



TULIO MARIANO SILVA

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NIR NO SETOR
FLORESTAL: REVISÃO DE LITERATURA**

**LAVRAS – MG
2023**

TULIO MARIANO SILVA

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NIR NO SETOR FLORESTAL: REVISÃO DE
LITERATURA**

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

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador
Dayane Targino de Medeiros
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

TULIO MARIANO SILVA

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NIR NO SETOR FLORESTAL: REVISÃO DE
LITERATURA**

**POTENTIAL OF NIR SPECTROSCOPY IN THE FORESTRY SECTOR:
LITERATURE REVIEW**

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

APROVADA em 24 de novembro de 2023
Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA
Dra. Evelize Amaral UFLA
Dr. Thalles Loiola Dias UFLA

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador
Dayane Targino de Medeiros
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

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

RESUMO

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) representa uma tecnologia revolucionária, amplamente utilizada em variados setores, incluindo o florestal, para caracterizar e classificar materiais. Sua capacidade de identificar as composições químicas de materiais orgânicos por meio de espectros de imagens destaca-se como um avanço significativo na avaliação rápida e confiável de produtos de materiais biológicos. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão abrangente sobre o potencial da aplicação da espectroscopia NIR especificamente no setor florestal, abordando aspectos como o histórico desta tecnologia, suas aplicações práticas, os diferentes tipos de equipamentos disponíveis, assim como os desafios e as futuras perspectivas de utilização no controle, monitoramento e avaliação da qualidade de produtos florestais. Seu potencial é notável e oferece uma alternativa rápida, eficaz e não destrutiva para a avaliação de diversos parâmetros, contribuindo para uma gestão mais eficiente, otimizada e sustentável dos recursos florestais. A pesquisa contínua e o esforço em superar suas limitações são cruciais para expandir o uso da tecnologia NIR. A integração com outras tecnologias, o desenvolvimento de novas ferramentas de aprendizado de máquinas e a contínua inovação baseada em inteligência artificial abrem novos caminhos para uma abordagem mais informada e sustentável do setor florestal.

Palavras-chave: Tecnologia. Análise. Hiperespectral. Infravermelho. Madeira.

ABSTRACT

Near-Infrared (NIR) spectroscopy represents a revolutionary technology widely used in various sectors, including forestry, for characterizing and classifying materials. Its ability to identify the chemical compositions of organic materials through image spectra stands out as a significant advance in the rapid and reliable assessment of biological material products. This study aims to conduct a comprehensive review of the potential application of NIR spectroscopy specifically in the forestry sector, addressing aspects such as the history of this technology, its practical applications, the different types of available equipment, as well as the challenges and prospects for use in the control, monitoring, and evaluation of the quality of forest products. Its potential is remarkable and offers a quick, effective, and non-destructive alternative for assessing various parameters, contributing to more efficient, optimized, and sustainable management of forest resources. Continuous research and efforts to overcome its limitations are crucial to expanding the use of NIR technology. Integration with other technologies, the development of new machine learning tools, and continuous innovation based on artificial intelligence open new pathways for a more informed and sustainable approach to the forestry sector.

Keywords: Technology. Analysis. Hyperspectral. Infrared. Wood.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	6
2.OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo geral	7
2.2 Objetivos específicos.....	7
3.REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
3.1 Histórico da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)	7
3.2 Aplicações da tecnologia NIR	8
3.3 Equipamentos NIR no setor florestal	11
3.4 Potencial da espectroscopia para a avaliação da madeira e seus produtos.....	13
3.5 Desafios do uso da técnica NIR	14
3.6 Perspectivas e Lacunas da aplicação da tecnologia NIR.....	15
4.CONCLUSÃO	17
REFERÊNCIAS	18

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal desempenha papel importante na sustentabilidade ambiental e no suprimento de recursos naturais essenciais (ROVEDDER et al., 2013). A gestão eficaz das florestas é fundamental para atender às crescentes demandas por madeira, papel, produtos de madeira, além da identificação de espécies que contribuem com a conservação da biodiversidade. À medida que enfrentamos desafios cada vez mais complexos relacionados às mudanças climáticas, degradação ambiental e pressões econômicas, a necessidade de ferramentas avançadas de monitoramento e análises tornam-se imprescindíveis (GUEDES, 2022).

Como citado por So et.al. (2004), tempos atrás, já se era visto a avaliação imediata das propriedades da madeira sólida utilizando espectros NIR, como tecnologia de crescimento acelerado para análise de qualidade das árvores no melhoramento florestal. O NIR emergiu como uma tecnologia promissora no setor florestal, oferecendo abordagem não destrutiva, confiável e rápida para caracterizar e avaliar diferentes componentes das árvores e materiais de origem lignocelulósica (MUÑIS et al., 2012). Atualmente é possível discriminar espécies florestais analisando suas assinaturas espectrais (NOVAES et al., 2023), produtos da madeira, como polpa celulósica, utilizando inteligência artificial combinada com dados de espectroscopia NIR (COSTA et al., 2019), assim como a umidade da madeira no processo de secagem, para obtenção de um produto de qualidade (BALIZA et al., 2023).

Neste contexto, o desenvolvimento de estudos para relatar o histórico das aplicações do NIR nas ciências florestais, os equipamentos disponíveis no mercado, o potencial para avaliação da madeira e seus produtos, bem como os desafios e perspectivas do NIR, são temas de relevância para projeção de futuras pesquisas, usos industriais e no incremento das bases de pesquisas científicas. Essas informações podem contribuir significativamente na tomada de decisão dos gestores industriais e dos fiscais florestais envolvidos na conservação ambiental. Além disso, são insights valiosos para pesquisadores e profissionais que atuam neste campo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi realizar um levantamento bibliográfico sobre a espectroscopia no infravermelho próximo com ênfase no setor florestal.

