual geralmente se encontra na faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie. O PSF é um fator importante a se considerar, pois é a partir desse ponto que ocorrem as alterações na estrutura da madeira, tais como: contrações que podem causar defeitos, empenos e rachaduras e, conseqüentemente, alterações na resistência física e mecânica da madeira (JANKOWSKA; KOZAKIEWICZ, 2016).

A variação da umidade pode ser de ≈ 30 a 300% na madeira das árvores vivas, podendo variar conforme a espécie, a posição do tronco ou o pedaço de madeira e a estação. Se a madeira, em condição saturada, é exposta a atmosfera, há a redução gradativa do teor de umidade, inicialmente pela água presente em suas cavidades. Assim, com o passar do tempo, pode-se chegar a níveis entre 6 a 15% ou menos, a depender as condições de temperatura e umidade relativa da região (ENGELAND *et al.*, 2013).

De acordo com Quirino *et al.* (2005), a alta umidade da madeira resulta na perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade se

evapora e absorve energia em combustão. Assim, o dispêndio de energia para a eliminação da água da madeira pode ser superior à sua capacidade de geração e a ignição pode ser impedida.

Nesse caso, deve-se observar o calor específico da água, o qual representa a quantidade de calor necessário para elevar um grama de água em um grau Celsius (SILVA, 2015). Sua unidade de medida é J/Kg ou cal/g. A água possui calor específico de 1,0 (cal/g.°C), que é considerado um valor elevado. Isso faz com que ela possa tanto ceder como absorver muita quantidade de calor, sem que haja alteração no seu estado físico (GONÇALVES, 2015).

Outro fator importante de se mencionar é a quantidade de calor necessário para que uma substância entre em ebulição, mudando do estado líquido para gasoso, propriedade denominada de calor latente. O calor latente de vaporização da água é 539,6 cal/g, que também é considerado elevado. Na água, isso é ocasionado devido a sua estrutura molecular ser muito coesa e com a presença de ligação de hidrogênio. Para que haja mudança de estado, essas pontes de hidrogênio precisam ser rompidas e esse processo tem um alto custo energético (TIPLER; MOSCA, 2009).

A umidade é um parâmetro inversamente proporcional à densidade básica da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água na madeira, menor é a quantidade de outros elementos químicos, como celulose, hemicelulose e lignina (FOELKEI *et al.*, 1971). Quando se trata de madeira para produção de energia, a umidade pode diminuir o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirar a água na forma de vapor (ROUSSET *et al.*, 2011), o que reduz o poder calorífico do material lenhoso.

Lima; Abdala; Wenzel (2008) estudaram a influência da umidade no poder calorífico superior da madeira, utilizando serragem de *Eucalyptus benthamii* de sete anos de idade. Eles observaram que, para cada unidade de umidade aumentada em suas amostras, foram reduzidos 0,1858 kJ/kg no poder calorífico da madeira. Os autores ainda explicam que tais resultados evidenciam a importância da secagem da madeira para o melhor aproveitamento da energia, a qual, em muitos casos, é negligenciada, ocasionando a baixa eficiência energética.

5.1.3 Poder calorífico

Para aplicação da madeira na geração de energia (calor), é necessária a realização do processo de combustão, que acontece mediante diversas reações físicas e químicas. Durante esse processo, o material se transforma em calor, químicos e gases (BRITO, 1979). Segundo Santos *et al.* (2011), o poder calorífico expressa a quantidade de energia despreendida após a combustão completa desse material.

Esse processo de combustão pode ser resumido em três fases. Na primeira, há o aquecimento da madeira para a evaporação e eliminação da água. A segunda fase de combustão acontece quando a madeira começa a ser quimicamente degradada e materiais voláteis começam a ser vaporizados. Já o terceiro estágio de combustão é o da queima do carvão que permanece após a liberação dos gases voláteis. Finalmente, uma pequena quantidade de cinza permanece após a queima do carvão (BRITO, 1979).

Segundo Vieira (2012), o poder calorífico pode ser dividido em superior e inferior. O Poder Calorífico Superior (PCS) representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida a partir da transferência de calor do combustível com água resultante do processo de combustão no estado líquido, podendo ser determinado através de bomba calorimétrica ou a partir da fração mássica dos componentes da biomassa. O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado durante a combustão com a água no estado vapor e pode ser obtido a partir do PCS, levando-se em consideração o teor de umidade presente no combustível. Para Campos (2009), a diferença entre o poder calorífico superior e o inferior é a energia necessária para evaporar a umidade presente no combustível e a água formada a partir da oxidação do hidrogênio.

Os componentes químicos da madeira – como celulose, hemicelulose e lignina presentes na formação da parede celular – e os extrativos estão fortemente relacionados com essa propriedade (SANTOS *et al.*, 2016). Sendo assim, o calor gerado durante a combustão de diferentes espécies florestais ou resíduos madeireiros pode variar, dependendo de suas propriedades físicas, químicas e anatômicas (ALMEIDA, 2010).

Em termos de qualidade de biomassa para produção de energia, quanto mais alto o poder calorífico, maior é a energia contida no material (HABITZREITER *et al.*, 2019). De acordo com Quirino *et al.* (2004), o poder calorífico se eleva quanto maior o teor de lignina e extrativos na madeira. Além disso, conforme Silva *et al.* (2005), o teor de lignina tende a aumentar com a idade da árvore e o contrário ocorre com a holocelulose. Assim, como o poder calorífico da lignina é superior ao da holocelulose, os indivíduos mais velhos apresentam maior poder calorífico.

A lignina é um componente estrutural que confere propriedades de rigidez e resistência à madeira e apresenta alto poder calorífico. Quando comparada à holocelulose, ela possui maior número de ligações C-C e C=C presentes em sua estrutura, maior presença de carbono elementar e baixo teor de oxigênio. (PETROFF; DOAT, 1978; PEREIRA *et al.*, 2012). Elevados teores de extrativos também são uma característica vantajosa para a produção de energia, diante do alto poder calorífico desses componentes (BUFALINO *et al.*, 2012; CASTRO *et al.*, 2013). Conforme Medeiros *et al.* (2014), a presença de extrativos na madeira é um ponto importante quando se almeja produzir carvão vegetal, pois eles aumentam a densidade da madeira, favorecendo assim a produção de um carvão mais denso. Diferente da lignina e dos extrativos, os polissacarídeos presentes na holocelulose apresentam estruturas pouco complexas e um número menor de ligação C-C, apresentando menor contribuição na geração de energia (TABELA 1) (SILVA *et al.*, 2014).

Tabela 1- Poder calorífico superior dos diferentes componentes orgânicos da madeira de *Pseudotsuga menziesii*

Compostos	PCS (Kcal/Kg)
Holocelulose (polioses mais celulose)	4.184
Lignina	6.381
Extrativos	8.339

Fonte: TILLMAN, 1978

É possível, ainda, observar a importância do carbono e do oxigênio em um processo de queima de biomassa para geração de energia. Carneiro *et al.* (2014) explicaram que o teor de carbono é importante para o processo de queima da madeira e para a produção de carvão vegetal, pois, na queima direta, ele é totalmente consumido, enquanto no processo de produção do carvão vegetal ele é convertido em carbono fixo, o principal responsável pela energia gerada pelo carvão. O hidrogênio gera mais energia do que o carbono, mesmo estando presente em menores quantidades da madeira. Assim, esse elemento possui grande importância no processo de geração de energia. Entretanto, o oxigênio já contribui negativamente para esse processo. Assim, compostos com maiores teores de oxigênio possuem menos energia armazenada. A presença de alta concentração de oxigênio na madeira faz com que sua queima tenha menor demanda de oxigênio do ar e reduz a quantidade de energia liberada no processo de combustão.

Além do carbono e do hidrogênio, Hilsdorf *et al.* (2004) apontam o enxofre como

outro elemento responsável pela liberação de calor. Entretanto, apesar de ser combustível, sua presença é indesejável, pois sua combustão gera dióxido de enxofre (SO₂), o qual, em condições atmosféricas, oxida-se lentamente a trióxido de enxofre (SO₃), um composto com alta afinidade pela água, e com esse contato forma gradativamente ácido sulfúrico de forte ação corrosiva. Além disso, o SO₂ possui ação irritante no aparelho respiratório humano e animal. Contudo, a madeira se configura como pouco poluente, por apresentar baixos teores de enxofre.

4.2 Espectroscopia no infravermelho próximo

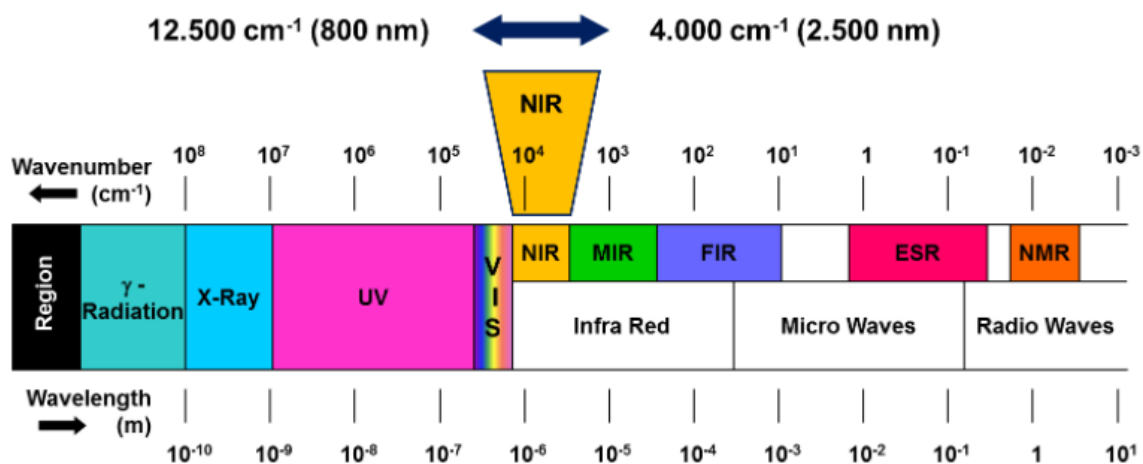
4.2.1 Histórico e princípio de funcionamento

O astrônomo e músico inglês Frederick William Herschel foi quem fez a descoberta da região do infravermelho próximo. Isso aconteceu durante um experimento com o objetivo de medir as temperaturas relacionadas a diferentes cores do prisma. Ele observou que, ao passo em que ele movia o termômetro do violeta para o vermelho, ocorria um aumento de temperatura. Assim, foi possível concluir a existência de temperatura mais elevada em uma região além da região do visível. Mais tarde, essa região foi chamada de infravermelho próximo (CIENFUGOS, 2003).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) baseia-se na emissão de um feixe de luz sobre a amostra, a qual, ao absorvê-lo, terá vibrações das ligações químicas dos seus constituintes, o que ocasiona mudanças nas vibrações moleculares intimamente associadas a diferentes estruturas moleculares (ESTOPA *et al.*, 2017).

Nesse caso, conforme Yu *et al.* (2020), a radiação aplicada corresponde ao intervalo de comprimento de onda entre 800 a 2500 nm e número de ondas de 12.500 a 4.000 cm⁻¹ (Figura 1). As vibrações moleculares são responsáveis pela absorção de energia nessa região e os comprimentos de onda em que acontecem as vibrações são em função de sua estrutura e composição química (PASQUINI, 2003).

Figura 1- NIR no espectro eletromagnético

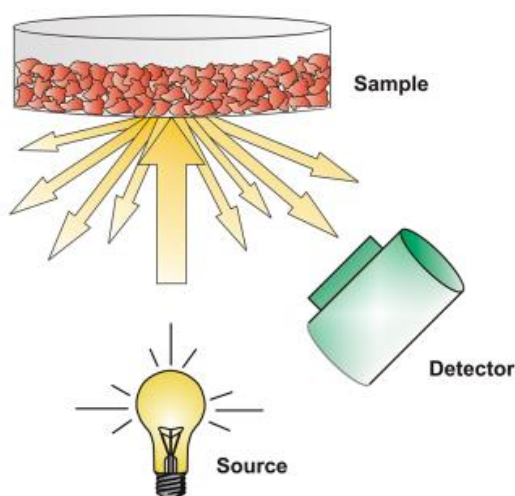


Fonte: Bruker, 2021.

O espectrômetro é o equipamento utilizado para emitir a radiação na faixa do infravermelho próximo sobre a amostra analisada. Após a ocorrência da interação entre a radiação e a matéria, os detectores compilam a intensidade de energia que foi absorvida, refletida ou transmitida, dependendo da configuração do equipamento. Em seguida, é produzido um espectro de absorvância, refletância ou transmitância, sendo que suas informações são correlacionadas com as informações obtidas pelos métodos analíticos convencionais. Em posse desses resultados, é possível calibrar um modelo multivariado para realizar a predição dessas mesmas propriedades em amostras desconhecidas, visto que as curvas espectrais geradas funcionam como uma “impressão digital” dos compostos envolvidos na análise (SEFARA *et al*, 2000).

Um modo de medição muito utilizado é o da reflexão difusa, em que a luz é refletida e direcionada por um feixe largo e paralelo à superfície da amostra, sendo bem distribuída na esfera por meio de reflexos difusos, conforme ilustrado na Figura 2 (BRUKER, 2021).

Figura 2- Representação de um espectrofotômetro NIR com modo reflexão difusa



Fonte: Bruker, 2021.

Esse método é comumente aplicado para avaliação não destrutiva de grande número de amostras, o que faz economizar tempo e reagentes para predições fundamentadas na composição e nas ligações químicas (DIESEL *et al.*, 2014). Entretanto, para que seja aplicado, são necessárias análises laboratoriais para obtenção de valores de referência para a característica estudada, assim possibilitando a geração de um modelo de predição (ESTOPA *et al.*, 2016).

Assim como toda técnica, a aplicação do NIR possui suas vantagens e desvantagens. O investimento em pesquisas que utilizam essa técnica justifica-se por vantagens como: a rapidez na obtenção dos resultados, pois em menos de 1 minuto a leitura pode ser processada em um equipamento calibrado; não há destruição das amostras durante as análises, deixando-as viáveis para posterior utilização; há precisão nos resultados adquiridos; o processo de preparação das amostras analisadas é simples e rápido; existem diversas opções de espectrômetro no mercado que podem ser até portáteis, facilitando seu deslocamento; pode-se obter um resultado de análise de campo em tempo real e durante a realização do processo de determinação não há geração de nenhum resíduo químico capaz de provocar impacto relevante ao meio ambiente (NOVAES, 2021).

Outra vantagem associada ao NIR é que sua baixa absorvidade permite melhor penetração em amostras sólidas e a análise direta de fortes absorventes, como líquidos turvos ou sólidos nos modos de reflectância, transmitância ou transfectância, sem necessidade de realizar tratamento nos espectros (SIMÕES, 2008; LIRA, 2010).

Apontada como uma das desvantagens da técnica, segundo Hein, Lima; Chaix

(2009), é a sensibilidade às variações do ambiente, como temperatura e umidade relativa do ar, sendo capaz de ocasionar alterações na eficiência dos resultados. Além disso, os resultados também podem ser prejudicados devido às variações quanto à granulometria, à umidade e à heterogeneidade das amostras. Entretanto, existe a possibilidade de aplicação de tratamento nos dados espectrais, o que amenizaria tais problemas das análises com o NIR.

Percebe-se então que os espectros gerados no infravermelho possuem uma diversidade de informações, podendo então ser aplicados em diversas análises químicas e físicas. Apesar disso, ainda existe uma grande dificuldade de extrair as informações relevantes desses espectros, pois as bandas de absorção na região NIR são produto de sobretons e da combinação de bandas fundamentais de vibrações (PASQUINI, 2003). Entretanto, os avanços tecnológicos contribuíram e ainda muito contribuem para o desenvolvimento de estudos que utilizam a espectroscopia no infravermelho próximo (VIANA, 2008).

