



MARIO FRAIZ COELHO MAIA DE ANDRADE

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO
PRÓXIMO (NIR) NA IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS
TROPICAIS**

**LAVRAS-MG
2022**

MARIO FRAIZ COELHO MAIA DE ANDRADE

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)
NA IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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

Msc. Paulo Junio Duarte
Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho
Coorientadores

**LAVRAS–MG
2022**

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

Andrade, Mario Fraiz Coelho Maia de.
Potencial da Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) na
Identificação de Madeiras Tropicais / Mario Fraiz Coelho Maia de Andrade. -
2022.
41 p. : il.

Orientador(a): Paulo Ricardo Gherardi Hein.
Coorientador(a): Paulo Junio Duarte.
TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2022.
Bibliografia.

1. Identificação de Madeiras. Espécies Tropicais. Espectro NIR. 2. PCA-
Análise de componentes principais. 3. PLS-DA - Análise discriminante por
mínimos quadrados parciais. I. Hein, Paulo Ricardo Gherardi. II. Duarte,
Paulo Junio. III. Título.

MARIO FRAIZ COELHO MAIA DE ANDRADE

**POTENCIAL DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)
NA IDENTIFICAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS**

**POTENTIAL OF NEAR INFRARED (NIR) SPECTROSCOPY IN THE
IDENTIFICATION OF TROPICAL WOODS**

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

Aprov em 11 de fevereiro de 2022.

Dra. Cassiana Alves Pereira Universidad Continental

Msc. Emanuella Mesquita Pimenta UFLA

Msc. Evelize Aparecida Amaral UFLA

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

**LAVRAS–MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por conceder que eu viesse a vida e durante ela me guardar, proteger e me proporcionar muitas bençãos.

Aos meus pais, Ângela e Aloísio, por serem a minha base, por todos ensinamentos passados, por todo apoio e incentivo nos momentos conturbados e de felicidade durante essa caminhada, por sempre estarem presentes ao meu lado não me deixando faltar nada daquilo que é necessário e por nunca medirem esforços para me ver feliz.

As minhas madrinhas Cáca e Eliane que sempre torceram por mim e estavam ali quando precisei.

Aos meus avós Tião, Nego e Lóló e em especial Dona Lana (*in memoriam*), que mesmo lá do céu continuaram me enviando energia com aquele amor incrível que vocês me proporcionaram. Nem consigo imaginar como seria ter vocês comigo neste momento único. Saudade é amor que fica.

A Cristina e Tátá, que estiveram comigo desde o meu nascimento, família de amor.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de realizar esse curso, por todo ensinamento e pela sua estrutura impecável.

Ao Professor Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, por aceitar ser meu orientador, pelos ensinamentos e suporte para a realização deste trabalho.

Ao Msc. Paulo Junio e à Dr. Fernanda Ramalho, por aceitarem ser meus coorientadores e pela paciência de me ajudarem nos trabalhos. Sem o apoio de vocês não teria conseguido chegar até aqui.

Aos meus amigos da Engenharia Florestal, em especial, Naila, Kevyn, Thaynara, Joana e pessoal do 2015/1 por fazerem meus dias na faculdade serem os melhores. Espero que os encontros aconteçam o mais rápido possível.

Aos meus amigos fora da Engenharia Florestal, em especial, Grupo Uhuuu, Que bosta, Bonde do tey tey e Farra, Pinga e Foguete por fazerem meus dias na faculdade e principalmente fora dela serem excepcionais e de lembrança eterna. Quero todos vocês comigo para o resto da vida.

Aos membros da banca de defesa pelas valiosas contribuições.

O MEU MUITO OBRIGADO! GRATO POR TUDO QUE VIVI!

RESUMO

Madeiras nativas comercializadas no Brasil, necessitam de licença para corte, transporte, armazenamento e comercialização. Porém, parte dessas madeiras são exploradas ilegalmente, gerando impactos ambientais, como perda da biodiversidade e extinção de espécies florestais. Diante disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo, associada à estatística multivariada, como metodologia para triagem da identificação de espécies de madeiras tropicais, especialmente na distinção de táxons similares que estejam sob risco de extinção. Peças de madeira serrada, usadas na construção civil e arquitetura, comercializadas pelo nome popular Cedrinho, foram adquiridas para a realização dos experimentos. As espécies florestais estudadas são provenientes do bioma Amazônico (*Erismia uncinatum*, *Guarea guidonia* e *Vochysia sp.*). No total foram examinados 108 corpos de prova, 34 para *Erismia*, 43 para *Guarea* e 31 para *Vochysia*. As madeiras foram orientadas de forma que cada corpo de prova possuísse duas faces em cada plano (tangencial, transversal e radial). No plano tangencial umas das faces foi lixada e outra não. Espectros foram obtidos por meio de um espectrômetro no infravermelho próximo, e foram submetidos à análise de componentes principais (PCA) e análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA). A análise de componentes principais (PCA) baseada em espectros NIR e a análise visual da assinatura espectral não possibilitaram distinguir claramente as madeiras das três espécies *Erismia uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp.*, entretanto, a análise discriminante por quadrados mínimos parciais (PLS-DA) gerou valores percentuais de classificação acima de 96,77% para diferenciar madeiras tropicais fornecidas no mercado com o mesmo nome popular. Com base nos resultados do estudo, concluiu-se que a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIRS) associada à estatística multivariada apresenta potencial para discriminar madeiras de espécies tropicais a partir de modelos de classificação.

Palavras-chave: Identificação de Madeiras. Espécies Tropicais. Espectro NIR. PCA- Análise de componentes principais. PLS-DA - Análise discriminante por mínimos quadrados parciais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	Diversidade de espécies madeireiras tropicais	8
2.2	Comércio ilegal de madeiras	9
2.3	Métodos para identificação de madeiras.....	13
2.4	Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR).....	16
2.5	Aplicação da NIR para identificação de madeiras	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Seleção de amostras de madeiras	22
3.2	Preparação dos corpos de prova	23
3.3	Aquisição espectral	23
3.4	Análise estatística multivariada	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1	Assinatura espectral no NIR	26
4.2	Análise de componentes principais dos espectros no NIR.....	27
4.3	Análise discriminante por mínimos quadrados parciais dos espectros no NIR.....	30
5	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A produção, o consumo e o comércio de produtos madeireiros estão entre as metas globais para a conservação da flora do Brasil, país que possui mais de 2.600 táxons listados na CITES (*Convention on International Trade of Endangered Species*), dentre os quais, 2% são considerados espécies madeireiras (SCARANO; SILVA, 2018).

Para o estabelecimento sustentável do manejo florestal é fundamental combater a exploração e o mercado ilegal de madeiras (LIMA *et al.*, 2018). A implementação de leis que proíbem o comércio de produtos madeireiros sem rastreabilidade resultou na alta demanda por mecanismos capazes de verificar a origem da madeira, incluídas as metodologias forenses de identificação (VLAM *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o uso da espectroscopia no NIR (*Near Infrared*) na identificação de táxons é promissor (DORMONTT *et al.*, 2015). Por ser uma técnica rápida e não destrutiva, a segregação de espécies a partir dessa tecnologia poderia melhorar o monitoramento do comércio e o planejamento florestal (TSUCHIKAWA, 2007).

A espectroscopia no NIR é amplamente utilizada nas ciências florestais para estimar propriedades da madeira (HEIN *et al.*, 2010; TSUCHIKAWA, 2007, TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). Na identificação de espécies, esse método foi eficaz na separação de diferentes táxons (BRAGA *et al.*, 2011; PASTORE *et al.*, 2011; RAMALHO; ANDRADE; HEIN, 2018).

A simplicidade relativa do mecanismo e a velocidade de uso tornam o NIR uma excelente opção para ferramentas de triagem, entretanto, o desenvolvimento de pesquisas adicionais é necessário, particularmente na construção de bancos de dados de perfis químicos e os métodos estatísticos que podem ser aplicados para classificar diferenças taxonômicas (DORMONTT *et al.*, 2015).

O modelo atual de venda de madeiras pela nomenclatura popular revela um problema sério para a sustentabilidade do comércio madeireiro, uma vez que a forma como se dá o processamento dessas essências na Amazônia Legal, a forte concorrência de preços e o transporte desses produtos até os consumidores tornam a cadeia de suprimentos madeireira altamente fragmentada, impossibilitando assim a receptividade e a transparência do mercado.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo como metodologia para triagem da identificação de espécies de madeiras, especialmente na distinção de táxons similares que estejam sob risco de extinção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Diversidade de espécies madeireiras tropicais

O gradiente de diversidade longitudinal, ou seja, o aumento na riqueza de espécies de regiões polares para as tropicais, é encontrado em uma ampla variedade de táxons e biomas. Como resultado, os trópicos contêm a maioria esmagadora da biodiversidade terrestre e uma proporção surpreendente de espécies: quase todos os corais de águas rasas, mais de 90% das espécies de aves e cerca de 75% das espécies de plantas no mundo (BARLOW *et al.*, 2018).

Tanta diversidade nos ecossistemas tropicais faz com que essas regiões forneçam contribuições vitais para serviços ecossistêmicos globalmente importantes. Nos trópicos terrestres, cobertos principalmente por savanas e florestas, são expressivas as contribuições. As savanas tropicais fornecem mais de 30% da produtividade primária líquida global e 15% de armazenamento de carbono na biosfera (GRACE *et al.*, 2006). Já nas florestas tropicais úmidas, apesar de cobrirem menos de 12% da superfície terrestre livre de gelo, a produtividade chega a 33% e o armazenamento de carbono a 25% (BONAN, 2008).

A floresta amazônica, considerada como maior floresta tropical contínua do mundo, abrange uma área de 4,2 milhões de km², correspondendo a 5% da superfície terrestre. Sua grande extensão, aliada a interação das variadas condições geoclimáticas, resulta na maior reserva de biodiversidade do planeta (IBGE, 2004). Porém, levando em consideração a variedade de espécies vegetais na região, pouco se sabe a respeito, uma vez que as plantas na Amazônia são imensamente subcoletadas (SCHULMAN; TOIVONEN; RUOKOLAINEN, 2007; SOUSA-BAENA; GARCIA; PETERSON, 2014). O resultado de 300 anos de coletas de plantas na região mostra uma densidade atual de apenas dez coletas/100 km² (FEELEY, 2015; HOPKINS, 2007), culminando assim em um *gaping data void* (em português, amplo vazio de dados). Além de serem escassos, os dados frequentemente encontram-se indisponíveis (FEELEY, 2015; SOUSA-BAENA; GARCIA; PETERSON, 2014), bem como espacial e taxonomicamente enviesados (BECK *et al.*, 2014; MALDONADO *et al.*, 2015; VALE; JENKINS, 2012).