2.2 Objetivos específicos

- a) Apresentar o histórico, aplicação e evolução da espectroscopia no NIR;
- b) Levantar o potencial da espectroscopia para a avaliação da madeira e seus produtos;
- c) Revelar os desafios da utilização da técnica NIR;
- d) Abordar as lacunas e perspectivas da tecnologia NIR.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)

O infravermelho próximo (NIR) é um tipo de espectroscopia vibracional de alta energia realizada na faixa de comprimento de onda de 750 a 2.500 nm (12.500 a 4.000 cm^{-1}) (PASQUINI, 2018). A tecnologia NIR tem uma história que remonta ao século XIX. Observações de mudanças na absorção de luz associadas à oxigenação dos tecidos foram reconhecidas em 1876, um marco que serviu de base para desenvolvimentos futuros em espectroscopia NIR. Segundo Hamaoka e Mccully (2019), a transição para a aplicação prática começou em 1876, quando Karl von Vierordt observou mudanças espectrais em hemoglobina (Hb) através da trans-iluminação de dedos humanos e soluções contendo Hb. Foi somente em 1900 que o pesquisador Coblentz conseguiu verificar a utilidade dos espectros de absorbância de substâncias para a identificação de grupos funcionais orgânicos.

Embora tenha tido um início subestimado, a espectroscopia NIR ganhou reconhecimento devido ao aumento na produção de artigos entre as décadas de 30 e 80. Em 1932 e 1933, foram construídos dispositivos confiáveis para espectrofotometria *in vitro*, utilizando luz visível. Sua evolução se aplicou em várias áreas de estudo, como a medicina, nos anos de 1970, com o desenvolvimento de oxímetros portáteis (DHMED, 2022).

No contexto agrícola, Karl Norris desempenhou um papel importante no desenvolvimento da espectroscopia NIR. Ele adotou abordagens inovadoras, como a detecção da umidade, que possibilitaram análises mais rápidas e não destrutivas (OLIVEIRA, 2018). No contexto brasileiro, contribuições significativas foram feitas, especialmente na determinação direta de proteínas em commodities, o que substituiu métodos químicos tradicionais, como o método Kjeldhal (PASQUINI, 2003).

No setor florestal o desenvolvimento da técnica foi amplamente utilizado durante os anos, desde a avaliação da composição de painéis aglomerados (CAMPOS, 2009), de extrativos, lignina e holocelulose (ANDRADE, 2011), assim como o carvão (ANDRADE, 2014). Atualmente o NIR continua proporcionando estudos no setor florestal, como pesquisas para classificar resíduos madeireiros (LIMA, 2022), solo (TEIXEIRA, 2022), poupa celulósica (MEDEIROS, 2022), entre outros.

No entanto, é importante destacar que a eficácia da tecnologia NIR está diretamente ligada aos dados de referência durante a fase de aprendizado, sendo que a diferença entre falhar ou ter sucesso nesta tarefa depende da qualidade dos valores de referência associados às amostras no conjunto de treinamento (PASQUINI, 2003).

3.2 Aplicações da tecnologia NIR

A técnica da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é amplamente conhecida e aplicada em diversos setores industriais, como agricultura, alimentos, polímeros, têxtil, combustível fóssil, biocombustível, cosméticos e farmacêutica (SOARES et.al.,2017).

No âmbito florestal, a espectroscopia NIR tem sido utilizada para diversas aplicações práticas, como análise de madeira (GONG; ZHANG, 2008), sementes (ZHU et al., 2015), monitoramento florestal por drones (HAKALA et al., 2018), análise de carvão vegetal (CONCEIÇÃO, 2023), entre outros, devido sua capacidade de fornecer resultados rápidos, precisos e de forma menos dispendiosa. Segundo Pasquini (2018), o NIR fornece informações espectrais que podem apoiar o desenvolvimento de métodos analíticos qualitativos e/ou quantitativos. Além disso, o NIR tem sido amplamente utilizado na indústria de celulose e papel para análise da química da madeira, e qualidade de produtos florestais (HEIN et al, 2009). A aplicação da técnica continua a se expandir, fornecendo ferramentas para a gestão e pesquisa florestal.

O princípio de funcionamento do NIR é baseado na emissão de radiação infravermelha que penetra na amostra. A luz do NIR é direcionada à amostra e é modificada de acordo com a

composição do item analisado. A luz modificada é detectada pela sua transmissão e pelo fluxo que é refletido (AMARAL, 2022). A técnica permite a aquisição direta de medidas de reflectância que carregam informação dos diversos grupos funcionais presentes nas moléculas de alto peso (celulose, hemicelulose e lignina) e de menor peso molecular (extrativos) da madeira (TSUCHIKAWA, 2007).

Uma das aplicações mais notáveis desta tecnologia é a capacidade de identificar diferentes espécies de árvores por meio de suas assinaturas espectrais. Esta capacidade facilita a gestão florestal, categorizando de forma precisa e rápida as espécies em determinada área, e contribuindo para a conservação, ao identificar espécies raras ou em risco de extinção. Soares et al. (2017), aplicaram o NIR portátil para a identificação de seis espécies e foram observadas taxas de eficiência acima de 90%, o que comprova a possibilidade do uso dessa técnica instrumental em escala portátil.