Os primeiros trabalhos utilizando NIR se iniciaram a partir de 1938, quando pesquisadores utilizaram a espectroscopia para quantificar a concentração de água na gelatina e a concentração de óleos. Nesse sentido, os trabalhos realizados por Karl Norris merecem destaque por sua importância, visto que ele foi pioneiro na aplicação da técnica como método de determinação da umidade em produtos agrícolas. No Brasil, os primeiros trabalhos foram publicados por Nishiyama em 1991 (PASQUINI, 2003).

4.2.2. Aplicação da técnica na área florestal

A aplicação da espectroscopia na região do infravermelho próximo no setor florestal iniciou-se com o trabalho de Birkett e Gambino (1989), que a utilizaram para estimar o número kappa em amostras de madeira. Depois de alguns anos, Michell (1995) realizou estimativas de propriedades químicas da madeira, enquanto Thygesen (1994) e Hoffmeyer; Pedersen (1995) fizeram as primeiras indicações da utilização da técnica para estimativa da densidade básica.

Depois disso, ela vem sendo amplamente utilizada em qualquer substância cujas moléculas contenham, principalmente, ligações C-H, O-H, N-H, S-H ou C=O (MARTINS; SARGENTELLI, 2021). Além disso, tem se mostrado como um método capaz de prever propriedades químicas (HANS; ALISSON, 2021; LENGOWSKI *et al.*, 2018), mecânicas (SHUKLA; SHARMA, 2021), físicas (TOSCANO *et al.*, 2022; AMARAL *et al.*, 2020; LIANG *et al.*, 2019; ROSSO *et al.*, 2013; LAZAROTTO; MAGALHÃES, 2014) e anatômicas da madeira (NISGOSKI *et al.*, 2015; HEIN *et al.*, 2012).

Os métodos de análise tradicionalmente aplicados para avaliação tecnológica da madeira são precisos, porém trabalhosos, demorados, caros e limitados quanto ao número de amostras, o que dificulta os trabalhos de caracterização do material (VIANA *et al.*, 2008). Diante dessa realidade, a análise das características tecnológicas da madeira de forma não destrutiva tem se mostrado uma ferramenta de grande importância para a determinação da variabilidade de indivíduos e a caracterização de material no campo. Essas avaliações por meio de técnicas não destrutivas têm ganhado destaque no setor florestal e na indústria (GOUVÊA *et al.*, 2011).

Ross *et al.* (1998) definiram a amostragem da madeira de forma não destrutiva como uma ciência de análise de propriedades físicas e mecânicas sem alterar suas capacidades de uso final, o que é bastante interessante no setor florestal, pois assim não é necessário realizar o corte das árvores para retirar as amostras que serão estudadas.

Neste sentido, as técnicas de análise que utilizam a espectroscopia têm ganhado destaque também em pesquisas florestais, pois a avaliação ocorre através da aplicação da radiação sobre a matéria e a análise das interações que ocorrem entre elas a partir disso. A faixa de radiação eletromagnética possui várias regiões de energia que caracterizam diversas técnicas de espectroscopia, dentre as quais as mais utilizadas são as de infravermelho visível e ultravioleta (EISBERG; RESNICK, 1986).

4.3 Calibração dos modelos

Para se utilizar a técnica NIR a fim de realizar previsões qualitativas e quantitativas de materiais, é necessário aplicar o princípio da comparação de resultados, em que se determinam os parâmetros das amostras com as análises convencionais de laboratório e os associam com os dados espectrais gerados pelo espectrômetro (VIANA, 2008).

Assim, o objetivo do processo de calibração é produzir um modelo que melhor represente e/ou relacione as informações obtidas através da utilização dos métodos convencionais – que são fixados como uma referência – com os dados espectrais (PANTOJA, 2006). Utilizando-se a equação de calibração é possível prever, com bom grau de confiabilidade, propriedades de amostras provenientes da população que até então não foram avaliadas (ARRIEL, 2017).

Após a obtenção dos dados espectrais, eles devem ser corrigidos, pois podem sofrer inúmeras interferências, seja da complexa interação dos componentes da amostra, da dispersão da luz em amostras sólidas, da reprodutibilidade pobre das medições, de variações no espectro ocasionadas pela temperatura ou pelo próprio

hardware do equipamento, como ruídos no detector, deslocamentos de linha de base e de comprimentos de onda (SOTELOS, 2006). Diante disso, há aplicação do pré-processamento espectral, que são técnicas que objetivam reduzir, eliminar ou padronizar o impacto desses fatores nos espectros, sem alterar a informação espectroscópica contida (SIESLER, 2002).

Um exemplo de pré-processamento espectral é a derivação das curvas obtidas. A aplicação da primeira ou segunda derivada sobre os dados espectrais brutos resulta em ampliação dos ombros espectrais e redução do efeito das inclinações provocadas na linha de base do espectro, devido à morfologia das partículas (MARTENS; TORMOD, 1989).

A obtenção das informações dos espectros é realizada utilizando técnicas da estatística multivariada. Hein *et al.* (2018) aborda que em estudos qualitativos, a análise de componentes principais (PCA) possui destaque de aplicação e nos estudos quantitativos, a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) é a técnica mais utilizada.

A análise de componentes principais (PCA) é um método quimiométrico que objetiva reduzir a quantidade de variáveis originais, e para isso ela identifica quais são as principais propriedades contidas nos espectros e as separa em pequenos agrupamentos com propriedades semelhantes, que são chamados de componentes principais (SANDAK *et al.*, 2016).

A regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS) é aplicada para obtenção de informações quantitativas a partir de dados espectrais. Sua aplicação maximiza a covariância entre os dados de entrada e saída, resultando em um modelo que exprime a relação entre as variáveis latentes, que pode ser linear ou não (HEIN, 2008).

Após o processo de calibração, é necessário obter conhecimento acerca da acurácia da calibração do modelo, através da validação. Os processos de validação mais aplicados na técnica NIRS são a validação externa e a validação cruzada (ARRIEL, 2017).

Para aplicar a validação externa, utiliza-se um conjunto de dados que se difere do conjunto de dados da calibração. Embora seja um método simples, seu uso implica a geração de novos espectros e análises convencionais, fazendo com que o processo fique mais oneroso. Já a validação cruzada é realizada utilizando-se o mesmo banco de dados da calibração. Nesse caso, alguns dados são separados, um modelo é construído com os dados restantes e a predição é feita em relação aos dados separados inicialmente

(SOTELO, 2006).

Após a calibração e a validação dos modelos preditivos, são geradas as estatísticas para avaliação. Os parâmetros estatísticos mais utilizados são: coeficiente de determinação (R^2); erro padrão da calibração e da validação (SE_{cal} e SE_{cv}), sendo o desvio padrão da diferença entre os resultados obtidos pelo modelo ajustado em relação ao método de referência; relação de desempenho do desvio (RPD), que representa a divisão do desvio padrão dos dados de referência pelo erro quadrático médio da validação cruzada; Raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o número de variáveis latentes (LV) usadas na construção do modelo (SANDAK *et al.*, 2016).

4.4 Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada a previsão da densidade básica, teor de umidade e poder calorífico da madeira

A espectroscopia no infravermelho próximo está sendo amplamente utilizada para avaliação da madeira. Na literatura, é possível encontrar trabalhos que realizam sua aplicação para avaliação da densidade da madeira. Na Tabela 2 estão citados alguns trabalhos e as estatísticas dos modelos preditivos gerados.

Tabela 2 – Trabalhos realizados calibrando modelos em NIR para densidade básica da madeira (continua)

Referência	Material	Análise	R ²	ERRO
Magalhães <i>et al.</i> (2006)	<i>Pinus taeda</i>	Avaliar a técnica de infravermelho próximo (NIR) na determinação da densidade básica em pó da madeira.	0,80	20 (Kg/m ³)
Inagaki <i>et al.</i> (2010)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Viabilidade da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) com transformada de Fourier para avaliação da densidade.	0,89	20 (Kg/m ³)
Gouvêa <i>et al.</i> (2011)	<i>Eucalyptus sp.</i>	Espectroscopia de Infravermelho Próximo-NIRS para predição da densidade básica da madeira.	0,84	17 (Kg/m ³)
Mora <i>et al.</i> (2011)	<i>Pinus taeda</i>	Densidade da madeira utilizando o NIR e a quantidade de espectros necessários por disco.	0,85	22,8 (Kg/m ³)
Fujimoto; Kobori; Tsuchikawa (2012)	<i>Larix kaempferi</i>	Efeitos das condições de umidade na precisão da densidade básica estimada via NIR.	0,89	26 (Kg/m ³)
Milagres <i>et al.</i> (2013)	<i>Eucalyptus</i>	Modelos de calibração multivariada NIRS para amostras de <i>Eucalyptus</i> em idades de 3 a 7 anos, para densidade básica.	0,89	14 (Kg/m ³)
Rosso <i>et al.</i> (2013)	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	Uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) para estimar a densidade da madeira.	0,784	34 (Kg/m ³)
Lazarotto; Magalhães (2014)	<i>Eucalyptus benthamii</i> e <i>Eucalyptus pellita</i>	Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para predição de densidade básica.	0,78	21 (kg/m ³)
Lazarotto; Magalhães; Aguiar (2016)	<i>Pinus maximinoi</i> e <i>Pinus tecunumanii</i>	Construir um modelo de predição da densidade básica de madeiras.	0,94	30 (Kg/m ³)
Acqua <i>et al.</i> (2018)	<i>Pinus Loblolly</i>	Modelos PLS baseados em NIR para prever a densidade básica.	0,7	36(Kg/m ³)
Liang <i>et al.</i> (2019)	Álamo	Densidade básica de cavacos de madeira.	0,87	17,61 (Kg/m ³)
Shukla; Sharma (2021)	<i>Tectona grandis</i>	Modelos de calibração baseados em dados NIRS para estimativa da densidade.	0,94	9,29 (Kg/m ³)

Nota: R²: Coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Na Tabela 3 estão indicados trabalhos e as estatísticas dos modelos preditivos gerados para avaliação da umidade da madeira.

Tabela 3 – Trabalhos realizados calibrando modelos em NIR para umidade da madeira

Referência	Material	Análise	R ²	ERRO
Defo; Taylor; Bond (2007)	<i>Quercus</i> sp.	Umidade da madeira a partir de espectros em NIR de três faces da madeira.	0,93	2,90%
Mora <i>et al.</i> (2011)	<i>Pinus taeda</i>	Umidade da madeira utilizando o NIR e a quantidade de espectros necessários por disco.	0,85	2%
Zhang <i>et al.</i> (2011)	<i>Pinus koraiensis</i>	Umidade da madeira em sete comprimentos de onda.	0,98	0,046%
Hans <i>et al.</i> (2013)	<i>Picea mariana</i>	Monitoramento da umidade em troncos congelados e descongelados utilizando NIR.	0,94	7,50%
Watanabe; Mansfiel; Avramides (2011)	<i>Tsuga heterophylla</i> <i>Abies amabilis</i>	Classificar a umidade de madeira verde	0,93	5,70%
Liang <i>et al.</i> (2019)	Álamo	Umidade de cavacos de madeira	0,99	2,51%
Santos (2020)	<i>Eucalyptus</i> sp.	Monitoramento da dessorção de água em amostras prismáticas de madeira.	0,96	8,56%
Amaral <i>et al.</i> (2020)	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>	Umidade dos cavacos de madeira	0,96	7,15%
Shukla; Sharma (2021)	<i>Tectona grandis</i>	Modelos de calibração baseados em dados NIRS para estimativa da umidade	0,97	0,48%

Nota: R²: Coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Além desses, Toscano *et al.* (2022) utilizaram modelos NIR na estimativa da umidade de cavacos. O desempenho dos três modelos de predição foi verificado por meio de análise de regressão, avaliando-se a linearidade dos valores de umidade estimados em relação aos valores retornados pelo método padrão de secagem em estufa. Ao final, a avaliação da predição dos modelos foi considerada satisfatória, com R² variando de 0,86 a 0,88.

Na Tabela 4 estão indicados alguns trabalhos e as estatísticas dos modelos preditivos gerados para avaliação do poder calorífico da madeira.

Tabela 4 – Trabalhos realizados calibrando modelos em NIR para poder calorífico da madeira

Referência	Material	Análise	R ²	ERRO
Silva <i>et al.</i> (2014)	<i>Scleronema micranthum</i> Ducke, <i>Scleronema sp.</i> , <i>Ocotea sp.</i> , <i>Caryocar vilosum</i> Pers.	Utilizar a técnica NIR para calibrações das propriedades da madeira	0,99	16,69 (cal/g)
Magalhães <i>et al.</i> (2003)	<i>Pinus maniminoi</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus badjensis</i> , <i>Eucalyptus paniculata</i> , <i>Eucalyptus robusta</i> , <i>Eucalyptus smithii</i> , <i>Eucalyptus viminalis</i> , híbrido cambiju.	Uso da espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) na determinação de Poder calorífico superior	0,51	124,56 (cal/g)
Posom <i>et al.</i> (2016)	<i>Leucaena leucocephala</i>	Modelos de calibração em NIR desenvolvidos por regressão PLS para o poder calorífico superior.	0,964	18,91 (cal/g)
Mancini <i>et al.</i> (2018)	Não identificado	Desenvolver modelos baseados em NIR para predição de poder calorífico superior.	0,81	69,02 (cal/g)

Nota: R²: Coeficiente de determinação.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Diante de poucas informações sobre a calibração de modelos preditivos para as variáveis de densidade básica, umidade e poder calorífico com aplicações em campo, aliada a sua vasta utilização para caracterização de biomassa para indústria energética, observa-se uma necessidade de elaboração de trabalhos para predição rápida, em tempo real e não destrutiva dessas características (MANCINI *et al.*, 2018.)

4.5 Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941 - **Madeira – Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: **Madeira: Determinação do teor de umidade de cavacos – Método de secagem em estufa**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: **carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p

ACQUAH, G.E.; ESSIEN, C.; VIA, B.K.; BILLOR, N.; ECKHARDT, L.G. Estimating the basic density and mechanical properties of elite loblolly pine families with near infrared spectroscopy. *Forest Science*, v. 64, n.2, p.149-158. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxx009>.

ADEDIPE, O. E.; DAWSON-ANDOH, B. Predicting moisture content of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) veneer using near infrared spectroscopy. **Forest Products Journal**, v. 58, n. 4, 2008.

AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M.; COSTA, E. V.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000304>.

ARRIEL, T.G. **Espectroscopia no infravermelho próximo na predição de características da madeira em clones de *Eucalyptus***.63 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade federal de Lavras, Lavras, 2017.

BARREIROS, R.M.; RIBEIRO, G. P.; DIAS, K. B.; GOUVÊA, C. F.; REIS, A. M. F.; SILVA, G. C.. Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**, p. 146-164, 2021. <http://dx.doi.org/10.37885/210203332>.

BARRICHELO, L. E. G. **Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp.** In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1992, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 1992. p. 726-731.

BATISTA, D. C., KLITZKE, R. J., SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n.4, p. 665-67, 2010. <http://dx.doi.org/10.5902/198050982425>.

BIRKETT, M. D.; GAMBINO, M. J. T. Estimation of pulp kappa number with near infrared spectroscopy. **Tappi Journal**; v.72, n.9, p:193-197, 1989.

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G. I. B. de; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass And Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, jul. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.005>.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. Circular técnica, São Paulo, n. 52, jun.1979.

BRUKER. **Spectroscopy basics, Why FT-NIR spectroscopy?** Disponível em: <<https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-nir-spectrometers/what-is-ft-nir-spectroscopy.html>>. Acessado em: 26 jul. 21.