Nesse contexto, até o presente momento, o número exato de espécies arbóreas na Amazônia continua desconhecido. As estimativas do tamanho da sua flora arbórea apresentam algumas divergências, consequência da escassez de dados e da variedade de técnicas de extrapolação empregada. Em estimativa recente, baseada em extrapolação estatística de uma série logarítmica, o número de espécies de árvores na Amazônia foi avaliado em

aproximadamente 16.000 (STEEGE *et al.*, 2013). Steege *et al.* (2016) listaram 11.676 espécies arbóreas, enquanto Cardoso *et al.* (2017) citaram 6.727 espécies. Em todos os trabalhos, foram definidas como árvore todas as espécies lenhosas que excederam dez centímetros de diâmetro à altura do peito (DAP).

A despeito do número exato de espécies arbóreas na Amazônia, é inegável a ampla diversidade presente na floresta. Na região, é possível encontrar árvores com madeiras de variadas densidades e durabilidades, além de diferentes esquemas de cores e desenhos produzidos pela sua complexa estrutura anatômica e química. Tal diversidade abre uma gama de possibilidades de padrões estéticos na produção de móveis, lâminas e painéis laminados, despertando assim grande interesse do comércio mundial.

2.2 Comércio ilegal de madeiras

A cobertura florestal do Brasil equivale a cerca de 58% de seu território. Cobrindo aproximadamente 490 milhões de hectares em 2019, representa a segunda maior área florestal no mundo, atrás apenas da Rússia (SFB, 2020). Desse total, 98% correspondem a florestas naturais, enquanto apenas 2% são florestas plantadas (SFB, 2019). Dos 2% de florestas plantadas, 76,3% correspondem a florestas de eucalipto, 19,8% a florestas de pinus e apenas 3,9% são representados por outras espécies como Seringueira (*Hevea spp.*), Acácia (*Acacia mearnsii*) e Paricá (*Schizolobium amazonicum*) (TABELA 1).

Tabela 1 - Composição da área (ha) de florestas plantadas no Brasil em 2019.

Espécie Florestal	Área (em ha)	%
Eucalipto	7.616.184	76,3
Pinus	1.979.604	19,8
Outras espécies	387.307	3,9
Total	9.983.095	100

Fonte: PEVS/IBGE (2019).

Ocupando posição de destaque no *ranking* mundial, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de madeiras em toras - estimada em 29,2 milhões de m³ no ano de 2017 -, concentrada principalmente nos estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso (ITTO, 2018). Apesar da relevância no cenário produtivo mundial, em 2017 apenas 49% das madeiras extraídas de florestas naturais foram utilizadas pela indústria. O restante foi destinado à produção de energia

na forma de lenha ou carvão vegetal. No mesmo ano, a quantidade de madeira em tora proveniente da silvicultura foi cerca de 6 vezes maior em relação à extração vegetal (238.691.000 m³ x 37.163.000 m³) (SFB, 2019).

Mesmo possuindo a floresta tropical com a maior diversidade de espécies arbóreas no planeta, poucas são as espécies amazônicas utilizadas pela indústria. A falta de informações consistentes em relação às propriedades básicas e seu desempenho em diferentes condições de serviço, entre outros fatores, fazem com que as espécies tropicais sejam desperdiçadas apesar do seu potencial promissor (SBS, 2006). Recentemente, Cysneiros *et al.* (2018) compilaram uma lista contendo apenas 195 espécies arbóreas amazônicas catalogadas como comerciais, considerando espécies exploradas e potenciais à exploração. Esse valor decresce quando não são incluídas as espécies com uso potencial de comercialização, com estudos variando entre 38 e 60, conforme a localidade (FARACO JÚNIOR; COELHO, 1996; FERRAZ *et al.*, 2004; HIGUCHI *et al.*, 1985).

A procura desenfreada e insistente por um pequeno número de espécies comerciais acaba resultando no aumento de pressão em cima dessas espécies. Como consequência, ocorre uma redução drástica na densidade populacional, que já é naturalmente baixa, tornando-as ainda mais raras. O governo brasileiro, por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA), divulgou uma lista de espécies da flora ameaçadas por meio da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, revogando a Instrução Normativa nº 6 de 23 de setembro de 2008 (MMA, 2014). Neste documento, encontram-se 21 espécies madeireiras com valor comercial ameaçadas de extinção (QUADRO 1). Para evitar essa situação, existe um grande esforço de entidades de pesquisas para analisar as características físicas de novas espécies visando promovê-las comercialmente em detrimento das espécies de alto valor comercial (ALMEIDA *et al.*, 2010).

Quadro 1 – Espécies comerciais madeireiras do Brasil ameaçadas de extinção (Continua).

Nome popular	Nome científico	Família	Bioma	Categoria
Pinheiro-do-Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	<i>Araucariaceae</i>	Mata Atlântica	EP
Ipê-peroba	<i>Paratecoma peroba</i> (Record.) Kuhlmann	<i>Bignoniaceae</i>	Mata Atlântica	EP

Quadro 1 – Espécies comerciais madeireiras do Brasil ameaçadas de extinção (Continua).

Cerejeira	<i>Amburana acreana</i> (Ducke) A. C. Sm.	<i>Fabaceae</i>	Amazônia	VU
Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J. F. Macbr.	<i>Fabaceae</i>	Amazônia; Caatinga; Cerrado	VU
Jacarandá-da-Bahia	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Allemão ex Benth	<i>Fabaceae</i>	Mata Atlântica	VU
Jatobá	<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber	<i>Fabaceae</i>	Amazônia	VU
Angelim-pedra-amarelo	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	<i>Fabaceae</i>	Amazônia	VU
Mogno	<i>Swietenia macrophylla</i> King	<i>Meliaceae</i>	Amazônia	VU
Bicuúba	<i>Virola bicuhyba</i> (Schott ex Spreng.) Warb.	<i>Myristicaceae</i>	Mata Atlântica	EP
Ucuúba	<i>Virola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.	<i>Myristicaceae</i>	Amazônia; Caatinga	VU
Pau-amarelo	<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	<i>Rutaceae</i>	Amazônia	CR
Braúna	<i>Melanoxylon brauna</i> Schott	<i>Fabaceae</i>	Mata Atlântica	VU
Pau-brasil	<i>Paubrasilia echinata</i> (Lam.) Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis	<i>Fabaceae</i>	Mata Atlântica	EP
Pau roxo	<i>Peltogyne maranhensis</i> Huber ex Ducke	<i>Fabaceae</i>	Amazônia	VU

Quadro 1 – Espécies comerciais madeireiras do Brasil ameaçadas de extinção (Conclusão).

Canela-preta	<i>Ocotea catharinensis</i> Mez	<i>Lauraceae</i>	Mata Atlântica	VU
Imbuia	<i>Ocotea porosa</i> (Nees & Mart.) Barroso	<i>Lauraceae</i>	Mata Atlântica	EP
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez	<i>Lauraceae</i>	Amazônia	VU
Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	<i>Lecythidaceae</i>	Amazônia	VU
Jequitibá-branco	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	<i>Lecythidaceae</i>	Amazônia; Cerrado; Mata Atlântica	EP
Cedro-rosa	<i>Cedrela odorata</i> L.	<i>Meliaceae</i>	Amazônia; Caatinga; Amazônia; Caatinga; Cerrado; Mata Atlântica	VU
Cedro-vermelho	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	<i>Meliaceae</i>	Amazônia; Cerrado; Mata Atlântica	VU

Legenda: CR – Criticamente em Perigo; EP – Em Perigo; VU – Vulnerável.

Fonte: Adaptado de MMA (2014).

Outra problemática importante é o agrupamento de espécies madeireiras em categorias com propriedades e aparências comuns. Muito comum no mercado brasileiro, o agrupamento de espécies é praticado de maneira não técnica e sem o conhecimento do consumidor final. Essa forma incorreta de selecionar as espécies pode causar danos à diversidade da floresta, caso sejam retiradas espécies com baixo rendimento ou população pequena na área (IPT, 2003), podendo também prejudicar sua comercialização, pois muitas vezes elas pertencem a gêneros botânicos distintos, resultando assim em diferentes propriedades tecnológicas (CORADIN; CAMARGOS, 2002).

Nesse cenário, para sustentar a indústria madeireira usando de forma racional os recursos da floresta amazônica e, ainda, conservar sua biodiversidade, o manejo florestal é a melhor ferramenta possível (REIS *et al.*, 2010). Segundo a Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei Federal 11.284/2006), no artigo 3º, inciso VI, o manejo florestal é definido como a “administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo”. O estabelecimento do manejo florestal de forma sustentável só é possível quando existe combate à exploração e ao mercado ilegal de madeiras (LIMA *et al.*, 2018).

Em sua maioria, os recursos madeireiros vêm sendo explorados de forma não sustentável, uma vez que predomina a colheita madeireira sem um mínimo planejamento. Como consequência, essa exploração ilegal reflete de forma direta no desmatamento da floresta, reduzindo sua cobertura vegetal e promovendo a degradação da biodiversidade (DE SOUZA *et al.*, 2006). Levando-se em consideração a importância global da floresta amazônica, toda e qualquer iniciativa que impacte o desmatamento na região ganha destaque internacional. Os esforços internacionais para combater o problema em questão consistem, principalmente, na promulgação de leis destinadas a desencorajar o comércio de madeira de origem ilegal, bem como proibir ou limitar o comércio de espécies específicas ou de áreas específicas (DORMONTT *et al.*, 2015; LOWE *et al.*, 2016).

2.3 Métodos para identificação de madeiras

A identificação de madeiras é uma prática antiga e com várias aplicações nos mais diversos ramos da ciência (CURY; TOMAZELLO-FILHO, 2011; LOWE *et al.*, 2016; NORMAND, 1972). A utilização adequada das espécies de madeira, quer sejam como árvores, toras ou madeira processada, depende de processos que garantam a correta identificação das mesmas (KEENAN; TEJADA, 1984). Além disso, a prática da identificação é de grande importância e utilidade para o comércio, pois proporciona meios para a detecção de fraudes e enganoso (BESSA, 2009).

A atividade de identificação é bastante complexa, principalmente nas regiões tropicais, onde existe uma enorme variedade de espécies. Assim, deve ser executada por pesquisadores e profissionais capacitados para diminuição dos erros na sua execução (BESSA, 2009). Os principais erros cometidos na identificação estão relacionados às semelhanças encontradas entre famílias, espécies e indivíduos da mesma espécie, além dos inúmeros nomes populares e

comerciais que dificultam a inspeção pelos órgãos responsáveis (HERMANSON; WIEDENHOEFT, 2011).