A qualidade do produto madeireiro, como toras, componente crucial para a indústria de produção de móveis, também pode ser avaliada a partir da técnica NIR. Através da análise espectral, é possível determinar propriedades essenciais da madeira, como densidade, teor de umidade, resistência e durabilidade. Além disso, mudanças nos teores de lignina, hemicelulose, celulose cristalina e amorfa foram caracterizados utilizando NIR, permitindo uma seleção mais refinada de materiais para usos específicos, desde a construção até a bioenergia (NASCIMENTO et al., 2015).

Os desafios associados às doenças e pragas nas florestas também encontram soluções no NIR. Essa tecnologia possui a capacidade de detectar doenças em árvores, identificando mudanças nas assinaturas espectrais das folhas degradadas pela ação de fungos (FLACKER, 2006 apud TSUCHIKAWA; SCHWANNINGER, 2013). Em uma pesquisa realizada em macieiras, foi possível encontrar e discriminar estágios de doenças, detectando 3 tipos diferentes, demonstrando assim a possibilidade da aplicação do NIR para avaliação de doenças em campo (SHADRIN et al., 2020). Essa detecção precoce permite intervenções mais rápidas e eficazes, reduzindo os danos aos ecossistemas. Além disso, o NIR desempenha um papel crucial no monitoramento da saúde geral da floresta, permitindo observar a degradação florestal e o impacto das atividades humanas, como a exploração madeireira.

No setor industrial, em particular na indústria de papel e celulose, a espectroscopia NIR tem se mostrado uma ferramenta valiosa, na qual é utilizada para garantir a qualidade da celulose e dos produtos de papel, assegurando que atendam às especificações necessárias. Além disso, propriedades como características de biomassa florestal, incluindo resíduos, podem ser avaliadas pelo NIR, apoiando decisões em gestão florestal sustentável e otimização de fontes

de energia renovável (PACE, 2020; SILVA et al, 2014). No setor da indústria de polpa celulósica, o primeiro estudo foi realizado no ano de 1998 por Birkett e Gambino (VIANA et al., 2010). Em um estudo realizado por Lima et al., (2022), investigou-se a capacidade do NIR para estimar as propriedades do papel Kraft quando reforçado com nanofibrilas, estimando suas concentrações, a física e a mecânica envolvidas, chegando a classificar corretamente cerca de 93% das amostras.

A aplicação da tecnologia NIR na melhoria da eficiência energética do carvão vegetal oferece um caminho promissor para o uso sustentável dessa biomassa. Através da análise rápida das propriedades físico-químicas do carvão vegetal, a NIR possibilita ajustes precisos nos processos de produção e combustão, melhorando o rendimento energético e minimizando desperdícios. Um estudo realizado por Ramalho et al. (2019), examinou como o tamanho das partículas do carvão vegetal afetaria a acurácia de modelos preditivos, utilizando a espectroscopia NIR para determinar a composição química do carvão derivado de eucalipto. Da mesma forma, outro trabalho publicado por Maioli Campos et al. (2013), também utilizou a tecnologia NIR para identificar a quantidade de carbono fixo no carvão, ambos apresentaram resultados satisfatórios.

Como mencionado anteriormente, a produção do carvão vegetal precisa ser sustentável e ter alto aproveitamento energético. Para isso a quantidade elevada de lignina e a relação S/G são fundamentais em sua composição (ROWELL et al., 2005; SANTOS et al., 2016; SJÖSTRÖM, 1993). Segundo Baldin et al. (2018), com a tecnologia NIR é possível identificar a quantidade de lignina klason fornecendo vantagens para a triagem de germoplasma para plantas, contribuindo para a engenharia genética e o cultivo industrial. Além da quantidade de lignina, outros elementos são identificados, como o teor de umidade de equilíbrio, estabilidade dimensional, rigidez e resistência ao tratamento térmico, quando se trata de características físicas e químicas (ZANUNCIO et al., 2018).

Na maioria dos estudos realizados, o foco é a melhor identificação de elementos através da técnica, que em alguns casos pode ser utilizado para o melhoramento genético. Um estudo realizado com a espécie *Eucalyptus benthamii*, espécie de elevado valor comercial no sul do Brasil, destacou o desenvolvimento de calibrações NIR como uma técnica inovadora para estimar variáveis críticas da madeira. O estudo conclui que a tecnologia NIR não só tem o potencial de impulsionar o melhoramento do *Eucalyptus benthamii*, mas também de reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência do material no processo produtivo, salientando as possibilidades de avanços significativos na seleção e no desenvolvimento de espécies mais adaptadas e produtivas (ESTOPA et al., 2017).

Por fim, a capacidade do NIR de monitorar o crescimento e desenvolvimento das árvores ao longo do tempo é notável quando se analisa essas várias características. Estas informações são vitais para silvicultores e gestores florestais, auxiliando em decisões sobre colheita e replantio. Em conjunto, estas aplicações do NIR estão transformando a silvicultura e gestão florestal e a indústria, tornando-as mais precisas, eficientes e sustentáveis.

3.3 Equipamentos NIR no setor florestal

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem revolucionado a forma como a indústria analisa e monitora a qualidade dos produtos (BALIZA et al., 2022). Diferentes tipos de tecnologia NIR são empregados com base na necessidade de mobilidade, precisão e integração com processos produtivos. Cada tipo possui características distintas que o tornam adequado para aplicações específicas (AMARAL, 2022).