BUFALINO L., PROTÁSIO T.P., COUTO, A.M., NASSUR, O.A.C, SÁ, V.A., TRUGILHO P.F. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v.32, n.70, p. 129-137, 2012.

CAMPOS, Andressa Ambrósio de. Estudo potencial energético de combustíveis derivados da biomassa: construção de um calorímetro isoperibólico. 17º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, UNIMEP, Piracicaba, 2009, 6 p.

CARNEIRO, A. de C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R.V. O.; SANTOS, R. C. dos; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622014000200019>.

CASTRO A.F.N.M, CASTRO, R.V.O., CARNEIRO, A.C.O, LIMA, J.E, SANTOS, R.C., PEREIRA, B.L.C. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**; v.48, n.6, p. 627-635, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600008>.

CIENFUEGOS, F. Análise Instrumental: Conceitos e Avanços da Análise no Infravermelho, **Revista Química e Derivados**, São Paulo, ano 38, n. 413, p.40-46, 2003.

CRISÓSTOMO, M. C.; GOUVEIA, F. N.; COSTA, A. F. da. Relação entre o teor de umidade e a constante dielétrica de espécies de madeira da Amazônia durante o processo de secagem. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 181-187, fev. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000100020>.

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, A. C. C., MARCHESAN, R., ALMEIDA, V. C., MONTEIRO, T. C., MORAES, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira**, v. 9, n.1, p. 37-44, 2018 <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p37-44>.

DIAS, J., A.F.; PIROLA, L.P.; TAKESHITA, S.; LANA, A.Q.; BRITO, J.O.; ANDRADE, A.M. Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. **Cerne**, v.22, n.4, p. 423- 430.2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622032175>.

DIESEL, K. M. F.; COSTA, F. S. L.; PIMENTA, A. S.; LIMA, K. M. G. Near-infrared spectroscopy and wavelength selection for estimating basic density in *Mimosa tenuiflora* [Willd.] Poiret wood. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 949-959, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0652-1>.

DINIZ, I.S. **Estudo da influência da umidade no consumo específico do cavaco de madeira para geração de vapor saturado em caldeira de biomassa**. 36 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ELOY, Elder et al. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista. Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 551-559, June 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2020** – Ano base 2019: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

ENGELUND, E.T.; THYGESEN, L.G.; SEVENSSON, S.; HIEL, C.A.S. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. **Wood Science and Technology**, v. 47, n.1, p.141- 161.2013.

Estopa, R. A.; Milagres, R. F.; 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, FEV 2017.

EUFRADE, J., H. de J.; RODRIGUES, S.A.; SPADIM, E. R.; GUERRA, S.P. S.; BALLARIN, A.W. Predição do teor de umidade de toras longas de madeira de *Eucalyptus urophylla* estocadas em pilhas ao ar livre. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. 1-11, 1 jun. 2021. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v49n130.03>.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C. dos; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. de C. O.; SILVA, G. G. C. da; CASTRO, A. F. N. M.; COSTA, S. E. de L.; PIMENTA, A. S. Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, p. 1-7, 30 nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000500004>.

Foelkel, C.E.B.; Brasil, M.A.M.; Barrichelo, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, v.2, n.3: p.67-74, 1971.

FUJIMOTO, T.; KOBORI, H.; TSUCHIKAWA, S. Prediction of Wood Density Independently of Moisture Conditions Using near Infrared Spectroscopy. **Journal Of Near Infrared Spectroscopy**, v. 20, n. 3, p. 353-359, 1 jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.994>.

FURTADO, T. S. et al. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 3, p.577-582, set. 2012.

GALLIO, E.; SANTINI, E.J.; GATTO, D.A.; SOUZA, J.T.; RAVASI, R.; MENEZES, W.M.; FLOSS, P.A.; BELTRAME, R. Caracterização Tecnológica da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 244-250, 30 set. 2016. <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n3p244-250>.

GIOVANELLA, R.; SCHEFFER, S. V.; TAVERNA, L.; MAGALHAES, W. L. E. Predição do poder calorífico em *Eucalyptus grandis* através da espectroscopia de infravermelho próximo (NIR). In: **EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA FLORESTAS**, 2006, Colombo. Embrapa Florestas, 2006. v. 5.

GONÇALVES, F. S. Água: moderadora de temperatura. 2015. Disponível em: <http://www.infoescola.com/termodinamica/agua-moderadora-detemperatura/>. Acesso em: 03 abr. 2015.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.2, p.349-358, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200019>.

HANS, G.; LEBLON, B.; STIRLING, R.; NADER, J.; LAROCQUE, A.; COOPER, P. Monitoring of moisture content and basic specific gravity in black spruce logs using a handheld MEMS-based near-infrared spectrometer. **The Forestry Chronicle**, v. 89, n. 5, p. 607- 620, 2013.

HANS, Guillaume; ALLISON, Bruce. On-line characterization of wood chip brightness and chemical composition by means of visible and near-infrared spectroscopy. **Holzforschung**, v. 75, n. 11, p. 989-1000, 7 jun. 2021. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2021-0027>.

HEIN, P. R. G. **Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 88 f, 2008.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T. TRUGILHO, P. F.; CHAIX, G. Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. **Floresta e ambiente**. v.19, n.2, p. 194-199. abr./jun. 2012.

HEIN, P. R.G.; PAKKANEN, H.; SANTOS, A. A. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n.3, p,1-10 2018. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2017263-11892>.

HOFFMEYER, P.; PEDERSEN, J. G. Evaluation of density and strength of Norway spruce by near infrared reflectance spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**. v.53, pp.165- 170. 1995.

HILSDORF, J. W. et al. Química tecnológica. São Paulo: Thomson, 2004.

HSING, T. Y.; PAULA, N. F. de; PAULA, R. C. de. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 273-283, 31 mar. 2016. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509821119>.

INAGAKI, T.; SCHWANNINGER, M.; KATO, R.; KURATA, Y.; THANAPASE, Warunee; PUTHSON, P.; TSUCHIKAWA, S. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science And Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 143-155, 2 out. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-010-0379-6>.

JANKOWSKA, A.; KOZAKIEWICZ, P. Determination of Fibre saturation point of selected tropical wood species using different methods. **Drewno**, v.59, n. 197, 2016.

Kelley, S. S., Rials, T. G., Groom, L. R., & So, C. L. (2004). Use of near infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of six softwoods. **Holzforschung**, v.58, n.3, p.252-260. <http://dx.doi.org/10.1515/HF.2004.039>.

KOBORI, H., GORRETTA, N., RABATEL, G., BELLON-MAUREL, V., Chaix, G., ROGER, J. M. and Tsuchikawa, S. (2013) Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC). **Holzforschung**, v.67, n.3, p. 307–2014, 2013.

LAZAROTTO, M.; MAGALHÃES, W. L. E.; Uso da espectroscopia no infravermelho

próximo (NIR) para predição não destrutiva de densidade básica da madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus pellita*. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 6 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 334).

LAZZAROTTO, M.; NETIPANYJ, R. R.; MAGALHÃES, W. L. E.; AGUIAR, A. V. de. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de Pinus. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, v. 7, n. 3, p. 119-126, 30 dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n3p119-126>.

LIANG, L.; FANG, G.; DENG, Y.; XIONG, Z.; WU, T. Determination of Moisture Content and Basic Density of Poplar Wood Chips under Various Moisture Conditions by Near-Infrared Spectroscopy. **Forest Science**, v. 65, n. 5, p. 548-555, 20 maio 2019. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz007>.

LIMA, E. A. de; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2008. 3 p. (Comunicado Técnico, 220).

LIMA, E. A. de; ABDALA, M.; WENZEL, A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. Colombo: **Embrapa Florestas** (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 220). 2008. 3 p.

LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em trinta e duas cidades do estado de Minas Gerais. **Árvore**, v. 19, n.2, p. 263-271, 1995.

LIRA, L. F. B. **Desenvolvimento de métodos analíticos para monitoramento da qualidade do biodiesel e suas misturas**. 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

LOPES, G.A; GARCIA, J.N. Densidade básica e umidade natural da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith de Itatinga associadas aos padrões de casca apresentados pela população. **Scientia Florestalis**. n.62, p.13-23, dez. 2002.

MAGALHAES, W. L. E.; MUNIZ, GRACIELA, I.B.; PEREIRA, J. C. D.; KLOCK, U.; SILVA, J. R. M. . Determinação de propriedades de madeira através do infravermelho próximo. In: 8 CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. Benefícios, Produtos e Serviços da Floresta., 2003, SÃO PAULO. Sociedade brasileira de Silvicultura, 2003.

MAGALHÃES, W. L. E.; ZANGISKI, F.; KLEIN, C.H.; HIGA, A. R. 2006. Uso da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para predição não-destrutiva de densidade básica da madeira de *Pinus taeda*. Colombo: Embrapa Florestas (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 159).2006, 4p.

MANCINI, M.; RINNAN, A.; PIZZI, A.; TOSCANO, G. Prediction of gross calorific value and ash content of woodchip samples by means of FT-NIR spectroscopy. **Fuel Processing Technology**, v. 169, p. 77-83, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.021>.

MARTINS, J. A.; SARGENTELLI, V. infravermelho próximo na avaliação quantitativa foliar. **Revista Prospectus**, v. 3, n. 1, p. 33-55, ago. 2021. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.5813215>.

MEDEIROS, P.N.; Oliveira L; Paes, J.B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas Espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente** v.21, n. 4, p. 484-493, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

MICHELL, A. J. Pulpwood quality estimation by near-infrared spectroscopic measurements on eucalypt woods. **Appita Journal**; v.48, p:425-428, 1995.

MILAGRES, F. R.; GOMIDE, J. L.; MAGATON, A.; FANTUZZI, H. Influência da idade na geração de modelos de espectroscopia NIR, para predição de propriedades da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1165-1173, dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622013000600018>.

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. <https://doi.org/10.1255/jnirs.947>

NASSAR, A., HARFUCH, L., MOREIRA, M., CHIODI, L. e ANTONIAZZI, L. 2010. **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil Modelagem do Uso do Solo**. Relatório Final. Instituto do Comercio e Negociações Internacionais – ICONE. Brasil. 83 p.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.I.B.; MORRONE, S.R.; SCHARDOSIN, F.Z.; FRANÇA, R.F. NIR and anatomy of wood and charcoal from Moraceae and Euphorbiaceae species. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, v. 6, n. 3, p. 183-190, 26 dez. 2015. *Revista de Ciencia de Madeira*. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p183-190>.

NOVAES, T.V. **Espectroscopia no Infravermelho próximo (NIR) para discriminar espécies florestais produtoras de madeira da Amazônia** 2021.91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021).

OLIVEIRA, H.G.B.; SOUSA, M.V.C.; SILVA, L.S.S.; FILHO, A.C.F.; RIBERO A. Propriedades energéticas da madeira e casca de *Dalbergia cearensis* Ducke. v.15, n.3, p. 232-237, **Edição Especial VI CONEFLO**, 2019.

OLIVEIRA, J.T. da S.; SILVA, J. de C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

PÁDUA, F. A. **Amostragem para avaliação da densidade básica de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. 87 f. Tese (Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras 2009.

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

Pecoraro, E., Pizzo, B., Alves, A., Macchioni, N., & Rodrigues, J. C.. Measuring the chemical composition of waterlogged decayed wood by near infrared spectroscopy. **Microchemical Journal**, v.122,176-188,2015.

Pereira BLC, Oliveira AC, Carvalho AMML, Carneiro ACO, Santos LC, Vital BR. Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Ironmaster Use. **International Journal of Forestry Research** 2012; p.1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/523025>.

PETROFF G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et Forêt Tropiques** 1978; v.177, p. 51-64.

POSOM, J.; SHRESTHA, A.t; SAECHUA, W.t; SIRISOMBOON, P. Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. **Energy**, v. 107, p. 464-472, jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.041>.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

RODRIGUES, É. A. C., ROSADO, S. C. S., TRUGILHO, P. F., SANTOS, A. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v.14, n.2, p.147-152, 2008.

ROSA, T. S. B. S. **Potencial energético da eichhornia crassipes (aguapé) e da *Pistia stratiotes* (alface d'água)**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016. Disponível em: < <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/188> >.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; PELLERIN, R.F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 1, p.14-19, 1998.

ROSSO, S., Muniz, G. I. B., Matos, J. L. M., Haselein, C. R., Hein, P. R. G., & Lopes, M. C. (2013). Density of *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, v.19, n.4, p. 647-652. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000400015>.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; SOUZA, M. de; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, out. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>.

SANDAK, J.; SANDAK, A.; MEDER, R. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, n. 6, p. 485-505, 2016.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. Bioenergia e Biorrefinaria, Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais. Viçosa, MG, 2013.

SANTOS, L. M. dos; AMARAL, E. A.; NIERI, E. M.; COSTA, E. V. S.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**, v. 16, n. 5, p. 336-343, 22 maio 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2020.1768143>.

SANTOS, R. C. et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.

SCHIMLECK 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, p.2433–2437, 2003. <http://dx.doi.org/10.1021/jf020981u>.

SEFARA, N. L.; CONRADIE, D.; TURNER, P. Progress in the use of near-infrared absorption spectroscopy as a tool for the rapid determination of pulp yield in plantation eucalypts. **Tappsa Journal**, v.53, n. 11, p. 15-17, 2000.

SHUKLA, S. R.; SHARMA, S. K. Estimation of density, moisture content and strength properties of *Tectona grandis* wood using Near Infrared Spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 23, n. 18, p. 1-12, fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100418>.

SILVA, Angelus. Estrutura e Propriedades de Materiais Cerâmicos. Capítulo VIII: Propriedades Térmicas. 2015.

SILVA, D. A.; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK U.; MUÑIZ, G. I. B. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 4, p. 561-568, Dec. 2014.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.e; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481, 31 dez. 2015. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>.

SILVA, J. C. et. al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill. ex. Maidem. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.455- 460, 2005.

SILVA, L. L, et al. Princípios de termoeletricas em pequenas propriedades rurais. In: 2º **International workshop advances in cleaner production**. São Paulo, 2009.

SILVA, D.A.; ALMEIDA, V.C.; VIANA, L.C; KLOCK, U., MUNIZ, G.I.B. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, p.561-568, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.043414>.

SIMÕES, S. S. **Desenvolvimento de métodos validados para a determinação de captopril usando espectrometria NIRR e calibração multivariada**. 2008. 98 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

SKAAR, C. Wood-Water Relations. Springer-Verlag, Berlin, 1988. Disponível em: https://archive.org/details/woodwaterrelatio00skaa_0

SKOGLUND, A.; KESSLER, W.; KESSLER, R. W.; BRUNDIN, A.; MANDENIUS, C. F. On-line spectroscopic measurements of wood chips before a continuous digester. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 70, p.129– 135, 2004.

SOTELO, F. F. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização de petróleo: simulação de uma unidade de destilação atmosférica**. 2006, 154p. (Doutorado em Engenharia Química), Universidade de São Paulo, São Paulo.

TILLMAN, D. A. Wood as an energy resource. Londres: Academic Press, 1978.

THYGESSEN, L. Determination of dry matter content basic density of Norway spruce by near infrared reflectance and transmittance spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, n.2, p. 127-135, 1994.

Thygesen, L.G. 1994. Determination of dry matter content and basic density of norway spruce by near infrared reflectance and transmittance spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spec.** v.2, n.1, p.127–135.

TIPLER, P.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros. v 1. Rio de Janeiro, 2009

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M.M.; MAGALHÃES, C. A. de S.; OLIVEIRA, J. M. F. de. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 7, p. 791-799, jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018000700002>.