Para realizar a classificação de uma árvore, matéria prima para a produção de madeira serrada ou beneficiada, são consideradas principalmente as partes reprodutivas das plantas (flores e frutos, por exemplo), assim como outras características morfológicas do vegetal (casca, folhas, etc). O que acontece na prática durante o processo de extração e de transformação da árvore em madeira beneficiada, é que nem sempre as suas partes reprodutivas e morfológicas são mantidas ou até mesmo consideradas (BOTOSSO, 2011). Nesse contexto, o método convencional de identificação através da anatomia da madeira é uma excelente ferramenta para se obter uma identificação científica com um bom grau de segurança e confiabilidade (BESSA, 2009).

O método de identificação visual pela anatomia do lenho possibilita a aquisição de informações de caracteres anatômicos através do exame de estruturas internas do mesmo (BOTOSSO, 2011). A anatomia (do grego *anatomé*: incisão, dissecação, com sufixo latino *ia*) da madeira é um ramo da ciência botânica que estuda os diversos tipos de células que constituem o lenho (xilema secundário), suas funções, organização, peculiaridades estruturais e relações com a atividade biológica do vegetal (BURGER; RICHTER, 1991).

As características anatômicas da madeira são descritas de acordo com as normas da “International Association of Wood Anatomists” (IAWA), onde a identificação é confirmada por meio de comparação com material de referência (DORMONTT *et al.*, 2015). Os materiais de referência publicados pela IAWA englobam listas das características microscópicas para a identificação de folhosas (IAWA, 1989) e coníferas (IAWA, 2004), e até hoje são utilizadas por todos os anatomistas de madeiras.

A relevância do método de identificação por meio da anatomia do lenho é evidenciada em estudos de diversos autores (FERREIRA; GOMES; HOPKINS, 2004; GASSON, 2000). É um método de identificação prático, eficiente, de baixo custo e pode ser realizado *in situ*, o que torna essa técnica apropriada em ambientes de controle e fiscalização do comércio de madeiras e extração ilegal, na indústria, na arqueologia, etc. (BESSA, 2009). Além do método visual de identificação da anatomia do lenho, é possível categorizar os métodos de identificação de madeiras em químicos e genéticos.

Na categoria dos métodos de identificação químicos, é possível avaliar os compostos fitoquímicos sintetizados pelas árvores, frequentemente específicos para suas espécies ou grupos taxonômicos superiores. Essa avaliação pode ser feita através da espectrometria de massa e análises estatísticas dos perfis químicos resultantes. Segundo o grau de variação natural

presente nas espécies e o grau relativo de mudança química ao longo do tempo com o processamento e o uso da madeira, é possível identificar uma série de espécies como apontado em várias publicações com foco em análise madeireira (DORMONTT *et al.*, 2015).

Outro método de avaliação das propriedades fitoquímicas presentes na madeira é o da espectroscopia no infravermelho próximo (em inglês, *Near-Infrared Spectroscopy* - NIRS). Este método caracteriza o grau de absorvância dos elementos químicos contidos na madeira em diferentes faixas de ondas quando expostos à sua energia eletromagnética (DORMONTT *et al.*, 2015). O NIR é amplamente utilizado na área florestal para estudar as propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas da madeira, e também para identificação taxonômica (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015).

Na categoria dos métodos genéticos, a análise é realizada no código genético de espécies arbóreas e permite que os indivíduos sejam atribuídos a diferentes grupos com base na ancestralidade compartilhada ou na frequência relativa de diferentes genes. Uma vez que o código genético é herdado, os indivíduos com ancestrais compartilhados mais recentes são mais semelhantes geneticamente, em comparação com indivíduos mais afastados. Essa análise genética é capaz de oferecer identificação a nível de espécie - ou grupos taxonômicos superiores, como gêneros e famílias -, mais comumente obtidas por meio da técnica *DNA Barcode* (em português, código de barras de DNA) (LOWE; CROSS, 2011). Proposta por Paul Hebert em 2003, a técnica *DNA Barcode* procura identificar as espécies com base na variação em regiões de genes específicos (HEBERT *et al.*, 2003).

Outra técnica genética também utilizada para a identificação da madeira é a de *DNA fingerprinting*, ou impressão digital genética em português. Consiste na determinação do perfil genético de um indivíduo ou conjunto de indivíduos através de técnicas baseadas na reação em cadeia pela enzima polimerase, ou PCR (DORMONTT *et al.*, 2015). Essa técnica vem sendo usada tanto para identificar taxonomicamente espécies florestais e madeiras, como para estabelecer sua origem geográfica (KOOPMAN; DIEMONT, 2004; LANDERAS *et al.*, 2006).

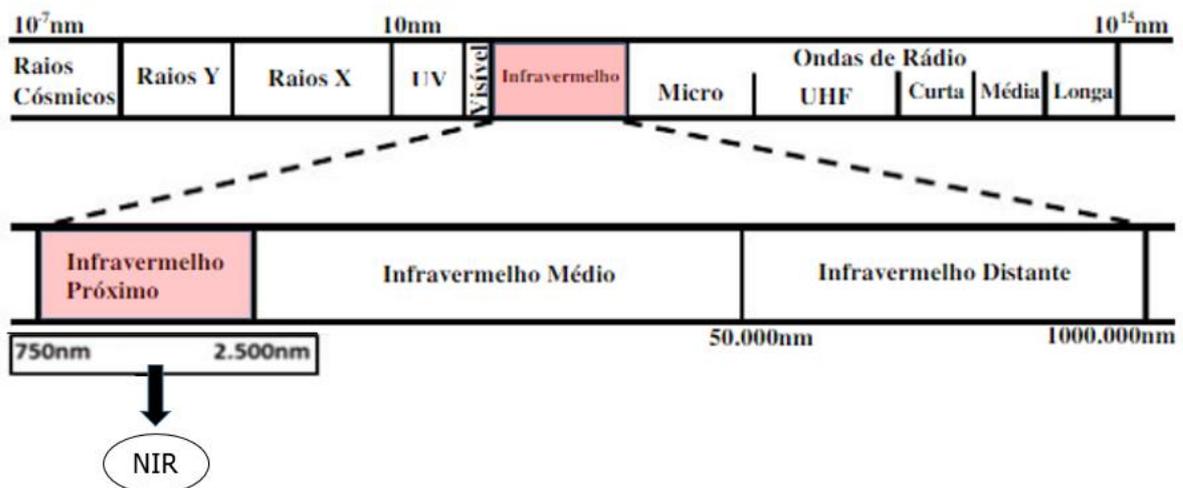
Apesar dos métodos químicos e genéticos disponibilizarem informações complementares que auxiliam no processo de identificação, o estudo da anatomia do lenho não deve ser deixado de lado. Mesmo com o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias voltadas para esse processo, a identificação anatômica continua sendo essencial, confiável e bastante consolidada (RICHTER, 2001).

2.4 Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)

Com o surgimento dos avanços tecnológicos, descobriram-se novos métodos não destrutivos para caracterização de madeira que permitiram o melhor aproveitamento dessa matéria-prima. Dentre esses métodos, a espectroscopia, no modo de reflexão, destaca-se por ser uma técnica simples, eficiente, de rápida obtenção de resultados e possibilidade de análises em tempo real (*on-line*). Demonstra, portanto, ser uma ferramenta adequada para a gestão e tomada de decisões no processo produtivo das indústrias (MUÑIZ *et al.*, 2012).

A técnica do NIR é baseada na espectroscopia vibracional e consiste na exposição de diversas amostras à radiação eletromagnética na região de comprimento de onda, que varia de 750 a 2.500 nm, para se obter os espectros de absorbâncias (FIGURA 1). Pode ser feita, então, a correlação desses espectros com os resultados de análises laboratoriais convencionais para gerar um modelo estatístico que busque explicar a maioria das informações contidas nos espectros (PASQUINI, 2003).

Figura 1 - NIR no espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Pasquini (2003).

No geral, a técnica do NIR tem como objetivo sondar uma amostra a fim de adquirir informações qualitativas e/ou quantitativas provenientes da interação da onda eletromagnética do infravermelho próximo com os constituintes da amostra (PASQUINI, 2003). Assim, para caracterizar uma amostra desconhecida, basta obter seu espectro e usar um modelo estatístico previamente construído para a predição ou classificação de suas propriedades.

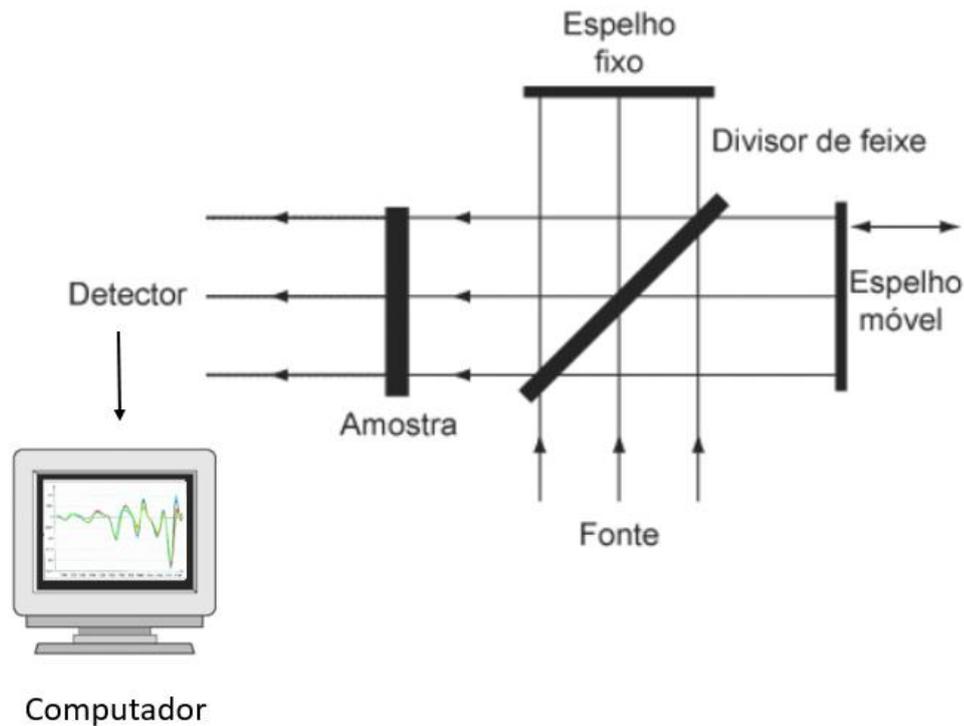
Para amostras sólidas, as principais medidas em NIR podem ser efetuadas no modo de transmitância e reflectância difusa. Usualmente, a reflectância difusa é mais largamente

empregada uma vez que requer tempo e preparo de amostra reduzidos (PASQUINI, 2003). O modo de reflectância difusa mede a potência do feixe de radiação que incide nas amostras sólidas, fibrosas ou granuladas. A cada pequena fração de milímetro o feixe encontra uma nova interface, e é refletido em várias direções (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009; PASQUINI, 2003). Já a transmitância calcula a razão entre as potências do feixe de radiação depois e antes de passar pela amostra (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009). Para obter o valor da absorbância para o modo de reflectância difusa, é preciso calcular o logaritmo decimal do inverso da reflectância. Enquanto no modo de transmitância, calcula-se o logaritmo decimal do inverso da transmitância para encontrar o valor da absorbância (PASQUINI, 2003; SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011).