Dentre os tipos de aparelhos estão os de bancada, instrumentos de análise espectroscópica precisos e detalhados, ideais para laboratórios de empresas de médio e grande porte que necessitam de resultados robustos e exatos. Com uma faixa espectral que chega a 2500 nm, oferecem alta acurácia e poder preditivo, mas são limitados ao uso em laboratório e possuem um custo elevado. Já outro tipo é o NIR in-line, tecnologia avançada para monitoramento de processos de produção em tempo real, instalado diretamente na linha de produção. Esta integração permite uma análise contínua das matérias-primas e dos processos, proporcionando um controle de qualidade imediato e ajustes em tempo real, o que leva a uma melhoria contínua na eficiência e na qualidade do produto (AMARAL, 2022).

Uma característica marcante dos equipamentos NIR é sua capacidade de realizar análises quase instantâneas e não destrutivas de diversas propriedades da madeira e outros materiais biológicos (PASQUINI, 2003 apud HEIN et al., 2017). Entre essas propriedades, destacam-se a umidade, densidade, composição química, qualidade da madeira e até mesmo a designação de espécies de árvores (NOVAES et al., 2023).

Os equipamentos NIR portáteis têm se destacado como ferramentas inovadoras no setor florestal (KRABBE et al., 2020). O desempenho desses equipamentos tem atraído a atenção de profissionais do setor e pesquisadores. Equipados com tecnologia de sensor avançada, os espectrômetros NIR portáteis são leves e podem ser transportados facilmente para locais remotos, como mostrado na Figura 1. Isso elimina a necessidade de coletar e transportar amostras para laboratórios, o que frequentemente se mostra dispendioso (AMARAL, 2022).

Figura 1 – Aparelhos NIR portáteis.



Fonte: Do autor (2023)

Dentre os equipamentos portáteis, o MicroNIR On-site (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos) tem sido reportado como um equipamento robusto e confiável. O instrumento é um espectrômetro portátil miniaturizado (peso: 250 g, comprimento: 146 mm e diâmetro: 45 mm). A faixa de aquisição foi de 950 a 1650 nm ($10,526 - 6060 \text{ cm}^{-1}$) com resolução de 5,6 nm resultando em 125 variáveis espectrais.

Além disso, a precisão das análises realizadas pelos equipamentos NIR portáteis tem evoluído consideravelmente, graças ao desenvolvimento de calibrações sólidas e modelos estatísticos avançados. Os modelos de calibração de projeção são simples e os cálculos do modelo podem ser realizados rapidamente por pacotes de software disponíveis comercialmente (XIAOBO et al., 2010).

Isso torna esses dispositivos confiáveis para tomada de decisões cruciais, como o planejamento da colheita florestal com base na qualidade da madeira, o que resulta na

otimização dos recursos e na redução do desperdício. É importante ressaltar o impacto positivo desses equipamentos na gestão sustentável das florestas. Ao possibilitar a identificação precisa de espécies e a avaliação da qualidade da madeira em tempo real, eles contribuem para a tomada de decisões embasadas, promovendo práticas de colheita responsáveis e a preservação de ecossistemas sensíveis e espécies ameaçadas.

3.4 Potencial da espectroscopia para a avaliação da madeira e seus produtos

Percebe-se aumento no interesse pelo uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) em diversas áreas de estudo, incluindo a madeira, conforme indicado por Sandak, Sandak e Meder (2016). Esta técnica não invasiva e rápida demonstrou ser um recurso inestimável, revolucionando a análise de uma variedade de propriedades da madeira e gerando benefícios significativos em termos de eficiência, qualidade e sustentabilidade (AMORIM, 2018). A seguir, será explorado mais detalhadamente as amplas possibilidades e potencialidades oferecidas pela espectroscopia NIR nesse contexto.

A análise rápida das características da madeira sólida por meio da técnica NIR é uma área em constante crescimento, com implicações significativas para a qualidade da madeira e, conseqüentemente, para o melhoramento genético das árvores, conforme So et al. (2004). Isso inclui a determinação de características importantes como densidade, teor de umidade, resistência mecânica e durabilidade. Ao proporcionar uma análise minuciosa desses parâmetros, essa tecnologia assegura que os produtos de madeira estejam em conformidade com os rigorosos padrões de qualidade exigidos pela indústria da construção, como a análise da composição de MDF (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). Essa capacidade de aprimorar a qualidade é essencial para garantir a satisfação do cliente e a competitividade no mercado.

Outro aspecto notável do potencial da espectroscopia NIR é sua habilidade de identificar espécies de árvores com base em suas características espectrais únicas, tornando-se de vital importância para a gestão florestal e a conservação da biodiversidade. A identificação de espécies arbóreas é fundamental para a adequação do inventário florestal e do gerenciamento do ecossistema. Além das espécies arbóreas, sementes também são caracterizadas, identificando sua qualidade e viabilidade (WANG et al., 2022).

Ao conhecer as espécies de árvores presentes em uma área, os gestores florestais podem tomar decisões mais precisas e sustentáveis, como a identificação de madeira e derivados para a fiscalização da exploração madeireira ilegal e conservação (WANG et al., 2022). Além disso, segundo Ludwig et al. (2002), a espectroscopia NIR desempenha um papel necessário no

monitoramento das alterações do solo devido às práticas de manejo, fornecendo dados úteis para melhor utilização dos recursos monetários para manutenção da área. Isso não apenas reduz o consumo de recursos naturais, mas também minimiza os impactos ambientais. Ao otimizar o uso de energia e recursos, a tecnologia contribui diretamente para a promoção da sustentabilidade na indústria florestal e de madeira.