TOSCANO, G.; LEONI, E.; GASPERINI, T.; PICCHI, G. Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. **Fuel**, v. 320, p.1-10, jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123948>.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, n. 73, p. 55-62, 2007.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; MATOS, J. L. M. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **ACTA Amazônica**, Manaus - Amazonas, v. 20, p. 307-319, mar./dez. 1990.

TRUGILHO, P.F; ARANTES, M.D.; PÁDUA, F.A.; ALMADO, R.P.; BALIZA, A.E.R. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 33-40, 2010.

ULKER, O. Wood adhesives and bonding theory. In: RUDAWSKA, A. (Ed.). Adhesives: applications and properties. London: IntechOpen, Chapter 11, p.271-288, 2016.

VIA, B. K.; ZHOU, C.; ACQUAH, G.; JIANG W.; ECKHARDT, L. Near infrared

spectroscopy calibration for wood chemistry: which chemometric technique is best for prediction and interpretation? **Sensors**, v. 14, p. 13532–13547, 2014.

VIANA, L. C. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus***. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 120 f, 2008.

WATANABE, K.; MANSFIELD, S. D.; AVRAMIDIS. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green, hem-fi timber. **Journal Wood Science**, v. 77, n. 1, p. 288-294, 2011.

YU, L.; LIANG, Y.; ZHANG, Y.; CAO, J. Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-squares. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 1053-1060, 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.

5. CAPÍTULO II: CALIBRAÇÃO DE MODELOS BASEADOS EM NIR PARA AVALIAÇÃO DE DENSIDADE BÁSICA, UMIDADE E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE CAVACOS

5.1 Introdução

A qualidade da madeira é o resultado da combinação de suas propriedades físicas, anatômicas e químicas, que sofrem variações conforme a espécie, idade e sítio (LIEBL, 2016). Já a utilização da madeira está estritamente relacionada com o conhecimento das propriedades tecnológicas, que influenciam diretamente a qualidade do material (GALLIO *et al.*, 2016). Por isso, estudos nessa área são imprescindíveis, no intuito de indicar qual o melhor aproveitamento dessa matéria-prima, conforme as diferentes necessidades de cada produto.

Pesquisas desenvolvidas sobre a utilização da madeira como insumo energético indicam a avaliação primordial da densidade básica, do teor de umidade e do poder calorífico (CARNEIRO *et al.*, 2014; ROSA, 2016; TONINI *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2019; BARREIROS *et al.*, 2021). Na disponibilidade de insumos, outras características como a composição química e a anatômica devem ser consideradas.

A densidade básica da madeira é o resultado da relação entre a massa da madeira seca – quilos ou gramas – e o seu volume verde – metros cúbicos ou centímetros cúbicos (PÁDUA, 2009). É uma característica fortemente correlacionada com a produção energética, pois quanto maior a densidade básica de um material, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico (CARNEIRO *et al.*, 2014). Diante disso, ela tem sido intensamente utilizada nos trabalhos de avaliação da qualidade da madeira para fins energéticos.

A madeira se caracteriza por ser um material higroscópico, podendo absorver água na forma líquida ou adsorver vapor da atmosfera circundante (DIAS-JÚNIOR *et al.*, 2016). A aferição da umidade também é importante para o aproveitamento energético da biomassa, pois a água ocasiona a redução do poder calorífico, uma vez que parte do calor gerado é consumido para sua evaporação (SANTOS *et al.*, 2013).

O poder calorífico expressa a quantidade de energia despreendida após a combustão completa da madeira. Segundo Vieira (2012), o poder calorífico pode ser dividido em superior e inferior. O Poder Calorífico Superior (PCS) representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida a partir da transferência de calor do combustível com água, resultante do processo de combustão no estado líquido. Já o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado durante a combustão com a água no

estado de vapor. Em termos de qualidade da madeira para produção de energia, espera-se que quanto mais alto o poder calorífico, maior seja a energia contida nesse material.

Os métodos de análise tradicionalmente aplicados para avaliação da qualidade da madeira são precisos, porém, trabalhosos, demorados, caros e limitados quanto ao número de amostras, o que dificulta os trabalhos de caracterização do material (VIANA *et al.*, 2008). Diante dessa realidade, a determinação das características tecnológicas da madeira de forma não destrutiva tem se mostrado uma ferramenta de grande importância para a determinação da variabilidade de indivíduos e a caracterização de material no campo. Por isso, técnicas não destrutivas têm ganhado destaque no setor florestal e na indústria (GOUVÊA *et al.*, 2011).

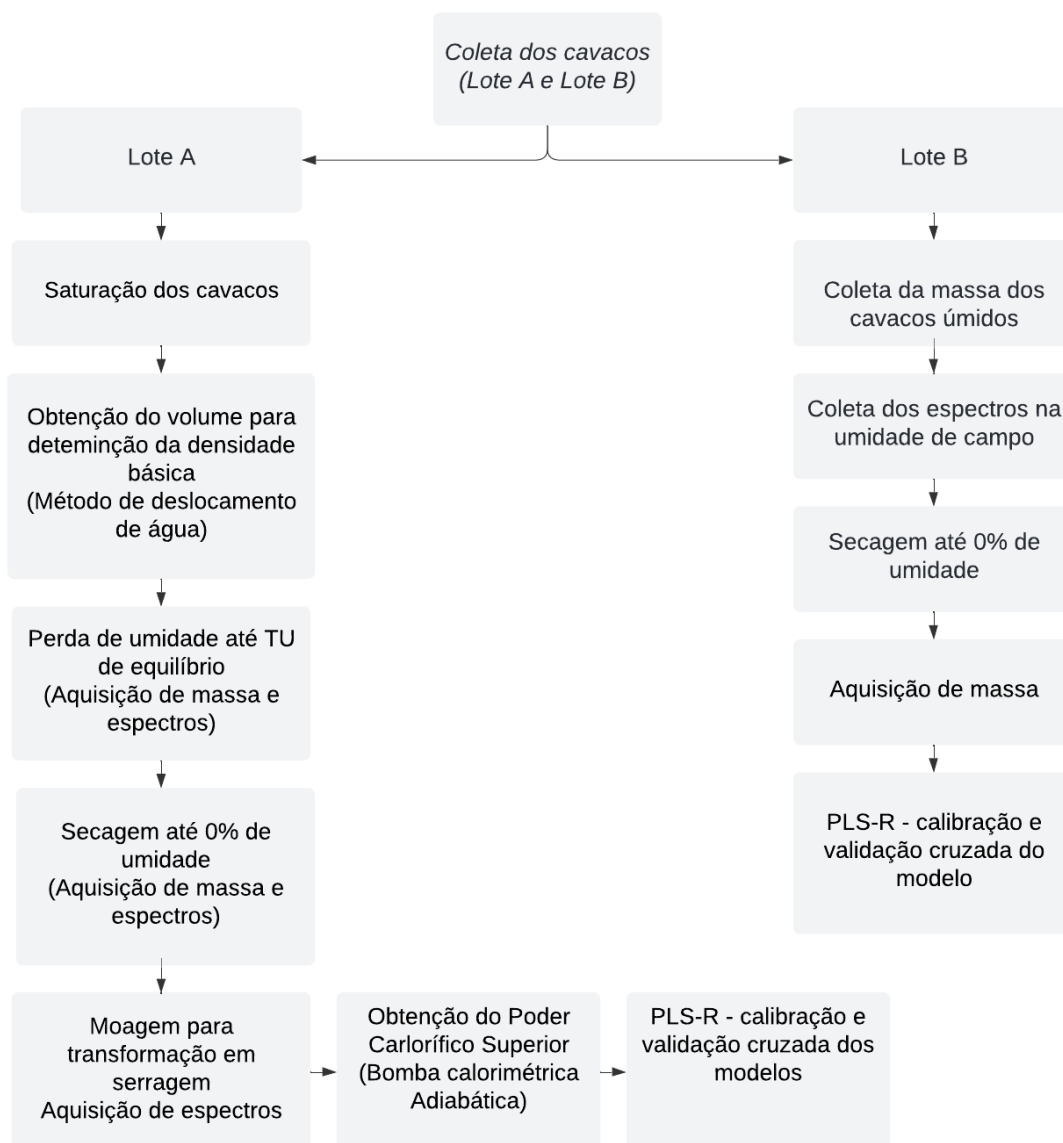
Nesse sentido, a espectroscopia no infravermelho próximo tem sido uma opção para avaliação não destrutiva de um grande número de amostras, o que faz economizar tempo e reagentes para predições fundamentadas (DIESEL *et al.*, 2014). Ela se baseia na emissão de um feixe de luz sobre a amostra, a qual, ao absorvê-lo, terá vibrações das ligações químicas dos seus constituintes, o que ocasiona mudanças nas vibrações moleculares intimamente associadas a diferentes estruturas moleculares (ESTOPA *et al.*, 2017). Então, aplicando-se o princípio da comparação de resultados, em que se determinam os parâmetros das amostras com as análises convencionais de laboratório e os associam com os dados espectrais gerados pelo espectrômetro, é possível calibrar modelos para realizar previsões qualitativas e quantitativas de materiais (VIANA, 2008).

O objetivo deste estudo foi calibrar modelos preditivos de densidade básica, umidade e poder calorífico de cavacos de madeira destinados para produção de energia.

5.2 Material e métodos

Na Figura 1, é possível observar o fluxograma das etapas realizadas neste capítulo, as quais estão descritas detalhadamente a seguir:

Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora

5.2.1 Material genético e procedimento de coleta dos cavacos

O material vegetal utilizado foi proveniente de um povoamento do clone comercial i144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) em posse da empresa Nova esperança, com variação de idade e implantado em espaçamento 3 x 2,5, localizado no município de Montes Claros, no estado de Minas Gerais. Foram utilizados cavacos de madeira coletados aleatoriamente e diretamente nos caminhões de transporte. Para coleta, percorreu-se em zigue-zague a pilha de material em cima do caminhão e coletaram-se amostras verticalmente na pilha, buscando-se obter materiais do topo, do meio e da parte inferior. Em seguida, eles foram acondicionados em sacos plásticos e enviados para o laboratório de Serraria e Marcenaria do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais.

5.2.2 Preparação dos cavacos para as análises

Em laboratório, separaram-se 200 cavacos para serem analisados. Esse material foi classificado de modo a se aplicarem os cavacos mais uniformes e com tamanho suficiente para cobrir a esfera integradora do espectrômetro. Os cavacos possuíam dimensões médias de 2,36 cm de comprimento x 2,95 cm de largura x 0,3 cm de espessura. No momento das análises, o material foi separado em 2 lotes com 100 cavacos cada, denominados de lote A e lote B. Enumeraram-se todos os cavacos dos dois lotes para identificação durante os processos.

No lote A, realizou-se a obtenção da massa individual dos cavacos e a imersão em água por cinco dias, até completa saturação. Em seguida, realizou-se a aferição do volume úmido de cada cavaco, por meio do método de deslocamento de água. Após esse procedimento, eles foram distribuídos sobre uma bancada para secagem natural. Durante esse processo, foram obtidas as massas (g) e coletaram-se espectros até que todos os cavacos atingissem o teor de umidade de equilíbrio (T_{Ueq}), que equivale aproximadamente a 13% para a região de Montes Claros, conforme Lima e Mendes (2005). Posteriormente à obtenção de massas e volume, coletaram-se espectros no espectrômetro NIR, modelo Tango, da Bruker.

Após a leitura NIR no T_{Ueq}, os cavacos do lote A foram colocados na estufa, para secagem a $\pm 103^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Ao atingir a condição anidra, quando a umidade se encontrou igual ou bem próxima a 0%, obteve-se a massa do material seco, coletou-se a assinatura espectral e, em seguida, realizou-se a moagem em moinho de facas tipo Willey, modelo STAR FT 50, da Fortinox, e a serragem foi então classificada em peneira

de 40 mesh, para obtenção dos espectros. Posteriormente, a serragem foi acondicionada em sacos plásticos lacrados e encaminhada para o Laboratório de Biodigestão Anaeróbica para obtenção do poder calorífico superior, com o auxílio da bomba calorimétrica, modelo IKA C5003, da Labcontrol.

O lote B foi analisado nas condições de umidade em que eles se encontravam quando coletados no pátio da empresa, logo após a transformação das toras em cavacos. Então, coletaram-se os espectros desses cavacos e eles foram levados para estufa, para secagem a $\pm 103^{\circ}\text{C}$ até massa constante.

5.2.3 Determinação da Densidade Básica

Determinou-se a densidade básica pelo método de deslocamento de água, segundo norma da ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11941/2003, pela relação entre o peso absolutamente seco e o volume saturado dos cavacos, conforme Equação 2:

$$DB = \frac{M_s}{V_u} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

DB: densidade básica (g/cm^3);

Ms: massa seca dos cavacos (g);

Vu: volume saturado dos cavacos (cm^3).

5.2.4 Determinação da umidade da madeira

A umidade foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14929/2003. Para a determinação da massa inicial da madeira, os cavacos foram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g. Em seguida, eles foram inseridos na estufa de secagem, com temperatura máxima de $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Durante a secagem, a massa do material foi aferida a cada 6 horas, até massa constante.

O teor de umidade corresponde à relação entre a massa de água contida no material e a massa da madeira seca. Com o auxílio da equação 1 foi possível obter o seu valor:

$$U \% = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

U%: Percentual de umidade;

m1: massa inicial da madeira (em gramas);

m2: massa da madeira seca (em gramas).

5.2.5 Determinação do Poder calorífico Superior dos cavacos

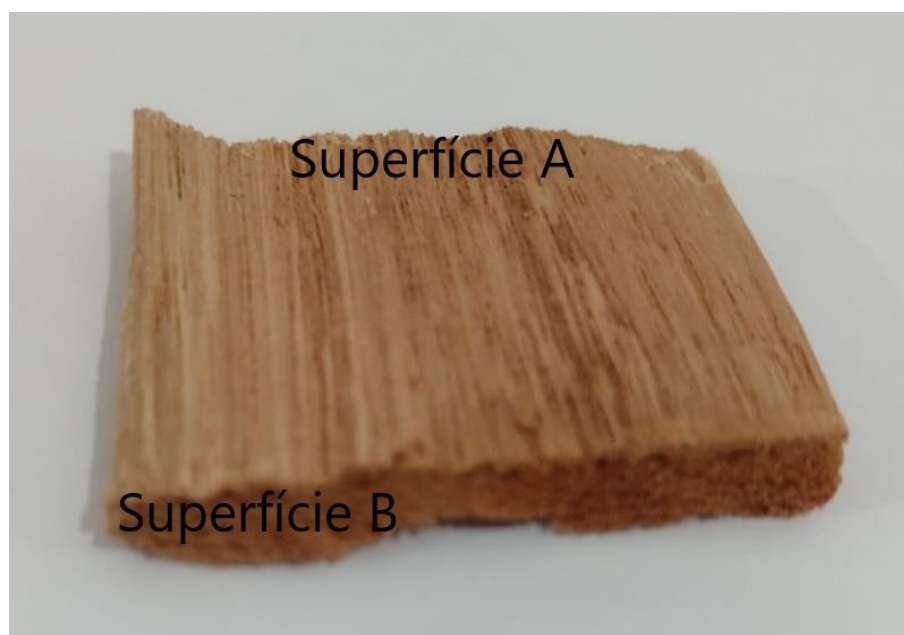
O Poder Calorífico Superior foi obtido com o auxílio de uma bomba calorimétrica adiabática, de acordo com norma da ABNT NBR 8633/1984. A serragem utilizada foi aquela que, depois da moagem em moinho Willey, passou pela peneira n°16 internacional, com malha de 40 mesh, e ficou retida na peneira n° 24 internacional, com malha de 60 mesh.