Diferentes tipos de instrumentos estão disponíveis para a região do NIR, no entanto suas medidas são geralmente realizadas em espectrômetros, como os dispersivos e com transformada de Fourier (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009). Os espectrofotômetros de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR, do inglês *Fourier Transform Infrared*), assim como aqueles de infravermelho próximo (FT-NIR, do inglês *Fourier Transform Near Infrared*), são mais amplamente utilizados à frente dos dispersivos. Os FT-NIR garantem melhor relação sinal/ruído e limite de detecção, alta resolução e reprodutibilidade do comprimento de onda, velocidade superior na obtenção do espectro e maior aproveitamento da energia radiante em relação aos dispersivos (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009; SKOOG *et al.*, 2006).

Os espectrômetros são usualmente constituídos de quatro partes fundamentais: fonte luminosa; sistema de separação da luz policromática em função de diferentes comprimentos de onda; sistema para suporte das amostras e fotodetector (FIGURA 2). Assim, de acordo com o gráfico gerado é possível verificar a intensidade da radiação e a frequência de cada grupo funcional presente na amostra. Esse gráfico é denominado de espectro de infravermelho, o qual permite, por meio do conhecimento prévio de análises por métodos convencionais, caracterizar grupos funcionais em lotes de amostra desconhecidas (NAES *et al.*, 2002).

Figura 2 - Esquema ilustrativo de um espectrômetro.



Fonte: Adaptado de Naes *et al.* (2002).

É comum a incorporação de acessórios aos instrumentos NIR para a realização das medidas necessárias. Dependendo de alguns critérios, como as características da amostra, a velocidade da resposta instrumental desejada e as condições analíticas e ambientais, a incorporação dos acessórios pode melhorar a exatidão e versatilidade dos instrumentos (PASQUINI, 2003). Dentre as medidas em amostras sólidas, a aplicação da esfera integradora e da sonda óptica se destacam.

A esfera integradora é utilizada com frequência em medidas de reflectância difusa e consiste basicamente em uma esfera revestida internamente por um material de alta reflectância, normalmente o politetrafluoretileno (PTFE). A radiação entra através de um orifício na esfera, é direcionada para a amostra e então refletida. Os feixes de radiação são refletidos pela amostra e pela parede da esfera de maneira que a luz fica uniformemente distribuída para ser registrada no detector (HANSSEN; SNAIL, 2002). Mesmo coletando toda a radiação refletida e considerar uma área maior da amostra analisada (KOTHIYAL *et al.*, 2014; SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011), a esfera integradora é mais aplicada em análises laboratoriais. Em contrapartida, a sonda óptica possui maior flexibilidade em termos de análises remotas, pois permite medidas mais próximas de situações reais e facilita a aquisição de dados de rotina monitorando vários pontos da amostra (PASQUINI, 2003). Por meio desse acessório, é possível medir madeiras serradas, em toras e na árvore (KOTHIYAL

et al., 2014), deixando, portanto, de limitar o tamanho da amostra ao tamanho do acessório do instrumento e conseqüentemente promovendo melhor simulação às circunstâncias encontradas em postos de fiscalização.

Comparada aos métodos convencionais utilizados, a técnica do NIR apresenta uma série de vantagens. É um método rápido (um minuto ou menos na leitura de uma amostra), não invasivo, não destrutivo, adequado para uso em linha de produção, exige preparo mínimo da amostra e pode ser aplicado em qualquer molécula que apresente, especialmente, ligações C-H, O-H, N-H, S-H e C = O (PASQUINI, 2003). Além disso, possui instrumental simples, sendo possível de ser transportado a longas distâncias, visando seu uso em operações de fiscalização e verificação de autenticidade de amostras (MUÑIZ *et al.*, 2012).

Como toda técnica analítica, a NIR apresenta algumas desvantagens. Dentre elas é possível citar que as determinações quantitativas somente são possíveis através de prévia correlação entre os valores do parâmetro de interesse para um determinado grupo de amostras e os espectros obtidos (MUÑIZ *et al.*, 2012). A determinação desse parâmetro é feita durante a etapa de calibração onde são utilizados métodos destrutivos, outra desvantagem da técnica. Acaba sendo necessário tempo maior para a realização das análises, pois a calibração utiliza dados laboratoriais de métodos convencionais para relacionar com os dados espectrais da amostra (BÜNING-PFAUE, 2003). Podemos ressaltar também a sensibilidade da técnica às variações do ambiente como temperatura e umidade relativa do ar, podendo ocasionar alterações na eficiência dos resultados. Com relação às amostras, também podem haver alterações nos resultados devido às variações quanto a granulometria, umidade e heterogeneidade. Entretanto, estes problemas podem ser amenizados com a aplicação de tratamento nos dados espectrais (HEIN; LIMA; CHAIX, 2009).

2.5 Aplicação da NIR para identificação de madeiras

A NIR tem se tornado cada vez mais importante em pesquisas que utilizam como matéria-prima a madeira, para a previsão e classificação das suas propriedades (SCHIMLECK *et al.*, 2007). Diversos estudos comprovam o sucesso do método na avaliação das propriedades anatômicas, físicas e mecânicas da madeira (HEIN *et al.*, 2010; TSUCHIKAWA, 2007; TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). Aliada às estatísticas multivariadas e sistemas computacionais, a técnica é útil não apenas para aplicações quantitativas, mas também qualitativas, incluindo classificação de materiais de madeira (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015).

Tsuchikawa *et al.* (2003) combinaram a NIR e a distância de Mahalanobis para discriminar nove espécies de madeira (três coníferas e seis folhosas). Sua precisão e razoabilidade foram examinadas para amostras de madeiras com diferentes teores de umidade. O estudo ocorreu com os espectros originais ou pré-processados e sob dois intervalos de comprimento de onda (800-1100 nm e 800-2500 nm). Apenas a condição no estado de ponto de saturação das fibras (PSF) apresentou 100% de classificação correta, na qual o espectro no maior intervalo de comprimento de onda foi pré-processado com 2ª derivada.

Sandberg e Sterley (2009) investigaram se a NIR poderia ser usada com estatísticas multivariadas para separação entre cerne e alburno da mesma espécie do abeto Norueguês *Picea abies* (L.) Karst. Para a classificação da madeira em alburno e cerne, foi utilizada a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS). Todos os espécimes no conjunto de calibração foram classificados corretamente e apenas um foi classificado errado na previsão. Portanto, os autores concluem afirmando que é possível fazer a separação da madeira em cerne e alburno utilizando essa técnica.

Braga *et al.* (2011) desenvolveram um método de classificação aplicando espectroscopia no NIR associada a análise discriminante por PLS para diferenciar *Swietenia macrophylla* (mogno verdadeiro) de três madeiras semelhantes: *Carapa guianensis* (andiroba), *Cedrela odorata* (cedar), e *Micropholis melinoniana* (curupixá). Os modelos discriminantes apresentaram pequenos erros para cada espécie, indicando que identificações confiáveis podem ser feitas com NIR de superfícies de madeira maciça nas espécies estudadas.

Espinoza, Hodge e Dvorak (2012) avaliaram se a NIR poderia distinguir entre espécies puras de pinheiros e entre espécies puras e híbridas. Os resultados indicaram que NIR pode ser usada como uma ferramenta eficaz para distinguir entre espécies puras e sugeriram que também é eficiente para distinguir híbridos de seus pais. Verificar a hibrididade em pinheiro por meio da NIR pode ser mais rápido e menos caro e, em alguns casos, tão preciso quanto usar técnicas moleculares, oferecendo assim uma alternativa para avaliações moleculares mais caras.

Ramalho, Andrade e Hein (2018) verificaram o quão bem a NIR é capaz de discriminar espécies de madeiras de florestas nativas e plantadas. Os espectros NIR foram registrados na superfície radial de espécimes de madeira de quatro espécies nativas (*Cedrela sp.*, *Apuleia sp.*, *Aspidosperma sp.* e *Jacaranda sp.*) e dois clones comerciais (*Eucalyptus* para bioenergia e celulose e papel). A análise de componentes principais (PCA) da informação espectral mostrou que foi possível distinguir claramente os clones de eucalipto das matas nativas. A partir de análise discriminante por PLS de espectros NIR tratados, nenhuma amostra de madeira de eucalipto foi classificada como uma espécie florestal natural e vice-versa. Além disso, os

modelos PLS realizados a partir de espectros NIR não tratados obtiveram precisão de 86 a 100% para as espécies de madeira nativa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Seleção de amostras de madeiras

A coleta de amostras de madeira foi realizada na cidade de Lavras, estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil (21°10'S, 44°54'W). Foram adquiridas peças do tipo serrada, comercializadas pelo nome popular Cedrinho, usadas em estruturas para arquitetura e construção civil. No total, foram examinados 40 m³ de madeira em estoque de 3 empresas madeireiras.

Uma investigação forense foi feita e indicou que um consumidor pode encontrar até três espécies diferentes passadas por Cedrinho. O Quadro 2 mostra quais os dados rastreados dessas madeiras, incluindo a família de origem, o bioma de ocorrência, o tipo serrado da madeira e os principais usos nas atividades de construção civil em Lavras, Minas Gerais.

Quadro 2 - Madeiras tropicais comercializadas como Cedrinho em Lavras, MG, Brasil.

Tipos	Nomes científicos	Família	Nomes comerciais	Bioma	Tipo de madeira serrada	Principais usos
I	<i>Erisma uncinatum</i> Warm.	<i>Vochysiaceae</i>	Cedrinho	A	Vigas, caibros e forros	Construção civil leve e arquitetura em interiores
II	<i>Guarea guidonea</i> (L.) Sleumer	<i>Meliaceae</i>	Cedrinho, Cedro baia	A, Ca, C, MA	Vigas, caibros e pranchas	Construção civil leve e pesada; arquitetura em interiores
III	<i>Vochysia sp.</i> Aubl.	<i>Vochysiaceae</i>	Quaruba, Quarubarana	A, Ca, C, MA	Vigas, caibros e forros	Construção civil leve e pesada; arquitetura em interiores

Legenda: Bioma: A - Amazônia; Ca - Caatinga; C - Cerrado, MA - Mata Atlântica. Adaptado (Flora do Brasil 2020, under construction. Classificação da madeira serrada baseada no anexo III da Instrução Normativa 09/2016. Fonte: IBAMA (2016).