A indústria de papel e celulose também se beneficia do potencial da espectroscopia NIR. Nos processos de fabricação por lotes, o uso da tecnologia de infravermelho próximo (NIR) possibilita a realização de múltiplas avaliações de qualidade ao longo do ciclo produtivo, em vez de restringir a análise a um único momento após a conclusão do lote. Essa abordagem tem a capacidade de identificar precocemente eventuais desvios ou falhas, possibilitando intervenções corretivas em tempo hábil. Esse aspecto é especialmente benéfico em situações em que a segurança é uma preocupação primordial (XIAOBO et al., 2010).

Essa técnica não apenas assegura a qualidade dos produtos, mas também melhora a eficiência dos processos de produção. Além disso, a detecção precoce de problemas na madeira e produtos de madeira por meio da espectroscopia NIR resulta em economia de recursos e redução de custos de produção. Ao identificar anomalias, defeitos e contaminações, essa tecnologia contribui para a qualidade do produto e reduz o desperdício de materiais, maximizando a eficiência operacional.

3.5 Desafios do uso da técnica NIR

A tecnologia NIR apresenta diversas vantagens em seu uso e aplicações, tais como rapidez na análise, capacidade para analisar uma ampla gama de parâmetros e diferentes matrizes de amostras, dispensabilidade no preparo das amostras, ausência de resíduos, entre outras. No entanto, essa prática também enfrenta alguns desafios que limitam o seu uso, necessitando de constantes buscas por aprimoramento e sua renovação. A alta sensibilidade dos equipamentos é uma característica limitante em análises de estruturas orgânicas.

Segundo CIENFUEGOS (2003), para muitas bandas sobrepostas o NIR sofre uma deflagração que impossibilita as análises estruturais e microanálises. Além disso, outro aspecto importante à espectroscopia no infravermelho é a presença de diversos materiais que não apresentam espectros mensuráveis na faixa do infravermelho próximo. Conforme citado por Smith (2004), isso ocorre devido ao fato de que, uma vez que a luz infravermelha é absorvida pelas moléculas e causa excitação de vibrações, uma substância química desprovida de vibrações não exibirá um espectro infravermelho.

Um dos principais desafios do uso da tecnologia NIR é a necessidade de calibração dos equipamentos. A calibração é importante para garantir que os resultados obtidos reflitam as propriedades reais dos materiais analisados. A calibração inadequada pode resultar em dados imprecisos, comprometendo a confiabilidade das decisões tomadas com base nesses dados. O processo de calibração envolve a comparação dos valores obtidos pelo equipamento NIR com valores reais, obtidos através de métodos de referência (HEIN; PAKKANEN, SANTOS, 2017). Este processo pode ser demorado e requer conhecimento técnico especializado, além do uso de padrões de referência confiáveis.

Outro desafio significativo é a influência de fatores externos nas medições NIR. Diferentes condições ambientais como temperatura, umidade e luz, podem afetar a precisão das medições. Segundo Guo, Cramer e Altaner (2019), a presença de água livre nas amostras pode sobrepor-se à banda de interesse nos espectros NIR. É essencial que os sistemas NIR sejam capazes de compensar ou corrigir as variações causadas por estes fatores externos, a fim de garantir resultados precisos. A complexidade das análises NIR é outro desafio a ser considerado. As medições NIR podem ser afetadas por múltiplas e complexas variáveis encontradas na quimiometria, o que muitas vezes torna a previsão não confiável (XIAOBO et al., 2010).

Além disso, o custo associado à aquisição e operação dos equipamentos NIR pode representar um desafio, especialmente para pequenas empresas ou ambientes com recursos financeiros limitados. Embora a tecnologia NIR seja uma técnica promissora, sua implementação requer um investimento inicial significativo, além de custos operacionais e de manutenção.

3.6 Perspectivas e Lacunas da aplicação da tecnologia NIR

A tecnologia NIR (Espectroscopia de Infravermelho Próximo) tem ganhado destaque no setor florestal, apresentando aplicações promissoras. Uma de suas utilidades mais notáveis é a capacidade de estimar as propriedades da madeira de diferentes espécies arbóreas, incluindo a razão lignina/celulose em árvores. A agrossilvicultura, um sistema dinâmico de gestão de recursos naturais que integra árvores em paisagens agrícolas, tem mostrado um impacto significativo no desenvolvimento da madeira. Este sistema oferece benefícios sociais, econômicos e ambientais, mas as características da madeira de árvores cultivadas em ambientes agrossilviculturais ainda são pouco exploradas. Estudos recentes revelaram diferenças

marcantes na composição química da madeira de choupo cultivada em sistemas agrossilviculturais em comparação com a madeira de controle florestal (HEIM et al., 2023).

A técnica NIR está emergindo como uma ferramenta útil na determinação da proveniência geográfica de espécies arbóreas, exemplificada pelo uso na identificação da origem do *Eucalyptus* robusta de Madagascar. Esta técnica analisa amostras de madeira e/ou folhas para identificar características únicas que estão intrinsecamente ligadas à sua origem geográfica. Essa capacidade é extremamente importante para pesquisas em biodiversidade, conservação e manejo florestal.

Além disso, a utilização de dados de sensoriamento remoto, como imagens aéreas, reduz a necessidade de trabalho de campo extensivo e custos de viagem, possibilitando a observação remota de atributos florestais, como o uso e alteração da cobertura da terra. A integração de dados NIR em programas de Inventário Florestal Nacional promete enriquecer as estimativas e previsões, contribuindo para uma gestão florestal mais eficaz. As perspectivas futuras para o uso do NIR em inventários florestais e sistemas de monitoramento são particularmente promissoras, indicando um aumento significativo na eficiência, precisão e custo-efetividade na coleta e análise de dados florestais (LISTER et al., 2020).