5.2.6 Coleta dos espectros no infravermelho próximo

Para a obtenção dos espectros NIR, utilizou-se o espectrofotômetro modelo TANGO, da Bruker. Os espectros foram obtidos em modo de reflexão difusa, compreendendo à faixa de 11550 cm^{-1} a 3964 cm^{-1} , com 64 leituras (scans) por amostra e resolução de 16 cm^{-1} .

Conforme relatado por Liang *et al.* (2019), os cavacos possuem 4 superfícies, das quais duas são maiores (Figura 1 – Superfície A) e duas superfícies são pequenas e oblíquas (Figura 1 – Superfície B). Entretanto, de acordo com esses autores, o sinal obtido através da superfície pequena e oblíqua é geralmente fraco e distorcido, devido à pequena área e aos altos ângulos com a radiação incidente. Mediante a tais informações, o espectro foi coletado da maior superfície presente em cada cavaco.

Figura 1 – Superfícies do cavaco



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Já para a coleta do espectro da serragem, ela foi depositada em recipiente composto por quartzo, o qual foi inserido sobre a esfera de integração.

Para a calibração dos modelos do teor de umidade, os espectros foram coletados em cavacos nas condições em que se encontravam no campo e com variação de umidade após a saturação e a perda gradativa de água. Contudo, devido às influências da água nos modelos para as características de densidade básica e poder calorífico, os espectros foram coletados em condição anidra.

Para garantir que variações ambientais extremas, como temperatura e umidade, não interferissem na coleta de espectros, o equipamento foi mantido numa sala com parâmetros controlados.

5.2.7 Calibração do modelo

Os valores de refletância das amostras, que foram coletados nos diversos comprimentos de onda pelo espectrofotômetro NIR, foram enviados para o computador e associados os valores dos espectros com os valores das análises convencionais obtidos em laboratório.

Para calibração do modelo, utilizou-se o “software” *OPUS 7.8*, pacote *Quant 2*. Aplicou-se a análise de regressão Mínimos Quadrados Parciais (PLS), que estabelece as relações entre as informações contidas nos espectros e as características de interesse. Os modelos foram ajustados com o número de variáveis latentes (Rank) necessário para fornecer o melhor ajuste, ou seja, o valor que minimiza a raiz do erro padrão médio e aumenta o coeficiente de determinação (R^2), sendo obtido através do coeficiente de correlação.

Realizou-se a validação cruzada, utilizando-se os mesmos espectros aplicados no processo de calibração, adotando-se o método *leave one out* (deixe um de fora).

Antes das calibrações, foi necessária a aplicação de tratamentos matemáticos espectrais. Além disso, amostras consideradas anômalas no experimento, com alto *leverage* e alta variância residual, visivelmente distintas das demais, foram detectadas em análises gráficas como *outliers* e posteriormente excluídas do modelo.

5.2.8 Seleção das Calibrações

Para desenvolvimento dos modelos calibrados para predição, foram adotados os seguintes critérios de seleção:

- Coeficiente de determinação (R^2) com valores mais próximos de 1, calculado de acordo com a equação 1:

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad \text{Equação 1}$$

- Raiz quadrada do erro médio da calibração e validação (RMSE), com valores mais próximos de zero, calculando-se de acordo com a equação 2:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)} \quad \text{Equação 2}$$

- Número de variáveis latentes (Rank) com o menor valor possível, porém adequado para cada modelo, ajustado pelo *software*;
- Bias da validação, que é o de desvio sistemático entre o valor real e o predito, sendo que quanto menor for, melhor é o modelo, calculando-se de acordo com a equação 3:

$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - \hat{y})}{N} \quad \text{Equação 3}$$

- Relação de desempenho do desvio (RPD), sendo os melhores valores acima de 1,5, calculada de acordo com a equação 4:

$$\text{RPD} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})}}{\sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y} - \text{bias})^2}} \quad \text{Equação 4}$$

5.3 Resultados

5.3.1 Valores médios obtidos nas análises convencionais

Na Tabela 1, encontram-se os valores médios obtidos para a densidade básica, a umidade e o poder calorífico superior da madeira nas análises convencionais.

Tabela 1 – Valores mínimos, médios e máximos das características estudadas

Característica	Média	Mínimo	Máximo
Densidade básica (g/cm ³)	0,57	0,27	0,61
Umidade – Lote A (%)	45,74	4,83	161,8
Umidade – Lote B (%)	58,98	4,35	281,6
Poder calorífico superior (cal/g)	4157	3612	4391

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

5.3.2 Calibração e validação dos modelos

Estão descritos, na Tabela 2 e na Tabela 3, os resultados das estatísticas para avaliação da qualidade dos modelos gerados, bem como as regiões de frequência utilizadas para obtenção dos modelos.

Tabela 2 – Resumo estatístico da calibração dos modelos

Calibração						
Característica/Lote	Pré-processamento	R²	RMSE	RPD	Rank	Regiões de frequência (cm⁻¹)
Densidade básica/Lote A (g/cm ³)	2°derivada+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,96	0,0099	5,08	7	9400 até 7496; 4600 até 4424
Umidade/Lote A (%)	1° Derivada + Variação normal padrão (SNV) (13 pts)	0,82	8,95	2,39	8	9000 até 7496; 6104 até 5448; 4600 até 4424.
Umidade/Lote B (%)	1°derivada+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,94	5,04	4,36	6	9400 até 5448; 4600 até 4248
Poder calorífico superior/Lote A (cal/g)	1°derivada+ Correção de espalhamento multiplicativo (MSC)+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,87	17,1	2,87	6	9400 até 7496; 4600 até 4248

Nota: R²: Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio; RPD: Relação de desempenho do desvio RANK: Número de variáveis latentes.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Tabela 3 – Resumo estatístico da validação dos modelos.

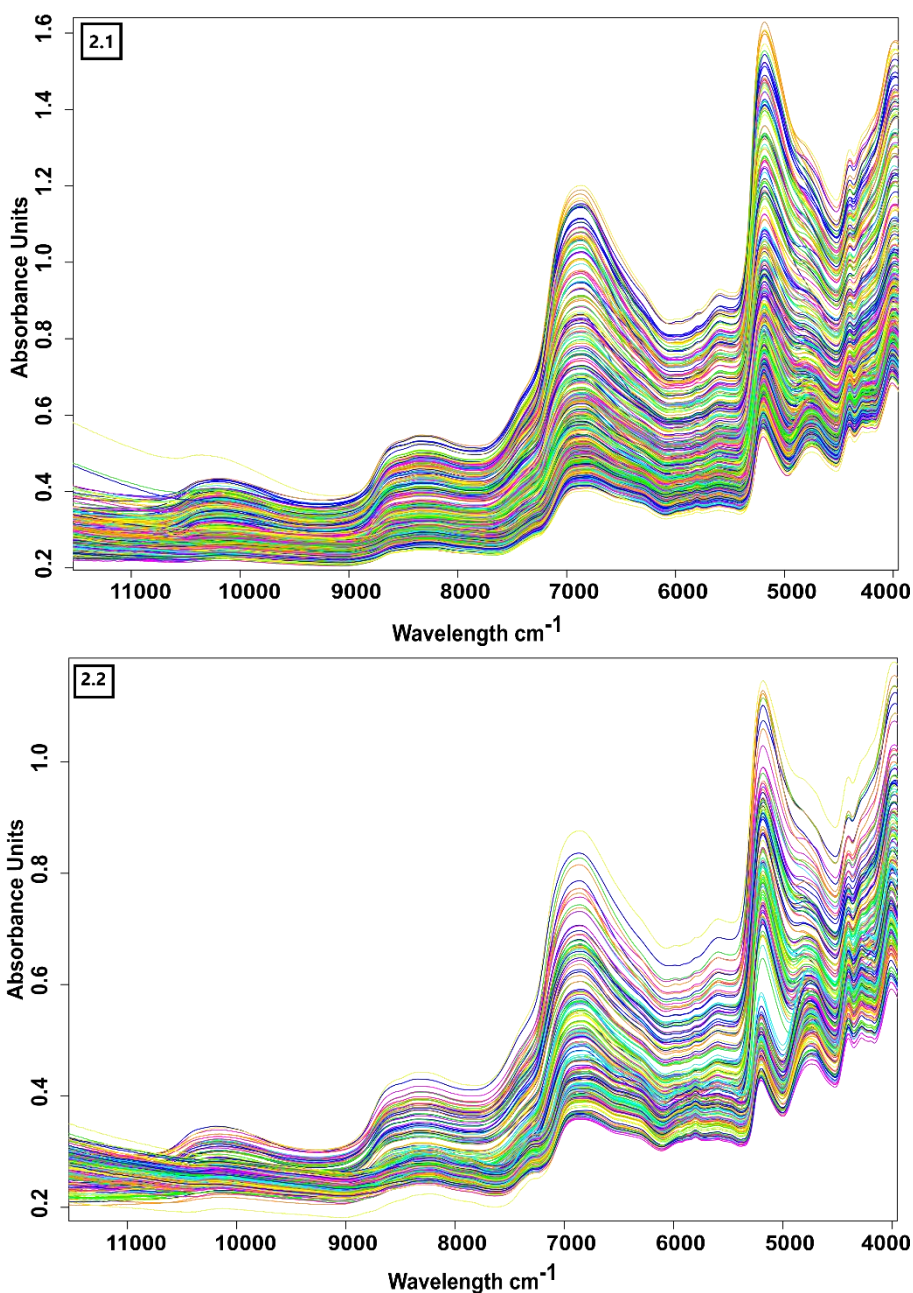
Validação						
Característica/Lote	Pré-processamento	R ²	RMSE (%)	RPD	Bias	Regiões de frequência (cm ⁻¹)
Densidade/Lote A (g/cm ³)	2°derivada+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,83	0,0192	2,46	-0,00026	9400 até 7496; 4600 até 4424
Umidade/Lote A (%)	1° Derivada + Variação normal padrão (SNV) (13 pts)	0,81	9,17	2,31	0,00385	9000 até 7496; 6104 até 5448; 4600 até 4424.
Umidade/Lote B (%)	1°derivada+ Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,9	6,6	3,2	-0,135	9400 até 5448; 4600 até 4248
Poder calorífico superior/Lote A (cal/g)	1°derivada+ Correção de espalhamento multiplicativo (MSC)+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,74	23,7	1,98	-0,289	9400 até 7496; 4600 até 4248

Nota: R²: Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio da validação; RPD: Relação de desempenho do desvio BIAS: é o de desvio sistemático entre o valor real e o predito.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Na Figura 2, está em evidência os espectros obtidos dos cavacos dos lotes A (2.1) e B (2.2) com variação de umidade. Estes não possuem qualquer pré-processamento espectral. Os espectros coletados nos dois lotes apresentaram o maior pico de absorção, com comprimento de onda variando de 4839 cm⁻¹ até 5469 cm⁻¹, sendo que, conforme ocorreu a perda de umidade até a condição de equilíbrio com o ambiente, os picos espectrais se reduziram.

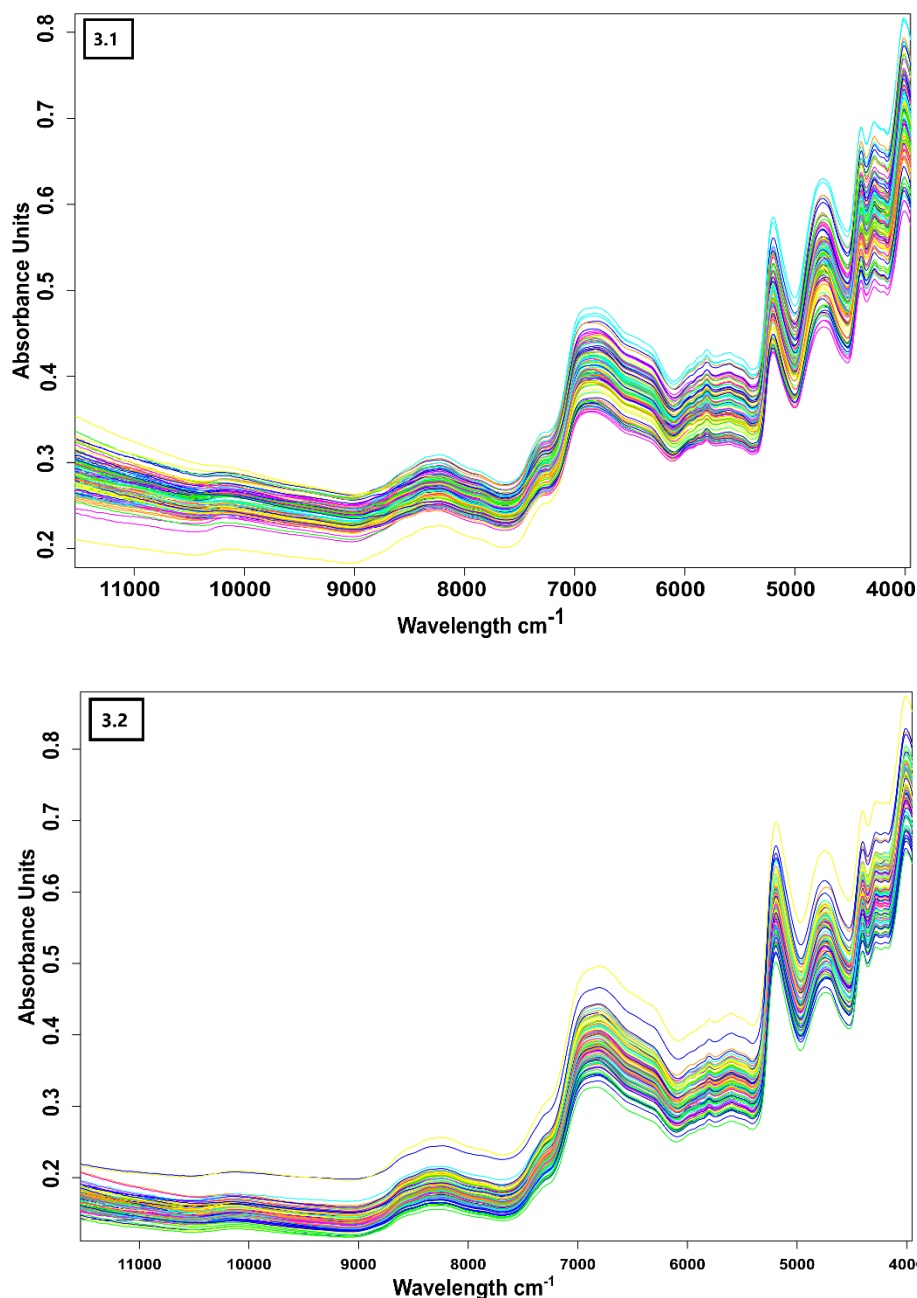
Figura 2 - Espectros dos Lotes A e B com variação de umidade e sem pré-processamento



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Já na Figura 3, visualizam-se os espectros obtidos dos cavacos após a secagem em estufa e atingir a condição anidra (3.1) e os espectros da serragem (3.2) dos cavacos secos, ambos sem pré-processamento espectral. Nota-se que os picos dos espectros apresentados nessas condições possuem valores de absorvância menores dos que os da figura anterior, diante da condição de ausência da água de capilaridade e adesão, sobrando apenas a água de constituição química. Nesse caso, o maior pico observado está no comprimento de onda próximo a 4106 cm^{-1} até 3949 cm^{-1} .