3.2 Preparação dos corpos de prova

O preparo dos corpos de prova foi realizado no Laboratório de Usinagem da Madeira do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os corpos de prova das três espécies selecionadas (*Erisma uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp.*) foram produzidos na dimensão aproximada de 5x4x4 cm (FIGURA 5), totalizando 108 amostras. Todas os corpos de prova foram produzidos com as faces orientadas exibindo os três planos de corte, transversal, tangencial e radial. Após o corte, as amostras foram lixadas em uma das faces do plano tangencial.

Figura 5 - Da esquerda para a direita: corpos de prova das espécies *Erisma uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp.*



Fonte: Do autor (2019).

3.3 Aquisição espectral

A leitura dos espectros no infravermelho próximo foi realizada por meio de um espectrômetro Bruker MPA (do inglês, *Multi Purpose Analyzer*) em conjunto com o programa de aquisição espectral *OPUS* versão 7.5. O espectrômetro é baseado em transformada de Fourier, e dotado de esfera de integração (FIGURA 6) e fibra ótica como vias de aquisição espectral. Os espectros foram coletados na faixa de 12.500 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} , com uma resolução espectral de 8 cm^{-1} no modo de reflexão difusa. A aquisição espectral foi realizada via esfera de integração e sonda de fibra ótica nas faces tangencial e transversal de cada corpo de prova. Na face tangencial dos corpos de prova foram coletados espectros tanto no lado lixado

quanto no lado não lixado. As informações espectrais foram adquiridas em sala climatizada, com temperatura em torno de 20 °C e 60% de umidade relativa do ar (FIGURA 7).

Figura 6 - Aquisição espectral no NIR via esfera de integração em espectrômetro NIR.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 7 - Armazenamento dos corpos de prova em sala climatizada.



Fonte: Do autor (2019).

3.4 Análise estatística multivariada

As análises estatísticas multivariadas foram realizadas utilizando os espectros sem pré-

tratamentos matemáticos. A Análise de Componentes Principais (PCA) e a Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA) foram realizadas utilizando o software livre Chemoface versão 1.65, desenvolvido na UFLA (NUNES *et al.*, 2012).

A PCA foi utilizada para verificar a similaridade espectral das diferentes amostras das espécies do estudo. Já a PLS-DA foi realizada para o desenvolvimento de modelos de classificação de espécies de madeira. O número de componentes principais adotado foi o valor sugerido pelo programa estatístico em função de menor erro. Para validação dos modelos de calibração, adotou-se o método de validação cruzada.

Para selecionar os modelos de predição, os seguintes parâmetros foram utilizados: (1) coeficiente de determinação do modelo para validação cruzada (R^2); (2) erro padrão da validação cruzada (RMSECV); (3) número de variáveis latentes (VL) utilizado na calibração; e (4) relação de desempenho do desvio (RPD). De posse dos resultados obtidos pelo software, foi construída uma matriz de confusão para avaliar o desempenho dos modelos de predição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Assinatura espectral no NIR

A média dos espectros de NIR coletados nos corpos de provas de madeira das espécies *Erismia uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp* nas superfícies dos planos tangenciais e transversais tanto via esfera integradora quanto fibra ótica foram plotadas nas Figuras 8 e 9.

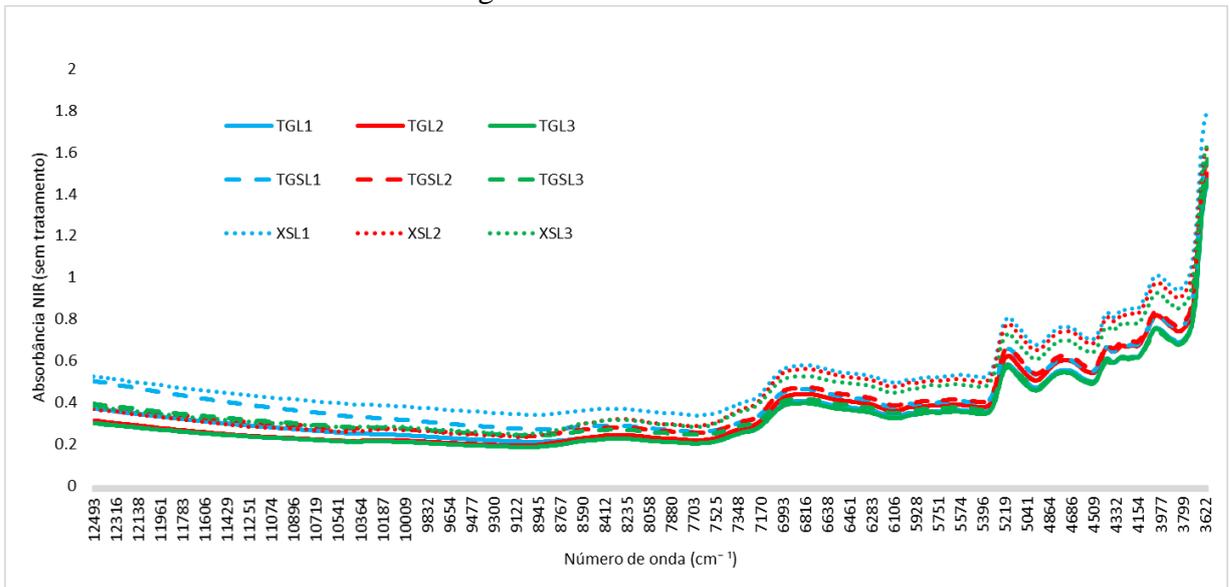
Segundo Pashin e Zeeuw (1970), todas as madeiras em termo genérico possuem características em comum, como a anisotropia. Possuem diferentes propriedades físicas quanto às variações dimensionais nas três direções espaciais (radial, tangencial e axial). Na anatomia da madeira os planos transversal e tangencial possuem características diferentes, no corte transversal são seccionados os elementos da madeira que estão alongados no sentido do eixo do tronco, tais como: vasos, fibras e parênquima axial e tangencial. No corte tangencial, podem-se observar, com auxílio de lente e às vezes a olho nu, os raios seccionados mostrando sua altura; as fibras, as linhas vasculares e o parênquima axial, mostrando o comprimento longitudinal de suas séries de células.

O comportamento dos espectros coletados é diferente para o plano tangencial e transversal. Tal comportamento indica que a face onde se coleta o espectro pode interferir nos resultados das análises dos dados. Também houve diferença no comportamento dos espectros para as diferentes espécies. Ambos os casos, as bandas de absorção mais intensas ocorreram entre 7500 a 4000 cm^{-1} . A diferença entre as informações espectrais é indício de que a técnica do NIR pode ser utilizada para diferenciar materiais e a análise estatística multivariada é indicada para se interpretar de melhor maneira essas informações. No entanto, a análise visual não é suficiente para discriminar as espécies. Sendo necessário o uso de estatística multivariada, como PCA e PLS-DA.

No trabalho de Costa *et al.* (2019), utilizando a esfera de integração, os espectros do NIR foram registrados a partir de uma área circular de 10 mm de diâmetro enquanto a sonda de fibra ótica coletou informações a partir de uma área de aproximadamente 1 mm de diâmetro.

Geralmente as bandas de absorção dos mesmos materiais analisados com fibra e esfera ocorrem nas mesmas regiões espectrais. A diferença geralmente é na quantidade de absorção, pois as bandas de uma dessas vias podem ocorrer com intensidades diferentes de absorção, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9. Como são os mesmos materiais analisados, a interferência aí é na área amostrada, que na esfera de integração é maior devido ao seu maior diâmetro de abertura, assim havendo maior área de contato do material com a radiação.

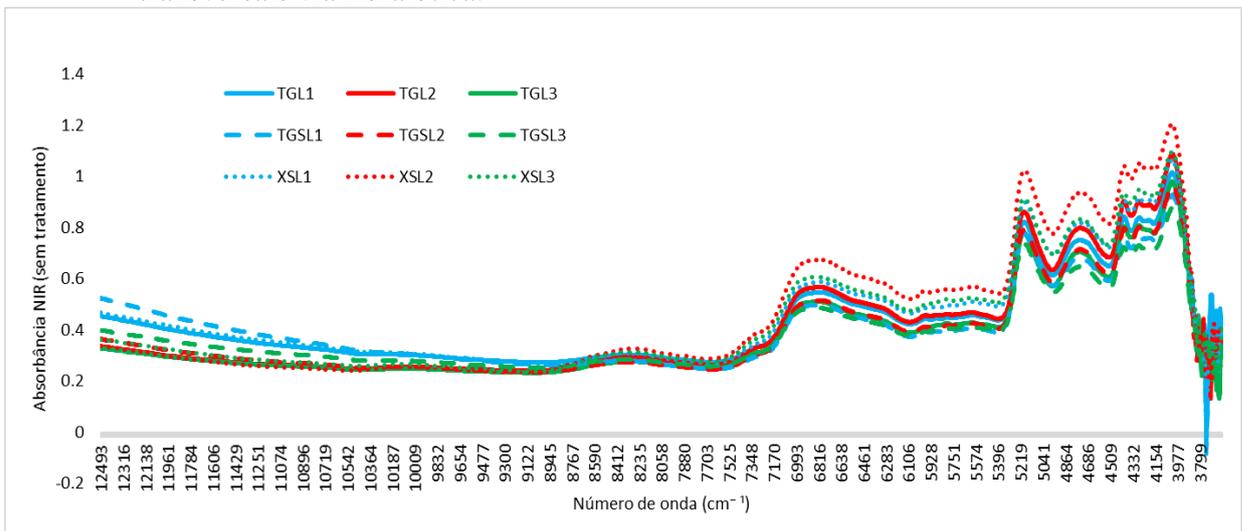
Figura 8 - Médias dos espectros registrados em corpos de provas de madeira das espécies de *Erisma uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp* nas superfícies tangenciais e transversais via esfera integradora.



Legenda: Planos da madeira: TG – Tangencial e X – Transversal. Preparo das amostras: L – Lixado e SL – Sem lixar. Espécies: 1 - Erisma; 2 – Guarea; 3 – Vochysia.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 9 - Médias dos espectros registrados em corpos de provas de madeira das espécies de *Erisma uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp* nas superfícies tangenciais e transversais via fibra ótica.



Legenda: Planos da madeira: TG – Tangencial e X – Transversal. Preparo das amostras: L – Lixado e SL – Sem lixar. Espécies: 1 - Erisma; 2 – Guarea; 3 – Vochysia.

Fonte: Do autor (2021).