A implementação da tecnologia NIR para monitoramento on-line ou at-line na indústria madeireira representa um avanço crucial. Essa transição promete transformar a NIR em uma ferramenta notável e eficaz, aprimorando significativamente a eficiência e a qualidade na produção de madeira, e facilitando o controle e monitoramento de processos na indústria (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015).

Nos próximos anos, o foco na construção de bibliotecas qualitativas e quantitativas de modelos NIR, bem como o desenvolvimento de softwares práticos e intuitivos, será essencial para democratizar a NIRS. Este campo de pesquisa, mostra um grande potencial de expansão (PASQUINI, 2018). Contudo, existe uma lacuna significativa entre a pesquisa em laboratório e a aplicação prática em situações reais, especialmente no desempenho dos modelos NIR aplicados à madeira. Estudos que demonstrem a eficácia desses modelos em condições reais, considerando variações como umidade, granulometria, qualidade da superfície e temperatura, serão cruciais para avançar a aplicabilidade da NIRS no contexto industrial (HEIN et al., 2017).

Pesquisas estão sendo feitas com identificação de fungos (DA CONCEIÇÃO, 2021), sementes florestais (KHOUJA, 2022), entre outros elementos. O NIRS apresenta vantagens significativas para análises qualitativas e quantitativas na silvicultura. Esta tecnologia promete possibilitar análises in situ de plantas e solo no futuro, abrindo novos caminhos para a pesquisa e gestão florestal (WANG et al., 2022).

4. CONCLUSÃO

A espectroscopia NIR, inicialmente subestimada, emergiu como uma tecnologia revolucionária no setor florestal, redefinindo nossa interação e compreensão dos ecossistemas. A evolução dessa tecnologia ao longo do tempo permitiu a discriminação de espécies florestais, a análise de produtos da madeira, como polpa celulósica e carvão vegetal, presença de doenças, qualidade de sementes além da combinação de inteligência artificial com dados de espectroscopia NIR, indicando um contínuo avanço da aplicação na silvicultura.

Suas vantagens significativas para análises qualitativas e quantitativas prometem não apenas otimizar os processos industriais, mas também abrir novas perspectivas para análises in situ de plantas e solo, destacando-se como uma tecnologia essencial para a gestão e pesquisa florestal no futuro.

Em sua vasta gama de produtos, como de bancada e in-line, os equipamentos NIR portáteis têm se destacado por sua inovação e praticidade, impulsionando mudanças significativas em pesquisas e operações florestais.

Embora o NIR enfrente desafios que limitam seu uso, a busca contínua por inovação e melhoria permanece essencial. Mais importante ainda, o NIR, seja como ferramenta autônoma ou em combinação com outras tecnologias, está se estabelecendo como um instrumento indispensável para uma gestão florestal mais informada e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ACADEMY, A. F. **USO DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) NO CONTROLE DE QUALIDADE DE FRUTAS: REVISÃO.** Agron Food Academy, 4 mar. 2022. Disponível em: <<https://agronfoodacademy.com/9786599539657-46/>>. Acesso em: 26 out. 2023.
- AMARAL, R. **Tecnologia NIR: o que é, como funciona e seu impacto | Optimal. Optimal Tecnologias**, 4 jun. 2022. Disponível em: <<https://optimal.com.br/pt/recursos/tecnologia-nirs-o-que-e-como-funciona-e-qual-seu-impacto-na-formulacao/>>. Acesso em: 8 nov. 2023.
- AMORIM, Marcelo Vitor de Paiva. **Aplicação do infravermelho próximo aliada à calibração multivariada para construção da tecnologia analítica em processo na produção da olanzapina comprimidos revestidos.** 2018. 139f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Inovação Tecnológica em Medicamentos) - Centro de Ciências da Saúde, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- ANDRADE, C. R. et al. **Estimation of the mechanical properties of wood from Eucalyptus urophylla using near infrared spectroscopy.** CERNE, v. 16, n. 3, p. 291–298, jul. 2010.
- ANDRADE, C. R. et al. **Calibrações por meio da técnica da espectroscopia no infravermelho próximo para teor de extrativos totais, de lignina total e holocelulose usando espectros obtidos na madeira sólida.** *Ambiência*, Guarapuava, v. 7, n. 1 p. 39-49, jan./abr. 2011.
- ANDRADE, C. R. **Espectroscopia no infravermelho próximo para prever propriedades da madeira e do carvão de plantio clonal de eucalyptus sp.** 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BALDIN, Talita et al. **Evaluation of alternative sample preparation methods for development of NIR models to assess chemical properties of wood.** *BioResources*, 2018.
- BALIZA, Lívia Freire et al. **Evaluation of the spatial variation in moisture content inside wood pieces during drying by NIR spectroscopy.** *Holzforschung*, v. 77, n. 2, p. 95-105, 2023.
- BÁRBARA, Cláudio das Neves Vieira. **Espectroscopia de infravermelho e nível de deterioração de sementes de Nicotiana tabacum L.: Avaliação de sementes de tabaco pelo NIR.** / Cláudio das Neves Vieira Bárbara. – Lavras: UFLA, 2016.
- CALLADO, C. Sánchez-Carnerero et al. **The potential of near infrared spectroscopy to estimate the content of cannabinoids in Cannabis sativa L.: A comparative study.** *Talanta*, v. 190, p. 147-157, 2018.
- CAMPOS, ACM et al. **Espectroscopia no infravermelho próximo para avaliar a composição de painéis aglomerados de base agrícola.** *Bioresources*, Raleigh, v. 3, 2009.
- CIENFUEGOS, F. **Análise Instrumental: Conceitos e Avanços da Análise no Infravermelho.** *Revista Química e Derivados*, São Paulo, ano, v. 38, p. 40-46, 2003.