Figura 3 - Espectros dos cavacos do Lote A (3.1) e da serragem (3.2) em condição anidra e sem pré-processamento

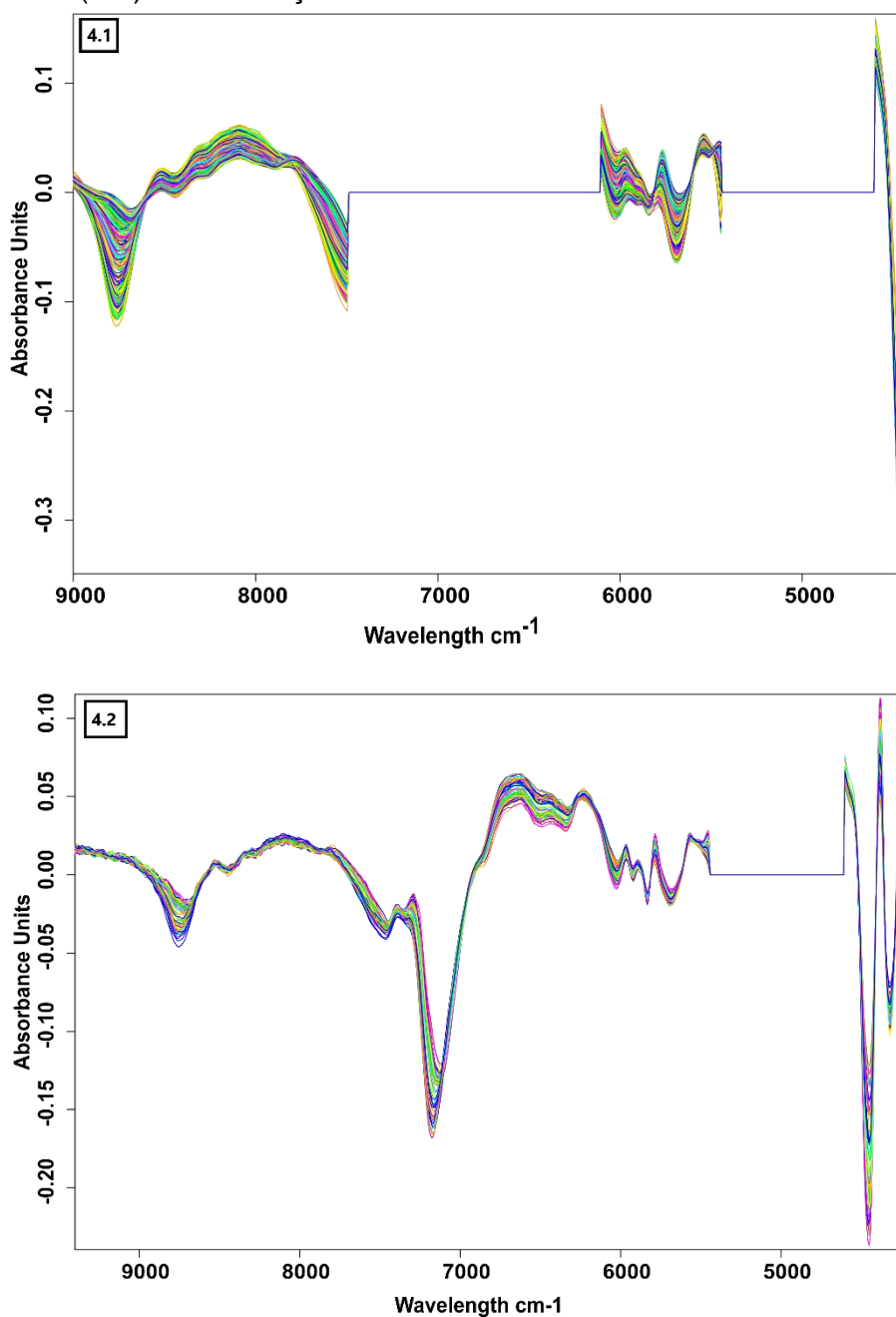


Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Na Figura 4 apresentada a seguir, encontram-se os espectros processados para o modelo de umidade resultante dos dois lotes avaliados. Ressalta-se que os espectros elucidados passaram pelos pré-processamentos da Primeira Derivada + Normalização vector (SNV) e 13 pontos de suavização e exclusão de *outliers* para o lote A (4.1) e Primeira Derivada + Normalização vector (SNV) e 5 pontos de suavização e exclusão de *outliers* para o lote B (4.2). Além disso, estão ressaltadas as regiões de frequência

utilizadas para calibração dos modelos.

Figura 4 – Espectros pré-processados do lote A (4.1) e B (4.2) com variação de umidade

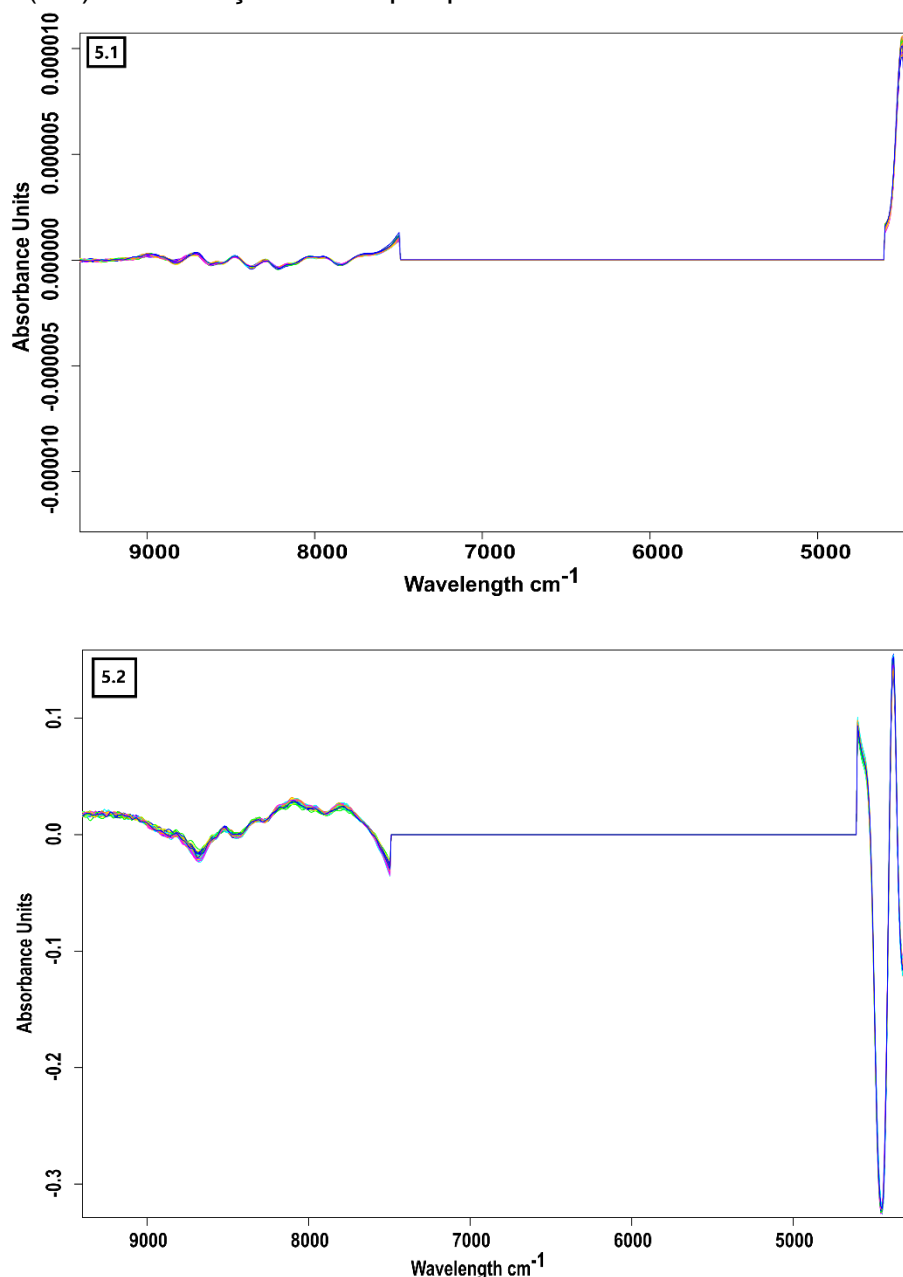


Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Já na Figura 5 constam os espectros processados para os modelos de densidade (5.1) e poder calorífico (5.2). O pré-processamento espectral aplicado foi Segunda Derivada + Normalização vector (SNV) e 17 pontos de suavização e exclusão de *outliers* para o modelo de densidade básica e Correção de espalhamento multiplicativo (MSC) + Primeira Derivada + Normalização vector (SNV) e 5 pontos de suavização e exclusão de

outliers para o modelo de poder calorífico. Além disso, estão ressaltadas as regiões de frequência utilizadas para calibração dos modelos.

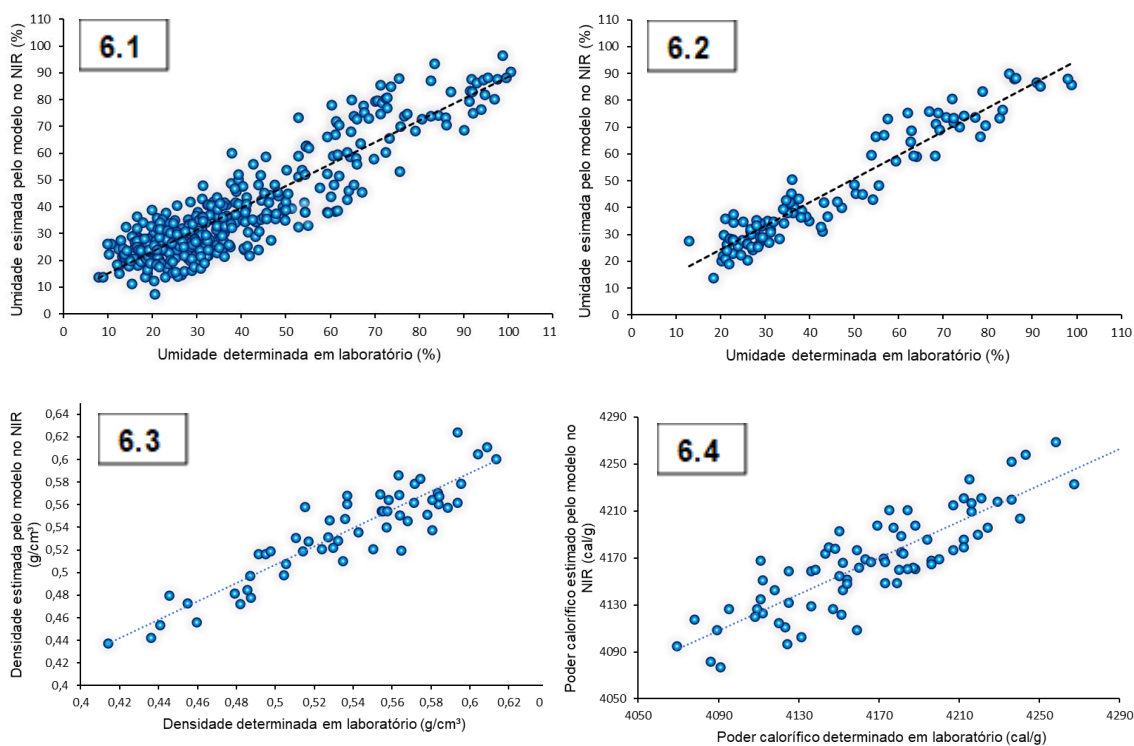
Figura 5 - Espectros dos cavacos do Lote A (5.1) e da serragem (5.2) em condição anidra pré-processados



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Na figura 6, observa-se que os modelos obtiveram bons resultados estatísticos, com valores de umidade dos Lotes A (6.1) e B (6.2), densidade (6.3) e poder calorífico (6.4) obtidos na validação cruzada estimados via NIR bem próximos aos determinados na análise laboratorial.

Figura 6 - Características determinadas em laboratório x estimadas no NIR



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

5.4 Discussão

Observa-se a predominância das derivadas no processamento espectral (Tabelas 1 e 2), que tem ação objetivada em corrigir os desvios de linha-base, os quais são comuns em espectros NIR, podendo ser causados pela presença de um sinal de fundo (*offset*), que precisa ser corrigido por causa de variações instrumentais ou compensação inadequada do branco (*background*). A correção de dispersão multiplicativa (MSC) e a variação normal padrão (SNV) já são técnicas comumente aplicadas para eliminação de desvios causados pelo espalhamento de luz, podendo ser causado pela diferença na homogeneidade e densidade do material (TIBOLA *et al.*, 2018).

Para a geração dos modelos de calibração, utilizaram-se apenas algumas faixas de comprimento de onda. Esta foi uma opção adotada para a sua melhoria, identificando pequenas quantidades de comprimento de onda que estão intrinsecamente relacionadas com as propriedades de interesse e as informações contidas nelas foram aplicadas para geração dos modelos (MORA *et al.*, 2011).

Observam-se, nas figuras 1 e 2, as respostas espectrais correspondentes aos comprimentos de ondas equivalentes a determinadas substâncias, em especial nos comprimentos entre 5200 e 5050 cm⁻¹ referentes à água presente na madeira.

Entretanto, as bandas próximas a 7000 cm^{-1} e 6287 cm^{-1} são relacionadas, respectivamente, à região amorfa e à cristalina da celulose. A região entre $6900\text{--}6850\text{ cm}^{-1}$ associa-se com a combinação dos grupos CH dos anéis aromáticos e os grupos OH fenólicos da lignina e extrativos. Os comprimentos de onda próximos a $9403,8\text{ cm}^{-1}$ até $7498,3\text{ cm}^{-1}$ e 6102 até $5446,3\text{ cm}^{-1}$ são fortemente associados à vibração CH na estrutura de CH, CH₂, CH₃ da lignina e celulose. Já as regiões próximas a 4424 cm^{-1} são características do alongamento OH e CO dos grupos acetil. (SCHWANNINGER *et al.*, 2011).

Para geração dos modelos, utilizaram-se maiores informações a partir do comprimento de onda 9000 cm^{-1} . A eliminação dos comprimentos de onda entre a região 12.000 cm^{-1} e 9000 cm^{-1} corroborou a redução de ruídos e o aumento da qualidade das variáveis espectrais (AMARAL *et al.*, 2020). É interessante frisar que as variáveis que corroboram os modelos são aquelas em que sua presença durante o ato de validação/calibração auxiliam no aumento do R² e na redução do RMSE. Logo, quando se exclui variáveis que não se somam estaticamente ao modelo, espera-se uma melhora dos parâmetros.

A partir dos dados indicados na Tabela 2 e dos gráficos apresentados na Figura 5, é possível analisar os resultados estatísticos da calibração e validação dos modelos. Na análise dos resultados dos modelos de densidade básica, nota-se que, apesar dos valores altos do coeficiente de determinação (R²) de calibração, na validação eles foram inferiores, variando de 0,96 da calibração para 0,83 da validação. Consequentemente, a raiz quadrada do erro médio também aumentou da calibração para validação do modelo e o RPD reduziu.

No processo de validação, o modelo desenvolvido é avaliado para previsão das amostras escolhidas. Então, nessa etapa é possível tirar conclusões mais efetivas sobre o funcionamento do modelo calibrado e sua possibilidade de aplicação efetiva. Entretanto, suas estatísticas possuem maior importância na avaliação da possibilidade de efetiva utilização do modelo. Nesses casos, as estatísticas do processo de validação mostraram que os modelos possuem boa atuação na predição de características, mas inferiores as da calibração.