4.2 Análise de componentes principais dos espectros no NIR

A seguir nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentados, em forma de gráfico bidimensional, os escores da análise de componentes principais (PCA) dos espectros no NIR não tratados

matematicamente coletados via esfera integradora e fibra ótica de corpos de provas das madeiras nativas: *Erismia uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp.*

A componente principal 1 (PC1) e 2 (PC2) explicaram juntas a variabilidade de dados para os tratamentos:

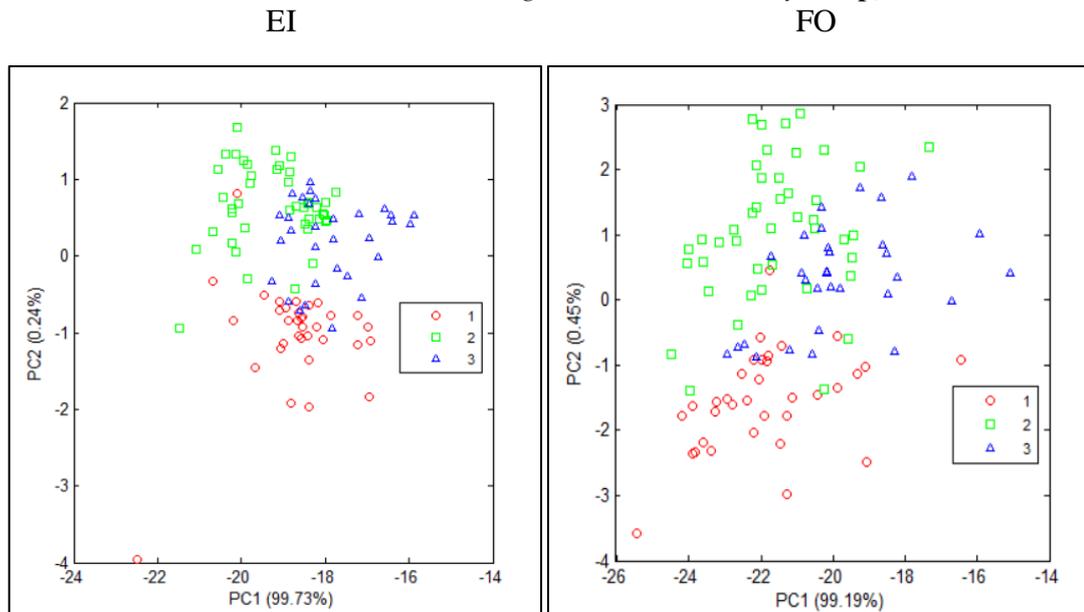
Tabela 2 - Variância explicada pelas componentes principais 1 e 2 nas diferentes vias de obtenção dos espectros e tratamentos existentes nos corpos de prova de madeira.

Via de aquisição espectral	Tratamentos	PC1 (%)	PC2 (%)	Variância cumulativa (%)
Esfera integradora	TGL	99,73	0,24	99,97
	TGSL	97,50	2,14	99,64
	XSL	99,42	0,52	99,94
Fibra ótica	TGL	99,19	0,45	99,64
	TGSL	98,24	1,34	99,58
	XSL	98,97	0,73	99,70

Legenda: Tratamentos: TG – Tangencial e X – Transversal. Preparo das amostras: L – Lixado e SL – Sem lixar.

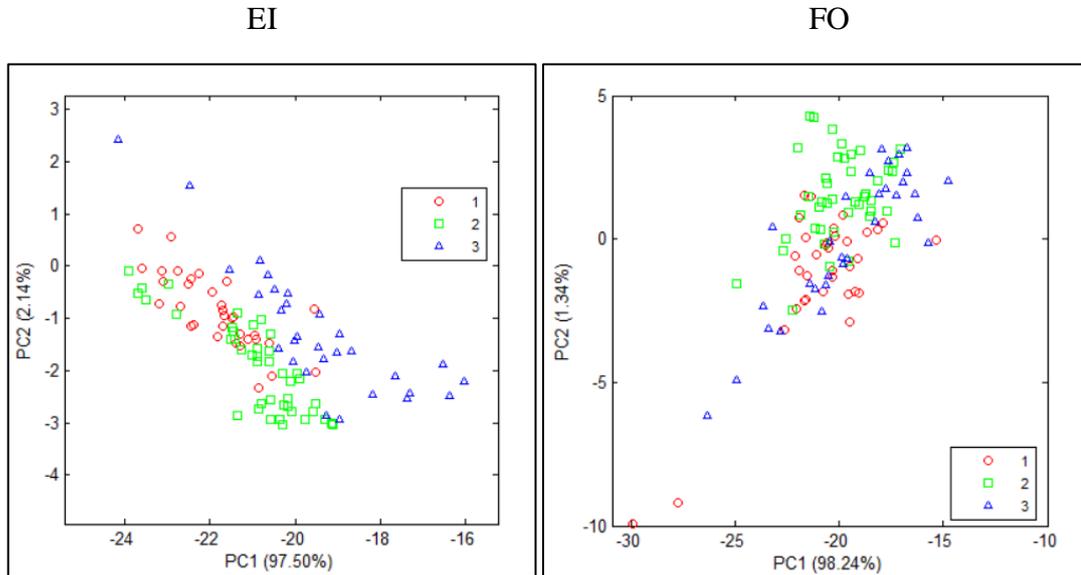
Fonte: Do autor (2021).

Figura 10 – Scores da PCA realizada a partir de espectros no NIR medidos pela esfera integradora (EI) e fibra ótica (FO) no plano tangencial lixado (Códigos: 1 – *Erismia uncinatum*, 2 – *Guarea guidonea* e 3 – *Vochysia sp.*)



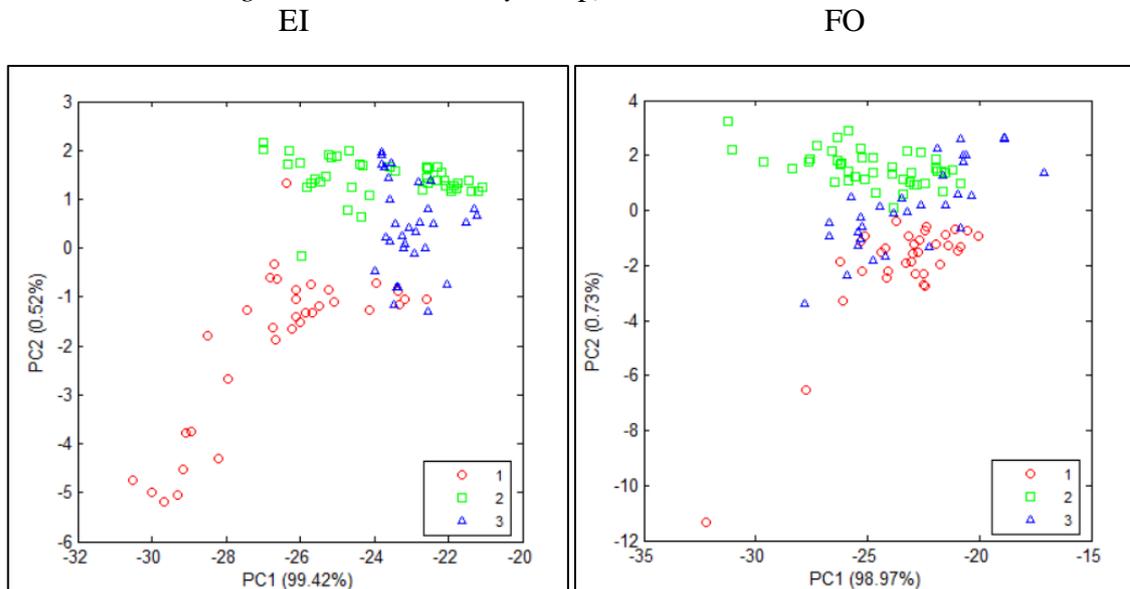
Fonte: Do autor (2021).

Figura 11 – Scores da PCA realizada a partir de espectros no NIR medidos pela esfera integradora (EI) e fibra ótica (FO) no plano tangencial sem lixar (Códigos: 1 – *Erisma uncinatum*, 2 – *Guarea guidonea* e 3 – *Vochysia* sp)



Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 – Scores da PCA realizada a partir de espectros no NIR medidos pela esfera integradora no plano transversal sem lixar (Códigos: 1 – *Erisma uncinatum*, 2 – *Guarea guidonea* e 3 – *Vochysia* sp)



Fonte: Do autor (2021).

Não foi possível distinguir os corpos de prova de madeira em grupos em função da espécie. Corpos de prova de madeira de mesma origem apresentaram similaridade espectral, mas todos os escores se concentram em um grande grupo.

Ramalho, Andrade e Hein (2018) verificaram o quão bem a NIR é capaz de discriminar espécies de madeiras de florestas nativas e plantadas. A análise de componentes principais

(PCA) da informação espectral mostrou que foi possível distinguir claramente os clones de eucalipto das matas nativas. Mas como nesse estudo as espécies são somente nativas, fica mais complexo observar somente a similaridade espectral, que é uma análise qualitativa. Necessitando de se utilizar análises classificatórias para melhor exploração dos dados, como análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA).

Lima *et al.* (2020) utilizaram a análise de componentes principais (PCA) junto a densidade básica da madeira para agrupar espécies. O objetivo do estudo foi demonstrar o potencial energético dos resíduos madeireiros de espécies amazônicas. Assim, foi possível observar que as análises estatísticas multivariadas são uma importante ferramenta para examinar a similaridade das propriedades tecnológicas da madeira e definir potenciais utilidades das madeiras Amazônicas. No trabalho também existe sobreposição de dados, o que impossibilitou a separação das madeiras por espécies.

4.3 Análise discriminante por mínimos quadrados parciais dos espectros no NIR

A análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) é uma análise classificatória que se baseia nas estimativas calculadas via PLS-R (Regressão por Mínimos Quadrados Parciais).

O resultado da validação cruzada oferece a probabilidade de o corpo de prova pertencer a uma espécie, caso não se enquadre nas características da espécie, o resultado vai para o grupo com as características mais parecidas dentro do banco de dados.

Para a análise dos resultados da validação cruzada na identificação das espécies foram utilizadas matrizes de confusão, na Tabela 3 encontram-se os resultados da classificação da matriz de confusão, onde nas linhas estão dispostas as espécies identificadas pelo identificador e nas colunas as predições via NIR.

Tabela 3 - Matriz de confusão da análise de validação cruzada para o plano Tangencial lixado e não lixado e Transversal via esfera de integração e fibra ótica.

Aquisição	Superfície	Processamento superficial	Espécie	Classificação via NIR			N Total	% acertos	
				<i>E. uncinatum</i>	<i>G. guidonea</i>	<i>Vochysia sp</i>			
EI	Tg	Lixado	<i>E. uncinatum</i>	33	1		34	97,06	
			<i>G. guidonea</i>		42	1	43	97,67	
			<i>Vochysia sp</i>			31	31	100	
		Não lixado	<i>E. uncinatum</i>	33	1		34	97,06	
			<i>G. guidonea</i>		43		43	100	
			<i>Vochysia sp</i>			31	31	100	
	X	Não lixado	<i>E. uncinatum</i>	33	1		34	97,06	
			<i>G. guidonea</i>		43		43	100	
			<i>Vochysia sp</i>			31	31	100	
	FO	Tg	Lixado	<i>E. uncinatum</i>	33		1	34	97,06
				<i>G. guidonea</i>		43		43	100
				<i>Vochysia sp</i>		1	30	31	96,77
Não lixado			<i>E. uncinatum</i>	34			34	100	
			<i>G. guidonea</i>		43		43	100	
			<i>Vochysia sp</i>			31	31	100	
X		Não lixado	<i>E. uncinatum</i>	34			34	100	
			<i>G. guidonea</i>		43		43	100	
			<i>Vochysia sp</i>			31	31	100	

Fonte: Do autor (2021).