CONCEIÇÃO, Higo dos Santos. **Espectroscopia NIR para diferenciação do carvão vegetal de três espécies nativas do cerrado.** 2023.

COSTA, Livia Ribeiro et al. **Artificial neural network and partial least square regressions for rapid estimation of cellulose pulp dryness based on near infrared spectroscopic data.** Carbohydrate polymers, v. 224, p. 115186, 2019.

DE MOURA, Yhasmin Mendes et al. **Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 131, p. 52-64, 2017.

DHMED. **Oxímetros - O que são e quais os tipos existentes?** DHMed, 7 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.dhmed.com.br/2022/03/oximetros-o-que-sao-e-quais-os-tipos-existentes/>>.

DOS SANTOS, Rosimeire Cavalcante et al. **Effect of properties chemical and siringil/guaiaçil relation wood clones of eucalyptus in the production of charcoal.** Ciência Florestal, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

ESTOPA, Regiane Abjaud et al. **NIR spectroscopic models for phenotyping wood traits in breeding programs of Eucalyptus benthamii.** Cerne, v. 23, p. 367-375, 2017.

FACKLER, Karin et al. **Lignin degradation by white rot fungi on spruce wood shavings during short-time solid-state fermentations monitored by near infrared spectroscopy.** Enzyme and Microbial Technology, v. 39, n. 7, p. 1476-1483, 2006.

GOMEZ, Cécile; ROSSEL, Raphael A. Viscarra; MCBRATNEY, Alex B. **Predição de carbono orgânico do solo por sensoriamento remoto hiperespectral e espectroscopia de campo vis-NIR: um estudo de caso australiano.** Geoderma, v. 146, n. 3-4, p. 403-411, 2008.

GONG, Yu-Mei; ZHANG, Wei. **Recent progress in NIR spectroscopy technology and its application to the field of forestry.** Guang pu xue yu Guang pu fen xi= Guang pu, v. 28, n. 7, p. 1544-1548, 2008.

GUEDES, I. **Monitoramento ambiental: o que é, para que serve e como é realizado.** Meio Sustentável, 31 mar. 2022. Disponível em: <<https://meiosustentavel.com.br/monitoramento-ambiental/>>. Acesso em: 26 out. 2023.

GUO, F.; CRAMER, M.; ALTANER, C. M. **Evaluation of near infrared spectroscopy to non-destructively measure growth strain in trees.** Cellulose, v. 26, n. 13, p. 7663-7673, 1 set. 2019.

HAKALA, Teemu et al. **Direct reflectance measurements from drones: sensor absolute radiometric calibration and system tests for forest reflectance characterization.** Sensors, v. 18, n. 5, p. 1417, 2018.

HAMAOKA, Takafumi; MCCULLY, Kevin K. **Review of early development of near-infrared spectroscopy and recent advancement of studies on muscle oxygenation and oxidative metabolism.** The journal of physiological sciences, v. 69, p. 799-811, 2019.

HEIM, Lucie et al. **NIR-Hyperspectral camera Analyses for differencing Agroforestry and Forestry Poplar Woods.** 2023.

HEIN, Paulo RG; PAKKANEN, Hannu; SANTOS, António A. Dos. **Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review.** Forest Systems, v. 26, n. 3, 2017.

HEIN, P. R. G. et al. **Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de Eucalyptus grandis e E. urophylla usando a espectroscopia no infravermelho próximo.** Scientia Forestalis, v. 37, n. 82, p. 119-129, 2009.

OLIVEIRA, Vanessa da Silva. **Análise da autenticidade de cédulas de real utilizando espectroscopia NIR portátil e quimiometria.** 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

KHOUJA, Mariem et al. **Lipid Profile Quantification and Species Discrimination of Pine Seeds through NIR Spectroscopy: A Feasibility Study.** Foods, v. 11, n. 23, p. 3939, 2022.

KRABBE, Everton Luis et al. **O uso da tecnologia NIR portátil como ferramenta para a caracterização da qualidade de farinhas de origem animal destinadas à produção de ração.** XIX Congresso CNBA PET, 2020.

LEBLON, Brigitte et al. **A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood.** The forestry chronicle, v. 89, n. 5, p. 595-606, 2013.

LIMA, L. C. et al. **Near infrared spectroscopy for estimating properties of kraft paper reinforced properties related with cellulose nanofibrils.** CERNE, v. 28, p. e102985, 2022.

LIMA, M. D. R. **Classificação de resíduos madeireiros da Amazônia e carvões derivados por espectroscopia no infravermelho próximo.** 2022. 155 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

LISTER, Andrew J. et al. **Use of remote sensing data to improve the efficiency of national forest inventories: a case study from the United States national forest inventory.** Forests, v. 11, n. 12, p. 1364, 2020.

LUDWIG, B. et al. **Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and biological to soil sustainability.** Forest Ecology and Management, v. 171, n. 1-2, p. 121-132, 2002.

MANLEY, Marena. **Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials.** Chemical Society Reviews, v. 43, n. 24, p. 8200-8214, 2014.

MAIOLI CAMPOS, Ana Carolina et al. **NIR spectroscopy for the prediction of fixed carbon in Eucalyptus charcoal in steelmaking industries,** 2013.