Ao analisar os trabalhos realizados para predição dessas características utilizando-se a espectroscopia no infravermelho próximo, observam-se resultados similares. Acqua *et al.* (2018), ao construírem modelos PLS baseados em NIR para prever a densidade básica de *Pinus loblolly*, obtiveram R² da validação cruzada = 0,7 com RMSECV de 0,036

g/cm³. Já Liang *et al.* (2019) obtiveram valores de R² da validação = 0,87 e RMSE = 17, 61 Kg/ m³ para modelos de densidade básica gerados para cavacos de Álamo. Inagaki *et al.* (2010) trabalharam com a construção de modelos de densidade básica para *Eucalyptus camaldulensis* e reportaram um R² da validação cruzada de 0,89 com 0,020 g/cm³ de RMSE, RPD = 3,1, Rank=8 e Bias de -0,007, modelo calibrado na região de frequência 9.993 cm⁻¹ até 4.597 cm⁻¹. Gouvêa *et al.* (2011), por sua vez, construíram modelos com R² de 0,84 e RMSE de 0,017g/cm³ para *Eucalyptus*.

Os coeficientes de correlação resultantes da calibração e validação do modelo com variação de umidade elaborado para o Lote B foram maiores do que aqueles provenientes do Lote A. Então, apesar de o lote A apresentar resultados de R² bem próximos de 1 para calibração e validação, é possível inferir que as variáveis preditoras do lote B conseguiram explicar melhor as variações contidas na característica predita por este modelo.

Assim como na calibração, a validação do modelo B também resultou em um RMSE menor, com uma diferença de 2,57% entre o RMSE dos dois lotes. No que se refere à relação de desempenho do desvio padrão (RPD), os valores variaram entre 2,31 e 3,2, sendo que os menores resultados também foram apresentados no modelo resultante do Lote B. Esses valores são considerados apropriados para aplicação no setor florestal, pois, conforme Schimleck *et al.* (2003), RPD com valores superiores a 1,5 apresenta aplicação satisfatória na área de ciências florestais. Além destes, os valores de Bias encontrados na validação também foram menores para o modelo do Lote B, assim como o número de variáveis latentes.

Os resultados de R² e erro obtidos nesse trabalho não se distanciam dos observados na literatura para modelos de umidade. Amaral *et al.* (2020), ao avaliarem o teor de umidade da madeira com auxílio dos espectros em NIR e da calibração de modelos, também para cavacos de *Eucalyptus*, obtiveram modelo com R² = 0,96 e RMSE = 7,15%. Por sua vez, Liang *et al.* (2019) também avaliaram a construção de modelos com a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo para geração de modelos preditivos de umidade de cavacos de madeira de Álamo e obtiveram valores de R²cv = 0,99 e RMSE = 2,51%. A literatura tem reportado trabalhos utilizando discos e cunhas para avaliação. Mora *et al.* (2011) apontaram um R² de 0,85 e RMSE de 2% para modelo de umidade elaborado com discos de *Pinus taeda*. Já Watanabe *et al.* (2011) aplicaram o NIR e a PLS-R para estimar o teor de umidade da madeira verde de *Tsuga heterophylla* e resultaram em regressão com R²= 0,93 e RMSEP= 5,70%, constatando que a técnica

pode ser aplicada para prever a umidade de maneira adequada.

Já na análise dos resultados estatísticos do modelo de poder calorífico superior, nota-se comportamento semelhante e observado no modelo de densidade básica com variação de 0,87 da calibração para 0,74 na validação. Nesse caso, a raiz quadrada do erro médio também aumentou da calibração para validação dos dois modelos e ocorreu a redução do RPD.

No que se refere aos trabalhos encontrados para a característica do poder calorífico, Posom *et al.* (2016), realizando a caracterização de pellets de *Leucaena leucocephala*, desenvolveram modelos de calibração em NIR por regressão PLS para o poder calorífico superior e encontraram R^2 da validação = 0,964, RMSE = 79,2 J/g e RPD de 5,3 com 4 variáveis latentes. Já Magalhães *et al.* (2003) obtiveram um R^2 = 0,51 e erro médio da validação cruzada de 124,56 cal/g para modelos de poder calorífico superior de espécies de *Pinus maniminoi*, *Eucalyptus grandis*, *E. badjensis*, *E. paniculata*, *E. robusta*, *E. smithii*, *E. viminalis* e híbrido cambiju.

Mancini *et al.* (2018) conseguiram, para cavacos de madeira, obter um R^2 da validação de 0,81 e RMSE de 289 J/g, com RPD de 2,5 e 5 variáveis latentes. Porém, Giovanella *et al.* (2006), trabalhando com amostras de *Eucalyptus grandis*, obtiveram um coeficiente de determinação para a curva de calibração de 0,82 e igual a 0,27 para validação externa. Além disso, obtiveram erro percentual médio observado na predição, para validação externa, entre os valores referência e os valores preditos (estimados) pela curva de calibração, de 8,16%.

A análise das Figuras 5 e 6 possibilita a discussão em relação ao nível de umidade da madeira e a eficiência do NIR em transportar informações de forma eficiente. Quando a madeira dos dois lotes esteve com umidade inferior ou até o ponto de saturação das fibras, o modelo apresentou dados estimados pela validação cruzada com NIR mais próximos dos valores obtidos em laboratório. Isto se deve à condição do NIR de conseguir realizar a captação de informações de maneira mais eficiente quando a madeira está com teor de umidade inferior ao PSF. Acima deste, há ampla absorção de bandas de água livre no lúmen das células que frequentemente se sobrepõem a sinais informativos relacionados à propriedade da madeira. Assim, a forte banda O-H na água afeta a precisão do modelo de calibração (Liang *et al.*, 2019).

Através desses resultados, é possível observar o potencial para utilização dos modelos na predição das características de densidade básica, teor de umidade e poder calorífico superior aplicado à indústria energética. Vale ressaltar que sempre que houver

troca de material genético ou observar maior variação das características do que as contidas neste trabalho, deve-se realizar a implementação de novos dados de calibração, para que o modelo fique cada vez mais robusto e proporcione estimativas mais precisas.

Sugere-se, em trabalhos futuros, a realização de experimentos adicionais que permitam aplicar a análise não destrutiva nas condições operacionais da empresa. Por exemplo, análises em NIR portátil, para que maior número de amostras possa ser avaliado e em tempo real. A utilização de câmeras de infravermelho próximo em veículos aéreos não tripulados (VANTS) também pode ser citada como uma promissora técnica na estimativa dos parâmetros de qualidade em nível de pátio, utilizando-se do emprego de *machine learning* e *deep learning*, trazendo maior operacionalidade às amostras e classificação na venda do produto de biomassa.

5.5 Conclusão

De acordo com as estatísticas de regressão geradas, os modelos construídos com o auxílio da espectroscopia no infravermelho próximo mostram-se como potenciais para predição das características da madeira. Porém, faz-se necessário observar as condições de umidade em que o material se encontra, devido às fortes influências da água na geração desses modelos. A técnica de espectroscopia no infravermelho próximo pode ser utilizada com assertividade associada, mediante os cuidados técnicos estatísticos no ato de calibração do modelo.

5.6 Referências

AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M.; COSTA, E. V.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. **Maderas. Ciencia y Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000304>.

ACQUAH, G.E.; ESSIEN, C.; VIA, B.K.; BILLOR, N.; ECKHARDT, L.G. Estimating the basic density and mechanical properties of elite loblolly pine families with near infrared spectroscopy. **Forest Science**, v. 64, n.2, p.149-158. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxx009>.

BARREIROS, R.M.; RIBEIRO, G. P.; DIAS, K. B.; GOUVÊA, C. F.; REIS, A. M. F.; SILVA, G. C. Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**, p. 146-164, 2021. <http://dx.doi.org/10.37885/210203332>.

CARNEIRO, A. de C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R.V. O.; SANTOS, R. C. dos; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**,

v. 38, n. 2, p. 375-381, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622014000200019>.

DIAS, J., A.F.; PIROLA, L.P.; TAKESHITA, S.; LANA, A.Q.; BRITO, J.O.; ANDRADE, A.M. Hígroscopicity of charcoal produced in different temperatures. **Cerne**, v.22, n.4, p. 423- 430, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622032175>

DIESEL, K. M. F.; COSTA, F. S. L.; PIMENTA, A. S.; LIMA, K. M. G. Near-infrared spectroscopy and wavelength selection for estimating basic density in *Mimosa tenuiflora* [Willd.] Poiret wood. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 949-959, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0652-1>.

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, R. F.; 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, FEV 2017.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.2, p.349-358, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200019>.

GALLIO, E.; SANTINI, E.J.; GATTO, D.A.; SOUZA, J.T.; RAVASI, R.; MENEZES, W.M.; FLOSS, P.A.; BELTRAME, R.. Caracterização Tecnológica da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 244-250, 30 set. 2016. <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n3p244-250>.

GIOVANELLA, R.; SCHEFFER, S. V.; TAVERNA, L.; MAGALHAES, W. L. E. Predição do poder calorífico em *Eucalyptus grandis* através da espectroscopia de infravermelho próximo (NIR). In: **EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA FLORESTAS**, 2006, Colombo. Embrapa Florestas, 2006. v. 5.

INAGAKI, T.; SCHWANNINGER, M.; KATO, R.; KURATA, Y.; THANAPASE, Warunee; PUTHSON, P.; TSUCHIKAWA, S. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science And Technology**, v. 46, n. 1-3, p. 143-155, 2 out. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-010-0379-6>.

LIANG, Long; FANG, Guigan; DENG, Yongjun; XIONG, Zhixin; WU, Ting. Determination of Moisture Content and Basic Density of Poplar Wood Chips under Various Moisture Conditions by Near-Infrared Spectroscopy. **Forest Science**, v. 65, n. 5, p. 548-555, 20 maio 2019. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz007>.

MAGALHAES, W. L. E.; MUNIZ, GRACIELA, I.B.; PEREIRA, J. C. D.; KLOCK, U. ; SILVA, J. R. M. . Determinação de propriedades de madeira através do infravermelho próximo. In: 8 CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. Benefícios, Produtos e Serviços da Floresta., 2003, SÃO PAULO. 8 CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. Benefícios, Produtos e Serviços da Floresta. São Paulo: Sociedade brasileira de Silvicultura, 2003.

MANCINI, M.; RINNAN, A.; PIZZI, A.; TOSCANO, G.. Prediction of gross calorific value and ash content of woodchip samples by means of FT-NIR spectroscopy. **Fuel Processing Technology**, v. 169, p. 77-83, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.021>.

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. <https://doi.org/10.1255/jnirs.947>.

OLIVEIRA, H.G.B.; SOUSA, M.V.C.; SILVA, L.S.S.; FILHO, A.C.F.; RIBERO A. Propriedades energéticas da madeira e casca de *Dalbergia cearensis* Ducke. v.15, n.3, p. 232-237, Edição Especial VI CONEFLO, 2019.

POSOM, J.; SHRESTHA, A.T; SAECHUA, W.t; SIRISOMBOON, P. Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. **Energy**, v. 107, p. 464-472, jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.041>.

ROSA, Tammy Scarlett Balbina Sales. **Potencial energético da eichhornia crassipes (aguapé) e da Pistia stratiotes (alface d'água)**. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016. Disponível em: < <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/188> >.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. Bioenergia e Biorrefinaria, Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais. Viçosa, MG, 2013.

SCHIMLECK 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, p.2433–2437. (2003) <http://dx.doi.org/10.1021/jf020981u>.

SCHWANNINGER, M., RODRIGUES, J.C.; FACKLER, K. A Review of Band Assignments in Near-Infrared Spectra of Wood and Wood Components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.19, p.287-308, 2011 <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.955>.

VIANA, L. C. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de Eucalyptus**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 120 f, 2008.

WATANABE, K.; MANSFIELD, S. D.; AVRAMIDIS. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green, hem-fi timber. **Journal Wood Science**, v. 77, n. 1, p. 288-294, 2011.

6. CAPÍTULO III: PREDIÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA, UMIDADE E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE CAVACOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR).

6.1 Introdução

Diante das variações existentes nos atributos da madeira, fazem-se necessárias avaliações das suas características para adequadas aplicações (TRUGILHO *et al.*, 2007). Dentre as possibilidades de utilização da madeira, encontra-se a indústria de geração de energia, que realiza a sua combustão para geração de calor.

Quanto maior a geração de calor do material, maior é a quantidade de energia desprendida após a combustão completa, ou seja, maior é o seu poder calorífico (SANTOS *et al.*, 2011). Porém, variáveis como a umidade e a densidade básica da madeira influenciam na quantidade de energia liberada, tornando-se crucial a avaliação conjunta dessas características. Quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico (CARNEIRO *et al.*, 2014). Já a umidade possui relação inversa: ela pode diminuir o rendimento gravimétrico, pois parte do material lenhoso é queimado para retirar a água na forma de vapor, o que reduz o poder calorífico do material lenhoso (ROUSSET *et al.*, 2011).

A técnica de espectroscopia no infravermelho próximo tem sido adotada nos últimos anos para avaliação da madeira. Ela já se mostrou efetiva para predição de características químicas (HANS; ALISSON, 2021; LENGOWSKI *et al.*, 2018), mecânicas (SHUKLA; SHARMA, 2021), físicas (TOSCANO *et al.*, 2022; AMARAL *et al.*, 2020; LIANG *et al.*, 2019; ROSSO *et al.*, 2013; LAZAROTTO; MAGALHÃES, 2014) e anatômicas (NISGOSKI *et al.*, 2015; HEIN *et al.*, 2012). Também apresenta resultados promissores para avaliação de biomassa para indústria energética (SILVA *et al.*, 2014, POSOM *et al.*, 2016; ARRIEL, 2017; MANCINI *et al.*, 2018).

Para a adesão da técnica NIR a fim de realizar previsões qualitativas e quantitativas de materiais, é necessário aplicar o princípio da comparação de resultados, em que se determinam os parâmetros das amostras com as análises convencionais de laboratório e os associam com os dados espectrais gerados pelo espectrômetro (VIANA, 2008). Em posse desses dados, realiza-se a calibração do modelo que melhor represente e/ou relacione as informações obtidas por métodos convencionais, que são fixados como uma referência com os dados espectrais (PANTOJA, 2006). Utilizando-se a equação de calibração, é possível prever, com bom grau de confiabilidade, propriedades de amostras provenientes da população que até então não foram avaliadas (ARRIEL, 2017).

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi realizar a predição de densidade

básica, umidade e poder calorífico de cavacos, através de modelos gerados por espectroscopia no infravermelho próximo, e assim avaliar as características da madeira estudada para aplicação na indústria de geração de energia.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Material genético e procedimento de coleta dos cavacos

Para a predição das características utilizaram-se novos lotes de cavaco, coletados em diferentes datas no pátio de processamento da empresa Nova Esperança, localizada na cidade de Montes Claros, na região Norte de Minas Gerais, totalizando 100 cavacos amostrados. O material genético e o procedimento de coleta estão descritos no item 5.2.1 do capítulo 2.

6.2.2 Modelos utilizados para predição

Para predição de densidade básica, umidade e poder calorífico dos cavacos, foram utilizados os modelos apresentados na Tabela 1, sendo que a metodologia de calibração está disposta no item 5.2.7 do capítulo 2.

Tabela 1- Modelos utilizados na predição

Característica/Lote	Pré-processamento	R ²	RMSE (%)	RPD	Bias	Regiões de frequência (cm ⁻¹)
Densidade/Lote A (g/cm ³)	2°derivada+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,83	0,0192	2,46	-0,00026	9400 até 7496; 4600 até 4424
Umidade/Lote B (%)	1°derivada+ Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,9	6,6	3,2	-0,135	9400 até 5448; 4600 até 4248
Poder Calorífico Superior/Lote A (cal/g)	1°derivada+ Correção de espalhamento multiplicativo (MSC)+Variação normal padrão (SNV) (5 pts))	0,74	23,7	1,98	-0,289	9400 até 7496; 4600 até 4248

Nota: R²: Coeficiente de determinação; RMSE: Raiz quadrada do erro médio da validação; RPD: Relação de desempenho do desvio BIAS: é o de desvio sistemático entre o valor real e o predito.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

6.2.3 Coleta dos espectros das amostras

Os espectros utilizados na predição foram obtidos na mesma condição de umidade

utilizada na calibração dos modelos. Para predição da umidade, os cavacos estavam na condição de campo, mas para predição da densidade básica, eles estavam em condição anidra, e para o poder calorífico superior, utilizou-se a serragem, também em condição anidra. Essa condição foi estabelecida mediante a observância da influência negativa da água na predição da densidade básica e poder calorífico, na tentativa de realizar suas predições em condições mais próximas ao determinado pelas normas de realização em laboratório de maneira convencional.