Pela PLS-DA usando os espectros coletados via esfera de integração no plano tangencial lixado (TABELA 3) mostrou que de um total de um total de 34 corpos de prova da espécie *Erismia uncinatum*, apenas um foi classificado incorretamente. Já para a espécie *Guarea guidonea* de 42 corpos de prova, apenas um também foi classificado incorretamente. A

classificação pela PLS-DA da espécie *Vochysia sp* obteve excelentes resultados de identificação, dos 31 corpos de prova, 100% foi classificado corretamente. Ainda via esfera integradora os resultados expostos na Tabela 3 demonstram que as espécies *Guarea guidonea* e *Vochysia sp* apresentaram 100% de acerto tanto para plano tangencial quanto para o transversal. Na classificação da espécie *Erismia uncinatum* apenas 1 corpo de prova foi classificado de forma incorreta.

No caso da classificação via fibra ótica (TABELA 3) os resultados também foram excelentes, no plano tangencial lixado o modelo classificou corretamente 96,77% para *Vochysia sp*, 97,06% como *Erismia uncinatum* e 100% como *Guarea guidonea*. Ao utilizar espectros coletados no plano transversal e tangencial não lixado, as espécies *Erismia uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia sp* obtiveram 100% de acerto.

Os resultados encontrados são promissores quanto a utilização das duas vias de aquisição espectral (esfera integradora e fibra ótica). A assertividade dos métodos variaram de 96,77 a 100%, independentemente do tratamento ou plano de corte da madeira (transversal e tangencial) a ser analisado. Sendo assim o NIR apresenta-se como uma técnica de potencial para ações de fiscalização madeireira, e também pode ser utilizada na linha de frente do manejo sustentável de florestas.

Essa técnica tem sido utilizada nos últimos anos para distinção entre espécies puras de pinheiros e também é eficiente para distinguir híbridos de seus pais (ESPINOZA *et al.*, 2012), apresenta resultados convincentes para previsão da densidade básica de madeiras da Amazônia (NASCIMENTO *et al.*, 2017), diferenciar outras espécies de madeira (RAMALHO; ANDRADE; HEIN, 2018) e para produtos da madeira, como o carvão vegetal (RAMALHO *et al.*, 2017).

Pace *et al.* (2019), quando utilizaram NIR com a aplicação de validação cruzada junto a estatística multivariada para diferenciar 12 espécies através de amostras de madeira, obtiveram percentuais médios de acerto de 93,2%.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados do estudo, conclui-se que Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) associada a estatística multivariada apresenta potencial para discriminar madeiras de espécies tropicais a partir de modelos multivariados de classificação.

Utilizando as duas vias de aquisição espectral (esfera de integração e fibra ótica), a análise de componentes principais (PCA) baseada em espectros NIR e a análise visual da assinatura espectral, não foi possível distinguir claramente as madeiras das três espécies *Erismia uncinatum*, *Guarea guidonea* e *Vochysia* sp. Já utilizando a análise discriminante por quadrados mínimos parciais (PLS-DA), geraram valores percentuais de classificação acima de 96,77% para diferenciar madeiras tropicais fornecidas no mercado com o mesmo nome popular, indicando potencial para auxiliar nas ações de fiscalização e controle, comércio correto de madeiras e controle do estoque de madeiras em pátios de Manejo Florestal Sustentável. A técnica também apresenta grande potencial para uso prático ao utilizar a coleta de espectros na face transversal e tangencial das madeiras e classificação das mesmas por modelos PLS-DA.

Lixar ou não lixar a face tangencial do corpo de prova não influenciou nos resultados obtidos quando analisados os dados, indicando que não precisa ser feito o preparo dos corpos de prova para fazer a aquisição dos espectros via esfera integradora ou fibra ótica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, N. A. *et al.* Mercado de madeiras tropicais: substituição na demanda de exportação. **Acta Amazonica**, [Manaus], v. 40, n. 1, p. 119-126, mar. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/HzXn8Fqtt9Q8ckRdQMw53Zz/?lang=pt>. Acesso em: 14 set. 2021.
- BARLOW, J. *et al.* The future of hyperdiverse tropical ecosystems. **Nature**, [London], v. 559, p. 517–526, July 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0301-1>. Acesso em: 14 set. 2021.
- BECK, J. *et al.* Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species' geographic distributions. **Ecological Informatics**, [Amsterdam], v. 19, p. 10-15, Jan. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954113001155>. Acesso em: 19 set. 2021.
- BESSA, F. M. S. **Criação de uma xiloteca eletrônica (e-xiloteca) tropical e sua utilização para identificação e caracterização de madeiras com fins científicos e econômicos**. 2009. 336 p. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, [Washington], v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, June 2008. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1155121>. Acesso em: 21 set. 2021.
- BOTOSSO, P. C. **Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 65 p. (Documentos/Embrapa Florestas, ISSN 1517-52X; 194).
- BRAGA, J. W. B. *et al.* The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla*. **IAWA Journal**, [Leiden], v. 32, n. 2, p. 285-296, Jan. 2011. Disponível em: https://brill.com/view/journals/iawa/32/2/article-p285_12.xml. Acesso em: 22 set. 2021.
- BÜNING-PFAUE, H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 82, n. 1, p. 107-115, July 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814602005836>. Acesso em: 18 set. 2021
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CARDOSO, D. *et al.* Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. **PNAS**, [United States], v. 114, n. 40, p. 10695-10700, Oct. 2017. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/114/40/10695.short>. Acesso em: 24 set. 2021.
- CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, 2002. 19 p.

COSTA, A. C. P. R. *et al.* Classification of commercial charcoal for domestic use by near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, [Reino Unido], v. 127, p. 1-7, Aug. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953419302296>. Acesso em: 25 set. 2021.

CURY, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Caracterização e descrição da estrutura anatômica do lenho de seis espécies arbóreas com potencial medicinal. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 13, n. 3, p. 311-318, jan. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbpm/a/3dxmYxnmMNNHCdf673m9QVC/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 19 set. 2021.

CYSNEIROS, V. C. *et al.* Espécies madeireiras da Amazônia: riqueza, nomes populares e suas peculiaridades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [Colombo], v. 38, n. e201801567, p. 1-14, dez. 2018. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1567>. Acesso em: 14 ago. 2021.

DE SOUZA, D. R. *et al.* Análise estrutural em floresta ombrófila densa de terra firme não explorada, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 75-87, fev. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/vgcB7NkVT6fdBb8r9jFcPBc/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25 set. 2021.

DORMONTT, E. E. *et al.* Forensic timber identification: it's time to integrate disciplines to combat illegal logging. **Biological Conservation**, [Oxford], v. 191, p. 790-798, Nov. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320715300033>. Acesso em: 25 set. 2021.

ESPINOZA J. A.; HODGE G. R.; DVORAK, W. S. The potential use of near infrared spectroscopy to discriminate between different pine species and their hybrids. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [Chichester], v. 20, n. 4, p. 437-447, June 2012. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/jnirs/abstract.cfm?uri=jnirs-20-4-437>. Acesso em: 25 set. 2021.

FARACO JÚNIOR, J. H.; COELHO, L. F. **Manual prático de treinamento de mateiros**. Departamento de Prospecção Precious Wood. Itacoatiara: Mil Madeireira Itacoatiara Ltda, 1996. 154 p.

FEELEY, K. Are we filling the data void? An assessment of the amount and extent of plant collection records and census data available for tropical South America. **Plos One**, [San Francisco], v. 10, n. 4, p. 1-17, Apr. 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0125629>. Acesso em: 15 set. 2021.

FERRAZ, I. D. K. *et al.* Características básicas para um agrupamento ecológico preliminar de espécies madeireiras da floresta de terra firme da Amazônia Central. **Revista Acta Amazônica**, Manaus, v. 34, n. 4, p. 621-633, dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/RtrmcwTMTxvtz4t5LWZyz3d/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2021.

FERREIRA, G. C.; GOMES, J. I.; HOPKINS, M. J. G. Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como “Angelim”. **Revista Acta Amazônica**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 387–398, set. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/VHbXsTRkSsd9qc4CVB4GCVt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 set. 2021.

GASSON, P. Does wood anatomy support tribal and generic classification in papilionoid Leguminosae? *In*: HERENDEEN, P. S.; BRUNEAU, A. (eds). **Advances in Legume Systematics**. 2000. 9 v., p. 201-215.

GRACE, J. *et al.* Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, [Malden], v. 33, n. 3, p. 387–400, Mar. 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2699.2005.01448.x>. Acesso em: 27 set. 2021.

HANSSEN, L. M.; SNAIL, K. A. Integrating Spheres for Mid- and Near-infrared Reflection Spectroscopy. *In*: CHALMERS, J. M.; GRIFFITHS, P. R. (eds.). **Handbook of Vibrational Spectroscopy**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 2 v., p. 1175-1192.

HEBERT, P. D. N. *et al.* Biological identifications through DNA barcodes. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [London], v. 270, n. 1512, p. 313-321, Feb. 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12614582/>. Acesso em: 28 set. 2021.

HEIN, P. R. G. *et al.* Resonance and near infrared spectroscopy for evaluating dynamic wood properties. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [Chichester], v. 18, n. 6, p. 443-454, Jan. 2010. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/jnirs/abstract.cfm?uri=jnirs-18-6-443>. Acesso em: 30 set. 2021.

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**, [Chichester], v. 17, n. 3, p. 141-150, Jan. 2009. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/jnirs/abstract.cfm?uri=jnirs-17-3-141>. Acesso em: 29 set. 2021.

HERMANSON, J. C.; WIEDENHOEFT, A. C. A brief review of machine vision in the context of automated wood identification systems. **IAWA Journal**, [Leiden], v. 32, n. 2, p. 233-250, Jan. 2011. Disponível em: https://brill.com/view/journals/iawa/32/2/article-p233_8.xml. Acesso em: 29 set. 2021.