MEDEIROS, D. T. de. **Monitoramento da dessorção de água em polpas celulósicas por espectroscopia no NIR.** 2022. 49 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

MUÑIZ, Graciela Inês Bolzon de et al. **Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal.** Ciência Florestal, v. 22, p. 865-875, 2012.

NASCIMENTO, RJA et al. **CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BAGAÇO DA CASCA DE COCO VERDE UTILIZANDO MÉTODOS TRADICIONAIS E A ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIRS)**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 1944-1951, 2015.

PACE, J. H. C. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE FLORESTAS PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS. [s.d.].

NOVAES¹, Thiago Valente et al. **Discrimination of amazonian forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects**. European Journal of Wood and Wood Products, v. 81, n. 1, p. 159-172, 2023.

PASQUINI, C. **Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications**. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 14, n. 2, p. 198–219, mar. 2003.

PASQUINI, Celio. **Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives—A review**. Analytica chimica acta, v. 1026, p. 8-36, 2018.

POREP, Jan U.; KAMMERER, Dietmar R.; CARLE, Reinhold. **On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production**. Trends in Food Science & Technology, v. 46, n. 2, p. 211-230, 2015.

RAMALHO, Fernanda Maria Guedes et al. **Influence of Particles Size on NIR Spectroscopic Estimations of Charcoal Properties**. Floresta e Ambiente, v. 26, 2019.

ROVEDDER, A. P. M. et al. **COMPREENSÃO E APLICABILIDADE DO CONCEITO DE SOLO FLORESTAL**. Ciência Florestal, v. 23, p. 517–528, set. 2013.

ROZENBERG, P.; CHANTRE, G.; STOKES, A. **Integrating wood quality with biomass production in different tree species**. Annals of Forest Science, v. 76, n. 3, p. 1-20, 2019.

SANDAK, Jakub; SANDAK, Anna; MEDER, Roger. **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.

SCHIMLECK, Laurence et al. **Review of near infrared hyperspectral imaging applications related to wood and wood products**. Applied Spectroscopy Reviews, v. 58, n. 9, p. 585-609, 2023.

SO, Chi-Leung et al. **Near infared spectroscopy in the forest products industry**. Forest Products Journal 54 (3): 6-16, 2004.

SOARES, L. F. et al. **AValiação de Espectrômetro NIR Portátil e PLS-DA para a Discriminação de Seis Espécies Similares de Madeiras Amazônicas**. Química Nova, v. 40, n. 4, p. 418–426, maio 2017.

SHADRIN, Dmitrii et al. **Hyper-spectral NIR and MIR data and optimal wavebands for detection of apple tree diseases**. arXiv preprint arXiv:2004.02325, 2020.

SMITH, Brian C. **Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy**. CRC press, 2011.

SILVA, D. A. DA. et al. **Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR**. Floresta e Ambiente, v. 21, n. 4, p. 561–568, out. 2014.

SPILLER, D. et al. **Analysis and detection of wildfires by using prisma hyperspectral imagery**. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 43, p. 215-222, 2021

TEIXEIRA, AF dos S. et al. **Fusão de dados de sensores proximais para previsão de propriedades de solos tropicais: Propriedades de fertilidade do solo**. Revista Sul-Americana de Ciências da Terra, [SI], v. 1 a 16 de junho de 2022.

THANGAVEL, K. et al. **Autonomous Satellite Wildfire Detection Using Hyperspectral Imagery and Neural Networks: A Case Study on Australian Wildfire**. Remote Sensing, v. 15, n. 3, p. 720, 26 jan. 2023.

TSUCHIKAWA, Satoru. **A review of recent near infrared research for wood and paper**. Applied Spectroscopy Reviews, v. 42, n. 1, p. 43-71, 2007.

TSUCHIKAWA, Satoru; SCHWANNINGER, Manfred. **A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2)**. Applied Spectroscopy Reviews, v. 48, n. 7, p. 560-587, 2013.

TSUCHIKAWA, Satoru; KOBORI, Hikaru. **A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology**. Journal of Wood Science, v. 61, n. 3, p. 213-220, 2015.

VALE, Italo Guimarães do et al. **Classificação de Imagens hiperespectrais utilizando redes neurais convolucionais para caracterização da ocupação desordenada do solo sobre um recorte do Parque Nacional da Tijuca, RJ**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 1, p. 561-571, 2022.

VIANA, Livia Cássia et al. **Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de Eucalyptus**. Ciência Florestal, v. 20, p. 367-376, 2010.

WANG, Yizhi et al. **A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry**. Applied Spectroscopy Reviews, v. 57, n. 4, p. 300-317, 2022.

WU, Weibin et al. **Research progress on the early monitoring of pine wilt disease using hyperspectral techniques**. Sensors, v. 20, n. 13, p. 3729, 2020.

XIAOBO, Zou et al. **Variables selection methods in near-infrared spectroscopy**. Analytica chimica acta, v. 667, n. 1-2, p. 14-32, 2010.

ZANUNCIO, Antônio José Vinha et al. **Determination of heat-treated Eucalyptus and Pinus wood properties using NIR spectroscopy.** Journal of Tropical Forest Science, p. 117-125, 2018.

ZITEK, A. et al. **Inspection of log quality by hyperspectral imaging.** In: 5th IASIM Conference in Spectral Imaging. 2014.

ZHU, Li-wei et al. **Advances of NIR spectroscopy technology applied in seed quality detection.** Spectroscopy and Spectral Analysis, v. 35, n. 2, p. 346-349, 2015.