A serragem utilizada passou pela peneira de 40 mesh após o processamento dos cavacos no moinho tipo Willey. Para que o material atingisse a condição anidra, ele foi seco em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$, até massa constante.

As configurações do espectrômetro e o método de aquisição estão de acordo com a metodologia descrita no item 5.2.6 do capítulo 2.

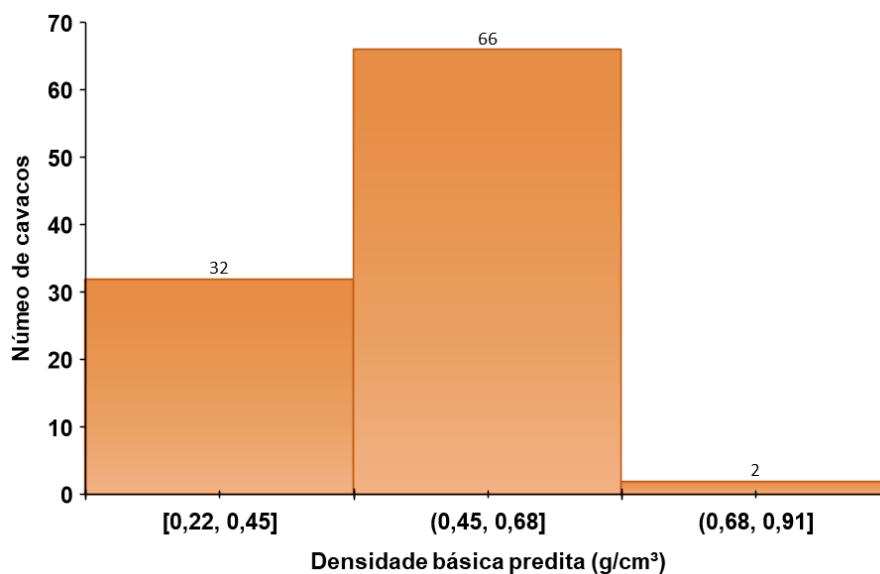
6.2.4 Análise dos resultados

Para interpretação dos resultados foram elaborados histogramas de frequência com os valores estimados pelos modelos e estes foram comparados com a literatura para materiais destinados para produção de energia.

6.3 Resultados

Na Figura 1, é possível observar o histograma de frequência dos valores preditos da densidade básica (g/cm^3). A soma da quantidade de cavacos presente em cada intervalo do eixo x corresponde ao número total de cavacos utilizados para predição (100 cavacos). Destes 100, 66 apresentaram densidade básica entre a faixa de $0,45 \text{ g}/\text{cm}^3$ a $0,68 \text{ g}/\text{cm}^3$.

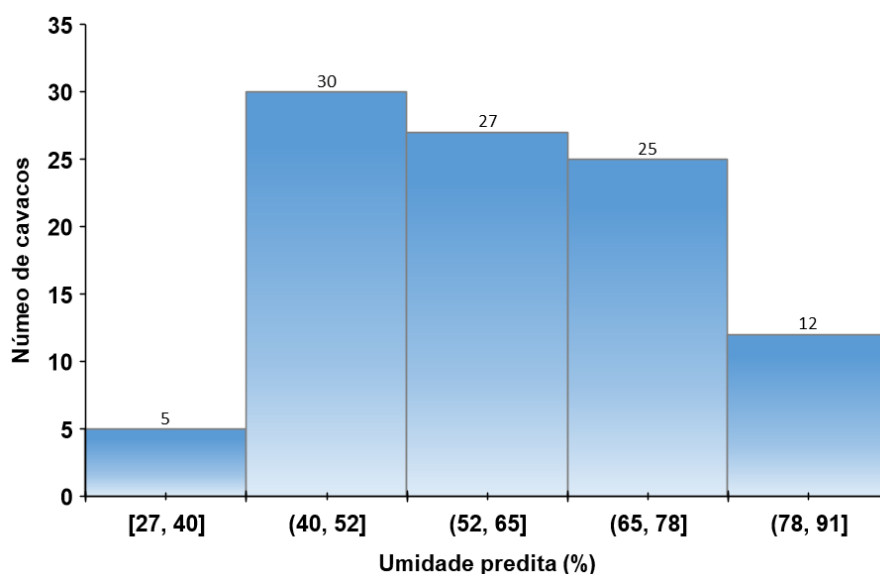
Figura 1 - Predição por espectroscopia NIR da densidade básica dos cavacos



Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Já na Figura 2, encontram-se os valores preditos de umidade (%) com o modelo calibrado na região do NIR, para os cavacos coletados diretamente do pátio de produção da empresa. Nota-se que as maiores quantidades de cavacos, cerca de 30 dos 100 lidos, encontram-se na faixa de 40% até 52%.

Figura 2 - Predição por espectroscopia NIR da umidade dos cavacos

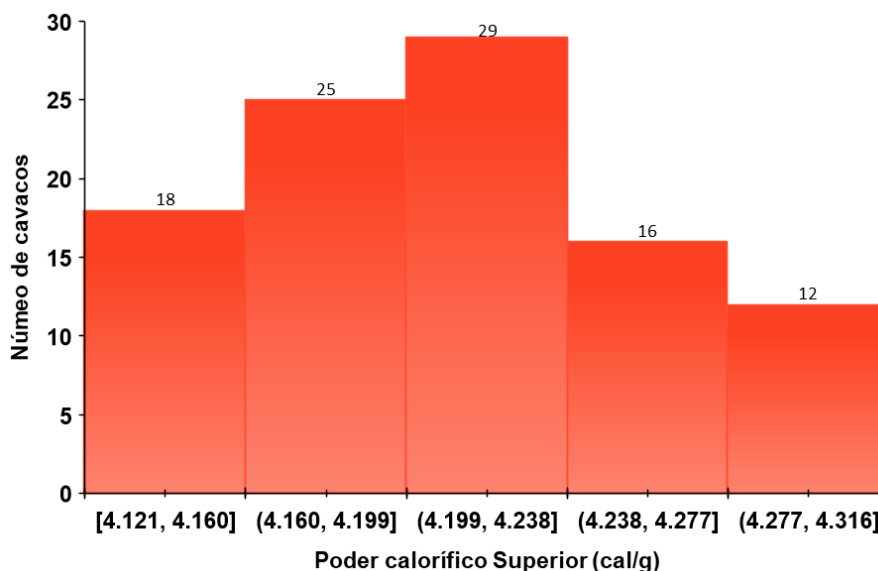


Fonte: Elaborado pela autora, 2022

A Figura 3 expõe o histograma de frequência dos valores preditos do poder calorífico superior (cal/g), com maior quantidade de cavacos (29) concentrados entre

4199 a 4238 g/cm³.

Figura 3 - Predição por espectroscopia NIR do poder calorífico superior dos cavacos



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

6.4 Discussão

A estimativa da densidade básica variou de 0,22 g/cm³ a 0,91 g/cm³. De acordo com Foekel (2019), as madeiras de eucalipto podem ser classificadas em densidade baixa, valor menor que 0,45 g/cm³, densidade média, valor entre 0,46 a 0,54 g/cm³, densidade alta, entre 0,55 a 0,65 g/cm³, e densidade muito alta, para valor maior que 0,65 g/cm³. Sendo assim, a média dos valores preditos dos cavacos estudados aqui neste trabalho pode ser classificada como de densidade média.

Existe uma diferença associada para a densidade básica de madeira proveniente das diferentes partes do tronco e distintos indivíduos de uma mesma espécie. Ela também pode ser afetada por variações externas de microclima, solo, precipitação, de adubação e idade da árvore (HSING, 2016). Alguns autores identificaram um padrão para a variação da densidade básica dentro do tronco de uma árvore, em que ela decresce até o meio do tronco e a partir deste ponto cresce até o topo, para clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (ALZATE *et al.*, 2004; SOUZA 2012; ALMEIDA *et al.*, 2016). Assim, é possível que os menores valores resultantes da análise neste trabalho tenham sido obtidos de cavacos de secções do tronco ou indivíduos de menor densidade.

Quando se trata de densidade básica da madeira para produção de carvão vegetal e energia, valores superiores a 0,50 g/cm³ são mais interessantes, uma vez que, quando

se degrada a madeira, cerca de 60% de sua massa é perdida. Portanto, quanto maior a densidade da madeira, maior será a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume, que será queimado no processo de combustão para geração de energia (SANTOS, 2010).

Diante desses dados, observa-se que grande parte das amostras de cavaco (cerca de 68) possui densidade que possibilita sua utilização na produção de energia, com valores bem próximos ou iguais ao determinado por Santos (2010).

A umidade é um fator que possui alta influência no processo de produção de energia, sendo que a madeira recém-abatida possui alta umidade e não é considerada adequada para essa finalidade, pois tais valores não devem ultrapassar 30% para carbonização e obtenção de energia (BRAND *et al.*, 2011). Para redução da umidade, geralmente realiza-se a secagem da tora de madeira recém-cortada ao ar livre.

Conforme relatado por Valentim *et al.* (2019), a umidade pode ser influenciada tanto pelo tempo de secagem, quanto pelo nível da precipitação ocorrido no tempo em que as toras ficam dispostas ao ar livre para secagem. Em seu trabalho, eles observaram que os meses de alta precipitação ocasionaram um aumento na umidade do material.

Nesse sentido, os cavacos amostrados apresentaram-se com baixo potencial para uso imediato para geração de energia, devido ao alto teor de umidade encontrado – a maioria com umidade entre 40% e 91%. Entretanto, esse problema pode ser contornado com um processo de exposição dos cavacos ao ar livre para secagem ou permanecendo com a secagem das toras em campo por um tempo maior.

Ressalta-se que, para determinados tipos de fornalha, a umidade abaixo de 40% em base seca pode causar um processo de combustão explosivo, que eleva a perda de energia para a atmosfera e aumenta a emissão de partículas de carbono (SOARES; HAKKILA, 1987). Então, deve-se atentar às especificidades da realização do processo de combustão.

Ao se analisar o poder calorífico como característica de matérias para produção de energia, espera-se que quanto maior o seu valor, mais energia seja desprendida por aquela matéria. Assim, as espécies do gênero *Eucalyptus* têm apresentado potencial para utilização nesse setor. Em média, esses valores podem variar mediante a composição química, as propriedades físicas e anatômicas e a idade das árvores.

A literatura já reporta trabalhos que caracterizam o comportamento de clones de

Eucalyptus grandis x *Eucalyptus urophylla* para o poder calorífico superior. Clones com idade média de 6 anos apresentaram valor variando de 4568 cal/g até 4673 cal/g (SILVA *et al.*, 2019). Em geral, são apontados valores médios entre 4.456, 4.542 e 4.462 cal/g para híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* – valores maiores do que os resultados apresentados neste trabalho (SANTOS *et al.*, 2012; CARNEIRO *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2015). Entretanto, mediante as possibilidades de variação, é possível encontrar valores até menores do que os indicados neste trabalho: 4030 para clones de 144 com 3 anos, 4060 para clones de 4 anos e 4039 para idade de 5 anos (SILVA, 2019). Observa-se, para o material genético estudado com fins energéticos, uma potencial variabilidade energética, a qual pode ser ocasionada por condições edáficas, adubação, espaçamento e ademais condições de manejo.

6.5 Conclusão

A técnica estudada mostrou-se promissora para predição de densidade básica, umidade e poder calorífico superior de cavacos. Para aplicação na produção de energia, os cavacos encontram-se, em sua maioria, em condições adequadas de densidade e poder calorífico promissor. Porém, deve-se atentar aos altos valores de umidade, que podem inviabilizar o processo de combustão.

6.6 Referências

- ARRIEL, T.G. **Espectroscopia no infravermelho próximo na predição de características da madeira em clones de *Eucalyptus***.63 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade federal de Lavras, Lavras, 2017.
- FOEKEL, C.E.B. **Classificação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus***. Grau Celsius, 2019. Disponível em:
http://www.eucalyptus.com.br/eucaexpert/1037_Classificacao%20madeiras%20eucalpto%20pela%20densidade.pdf.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. *Biomass and Bioenergy*, v.35, n.7, p.2581-2588, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.005>.
- SOARES, R. V.; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no estado do Paraná, Brasil. **Revista Floresta**, v. 17, n. 12, p. 73 - 94, 1987.
- CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R.C.; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, R.A.P.; VITAL, B.R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, 2014.
- VALENTIM, L. B. et al. Mapping Three-dimensional Moisture Content of Wood Chip Piles for Energy Production. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. 1-9, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.043218>.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal, Ciência e Tecnologia da Madeira)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- SILVA, T.S.S et al. Poder calorífico superior (PCS) de 6 clones de *Eucalyptus* sp. coletados no Estado de Alagoas. Apresentado no IV Congresso Brasileiro de **Eucalipto** - 07 a 08 de agosto de 2019.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***.2004. 133 f.Tese (Doutorado em recursos florestais)-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- SOUZA, F.M.L. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E.urophylla* x *E.grandis* em dois modelos silviculturais**. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista 83f. (2012). Disponível em: <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0839.pdf> . Acesso em: 12 out. 2018.
- ALMEIDA, R. A. de; OLIVEIRA, L. A. S. de; SOUZA, F. M.L. de; SILVA, A A. Variação da densidade básica no sentido base-topo da madeira de quatro espécies de Eucalipto. **Revista científica eletrônica de ciências aplicadas da FAIT**. n. 1, p. 1-9, 2016.
- SILVA, G.B. **Propriedades energéticas em clones de Eucalipto**. Trabalho de

conclusão de Curso (Engenharia Florestal). UFMT- Universidade Federal do Mato Grosso, 37 f, Sinop, 2019.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.5, p.971-980, 2012.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; JÚNIOR, A. P. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE HÍBRIDOS DE EUCALIPTO EM TRÊS IDADES. **Cerne**, vol. 21, núm. 2, abril-junho, 2015, pp. 191-197.

HSING, T.Y.; PAULA, N.F.; PAULA, R.C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509821119>.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espectroscopia no infravermelho próximo se apresentou como uma técnica promissora para análise não destrutiva da qualidade de cavacos do clone I144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) utilizados para a geração de energia. Os modelos gerados neste trabalho podem atender às necessidades de empresas com essa expectativa. Diante desses resultados, a hipótese H1 é aceita neste trabalho, mediante a alta explicação entre as variáveis dependentes e independentes.

A técnica utilizada para geração dos modelos na região do infravermelho próximo permite que os objetivos inicialmente determinados fossem atingidos com êxito. Os modelos de calibração para predição das características de densidade básica, umidade e poder calorífico da madeira foram construídos, avaliados e utilizados para predição de novos cavacos.

Algumas modificações são sugeridas para obtenção futura de modelos matemáticos com melhores estatísticas de calibração. A adição de novas amostras, por exemplo, pode ser considerada como uma atividade para melhorar sua capacidade de predição e contemplar maiores variações no povoamento.

Além disso, a possibilidade de calibração de vários modelos NIRS pode ser necessária para contemplar toda a variação encontrada numa empresa florestal. Entretanto, é perfeitamente viável o desenvolvimento de um modelo de calibração robusto e heterogêneo, capaz de realizar a predição de grande variabilidade de materiais genéticos, em diferentes idades e plantados em diferentes locais.