HIGUCHI, N. *et al.* Bacia 3 - Inventário diagnóstico da regeneração natural. **Acta Amazonica**, [Manaus], v. 15, n. 1-2, p. 199-233, 1985. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/SLHMj5tH77DvgVcKSjXBWVK/?lang=pt>. Acesso em: 01 out. 2021.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de Análise Instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOPKINS, M. J. G. Modelling the known and unknown plant biodiversity of the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, [Malden], v. 34, n. 8, p. 1400-1411, Aug. 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2699.2007.01737.x>. Acesso em: 30 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Brasil em síntese – Território**. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>. Acesso em: 15 jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. Instrução normativa nº 09, de 12 de dezembro de 2016. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, 13 dez. 2016. Seção 1, nº 238, p. 63. Disponível em: <http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2016/12/INSTRUCAO-NORMATIVA-N-9-2016-IBAMA.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS - IAWA. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *In*: WHEELER, E. A.; BASS, P.; GASSON, P. E. (eds). **IAWA Bull.** 1989. p. 219-332.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS - IAWA. IAWA list of microscopic features for softwood identification. RICHTER, H. G. *et al.* (eds). **IAWA Journal**, [Leiden], v. 25, n. 1, p. 1-70, 2004. Disponível em: https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/01_IAWA-Softwood_List.pdf. Acesso em: 30 set. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Madeiras: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: IPT/SVMA/SindusCon-SP, 2003. 59 p.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION - ITTO. **Biennial review and assessment of the world timber situation 2017-2018**. Japão: Yokohama, 2018. 211 p.

KEENAN, F. J.; TEJADA, M. **Tropical timber for building materials in the andean group countries of South America**. Ontario: International Development Research Centre-IDRC, 1984. 151 p.

KOOPMAN, W.; DIEMONT, H. **Prospects for the molecular identification of CITES-protected timber species and origins**. Wageningen: North-south Policy Brief, 2004.

KOTHIYAL, V. *et al.* Enhancing the applicability of near infrared spectroscopy for estimating specific gravity of green timber from *Eucalyptus tereticornis* by developing composite calibration using both radial and tangential face of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, [New York], v. 72, p. 11-20, Jan. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00107-013-0742-z.pdf>. Acesso em: 01 out. 2021.

LANDERAS, G. *et al.* Identification of *Prosopis juliflora* and *Prosopis pallida* accession using molecular markers. **Biodiversity and Conservation**, [Dordrecht], v. 15, p. 1829-1844, June 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-004-6682-5>. Acesso em: 05 out. 2021.

LIMA, L. S. de *et al.* Illegal logging as a disincentive to the establishment of a sustainable forest sector in the Amazon. **Plos One**, [San Francisco], p. 1-21, Dec. 2018. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0207855>. Acesso em: 03 out. 2021.

LIMA, M. D. R. *et al.* Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass & Bioenergy**, [Kidlington], v. 140, p. 1-15, Sept. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195342030194X>. Acesso em: 13 dez. 2021.

LOWE, A. J.; CROSS, H. B. The application of DNA methods to timber tracking and origin verification. **IAWA Journal**, [Leiden], v. 32, p. 251–262, Jan. 2011. Disponível em: https://brill.com/view/journals/iawa/32/2/article-p251_9.xml. Acesso em: 07 out. 2021.

LOWE, A. J. *et al.* Opportunities for improved transparency in the timber trade through scientific verification. **BioScience**, [Washington], v. 66, n. 11, p. 990-998, Nov. 2016. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/66/11/990/2754311?login=true>. Acesso em: 07 out. 2021.

MALDONADO, C. *et al.* Estimating species diversity and distribution in the era of Big Data: to what extent can we trust public databases? **Global Ecology and Biogeography**, [Malden], v. 24, n. 8, p. 973-984, Aug. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/geb.12326>. Acesso em: 25 set. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Lista nacional oficial de espécies da flora ameaçadas de extinção. **Portaria MMA 443, 17 de dezembro de 2014**, 2014. Disponível em: https://dados.gov.br/dataset/portaria_443. Acesso em: 22 ago. 2021.

MUÑIZ, G. I. B. *et al.* Fundamentos e estado da arte da espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865-875, out./dez. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/kGDgJHNw6NzPjpcxXHhsqpx/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 08 set. 2021.

NAES, T. *et al.* User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and classification. **Journal of Chemometrics**, Chichester, v. 17, n. 10, p. 571-572, 2002. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-user-friendly-guide-to-multivariate-calibration-N%C3%A6s-Isaksson/d011909517fc8c89d7a239bd63305e6af63e3e7a>. Acesso em: 11 out. 2021.

NASCIMENTO, L. B. *et al.* Anatomical identification of commercialized wood in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, [São Paulo], v. 40, p. 291-329, Sept. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40415-016-0324-5>. Acesso em: 30 jul. 2021.

NORMAND, D. **Manuel d'identification des bois commerciaux**. 2^a ed. France: Tome 1, 1972. 171 p.

NUNES, C. A. *et al.* Chemoface – Free user-friendly interface for Chemometrics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 23, n. 11, p. 2003-2010, Nov. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/XkQMMnpQZrBHMJr3XDtkwYQ/?lang=en/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

PACE, J. H. C. *et al.* Wood species identification from Atlantic Forest by near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, [Madrid], v. 28, n. 3, p. 1-10, Dec. 2019. Disponível em: <https://revistas.inia.es/index.php/fs/issue/view/160>. Acesso em: 15 dez. 2021.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3. ed. New York: Mcgraw-Hill, 1970. 1 v. 705 p.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [São Paulo], v. 14, n. 2, p. 198-219, Apr. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/R8Z76mVbzwk6RCYCLGkSnz/abstract/?lang=en>. Acesso em: 15 out. 2021.

PASTORE, T. C. M. *et al.* Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: Discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixa. **Holzforchung**, [Berlin], v. 65, n. 1, p. 73-80, Jan. 2011. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/hf.2011.010/html>. Acesso em: 15 ago. 2021.

PEVS/IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2019**. Rio de Janeiro, 2019. 34 v., p. 1-8. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021.

RAMALHO, F. M. G.; ANDRADE, J. M.; HEIN, P. R. G. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, [Madrid], v. 27, n. 2, p. e008, 2018. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6805981>. Acesso em: 16 set. 2021.

RAMALHO, F. M. G. *et al.* Potential of Near-Infrared Spectroscopy for Distinguishing Charcoal Produced from Planted and Native Wood for Energy Purpose. **Energy & Fuels**, [Washington], v. 31, n. 2, p. 1593-1599, Jan. 2017. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.6b02446>. Acesso em: 10 out. 2021.

REIS, L. P. *et al.* Avaliação do potencial madeireiro na Floresta Nacional do Tapajós, após 28 anos da exploração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 265-281, out. 2010. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/144>. Acesso em: 06 out. 2021.

RICHTER, H. G. **Wood anatomy – possibilities and limitations**. Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Hamburgo. Development and Introduction of Improved Methods to Identify Commercial Timber and its Origin. Hamburgo, Alemanha, 2001.

SCARANO, F. R.; SILVA, J. M. C. Production and international trade: challenges for achieving targets 6 and 11 of the Global Strategy for Plant Conservation in Brazil. **Rodriguésia**, [Rio de Janeiro], v. 69, n. 4, p. 1577-1585, Oct./Dec. 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rod/a/8XyTH6S74ycQ8TxVcwMcY8r/abstract/?lang=en>. Acesso em: 06 out. 2021.

SCHIMLECK, L. R. *et al.* Microfibril angle prediction of *Pinus taeda* wood samples based on tangencial face NIR spectra. **IAWA Journal**, [Leiden], v. 28, n. 1, p. 1–12, Jan. 2007. Disponível em: https://brill.com/view/journals/iawa/28/1/article-p1_1.xml. Acesso em: 28 ago. 2021.

SCHULMAN, L.; TOIVONEN, T.; RUOKOLAINEN, K. Analysing botanical collecting effort in Amazonia and correcting for it in species range estimation. **Journal of Biogeography**, [Malden], v. 34, n. 8, p. 1388-1399, Aug. 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2699.2007.01716.x>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. J. A review of Band Assignments in near Infrared Spectra of Wood and Wood Components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [Chichester], v. 19, p. 287-308, Nov. 2011. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1255/jnirs.955>. Acesso em: 01 out. 2021.

SKOOG, D. A. *et al.* **Fundamentos de química analítica**. 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. 2006. 107 p. Disponível em: <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2021.

SOCIEDADE FLORESTAL BRASILEIRA - SFB. **Boletim do Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF) 2020**. 1. ed. Brasília, Distrito Federal, 2020. 66 p. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim_SNIF_ed1_2020_vfinal.pdf. Acesso em: 14 ago. 2021.

SOCIEDADE FLORESTAL BRASILEIRA - SFB. **Florestas do Brasil 2019**. 2019. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Florestas_Brasil_2019_Portugues.pdf. Acesso em: 14 ago. 2021.

SOUSA-BAENA, M. S.; GARCIA, L. C.; PETERSON, A. T. Completeness of digital accessible knowledge of the plants of Brazil and priorities for survey and inventory. **Diversity and Distributions**, [Malden], v. 20, n. 4, p. 369-381, Apr. 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ddi.12136>. Acesso em: 30 ago. 2021.

STEEGE, H. T. *et al.* A descoberta da flora arbórea da Amazônia com uma lista atualizada de todos os taxa arbóreos conhecidos. **Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, Belém, v. 11, n. 2, p. 231-261, maio/ago. 2016. Disponível em: <https://boletimcn.museu-goeldi.br/bcnaturais/article/view/431>. Acesso em: 10 set. 2021.

STEEGE, H. T. *et al.* Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, [Washington], v. 342, n. 6156, p. 1243092, Oct. 2013. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1243092>. Acesso em: 11 set. 2021.

TSUCHIKAWA, S. A review of recent near infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, [Philadelphia], v. 42, n. 1, p. 43-71, Feb. 2007. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05704920601036707>. Acesso em: 03 set. 2021.

TSUCHIKAWA, S. *et al.* Application of nearinfrared spectroscopy to wood discrimination. **Journal of Wood Science**, [Tokyo], v. 49, p. 29-35, Feb. 2003. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s100860300005>. Acesso em: 10 set. 2021.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, [Tokyo], v. 61, p. 213-220, Apr. 2015. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-015-1467-x>. Acesso em: 06 set. 2021.

VALE, M. M.; JENKINS, C. N. Across-taxa incongruence in patterns of collecting bias. **Journal of Biogeography**, [Malden], v. 39, n. 9, p. 1744-1748, Sept. 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2699.2012.02750.x>. Acesso em: 15 set. 2021.

VLAM, M. *et al.* Developing forensic tools for an African timber: Regional origin is revealed by genetic characteristics, but not by isotopic signature. **Biological Conservation**, [Oxford], v. 220, p. 262–271, Apr. 2018. Disponível em: https://journals.scholarsportal.info/details/00063207/v220icomplete/262_dftfaacbnbis.xml&sub=all. Acesso em: 01 set. 2021.