

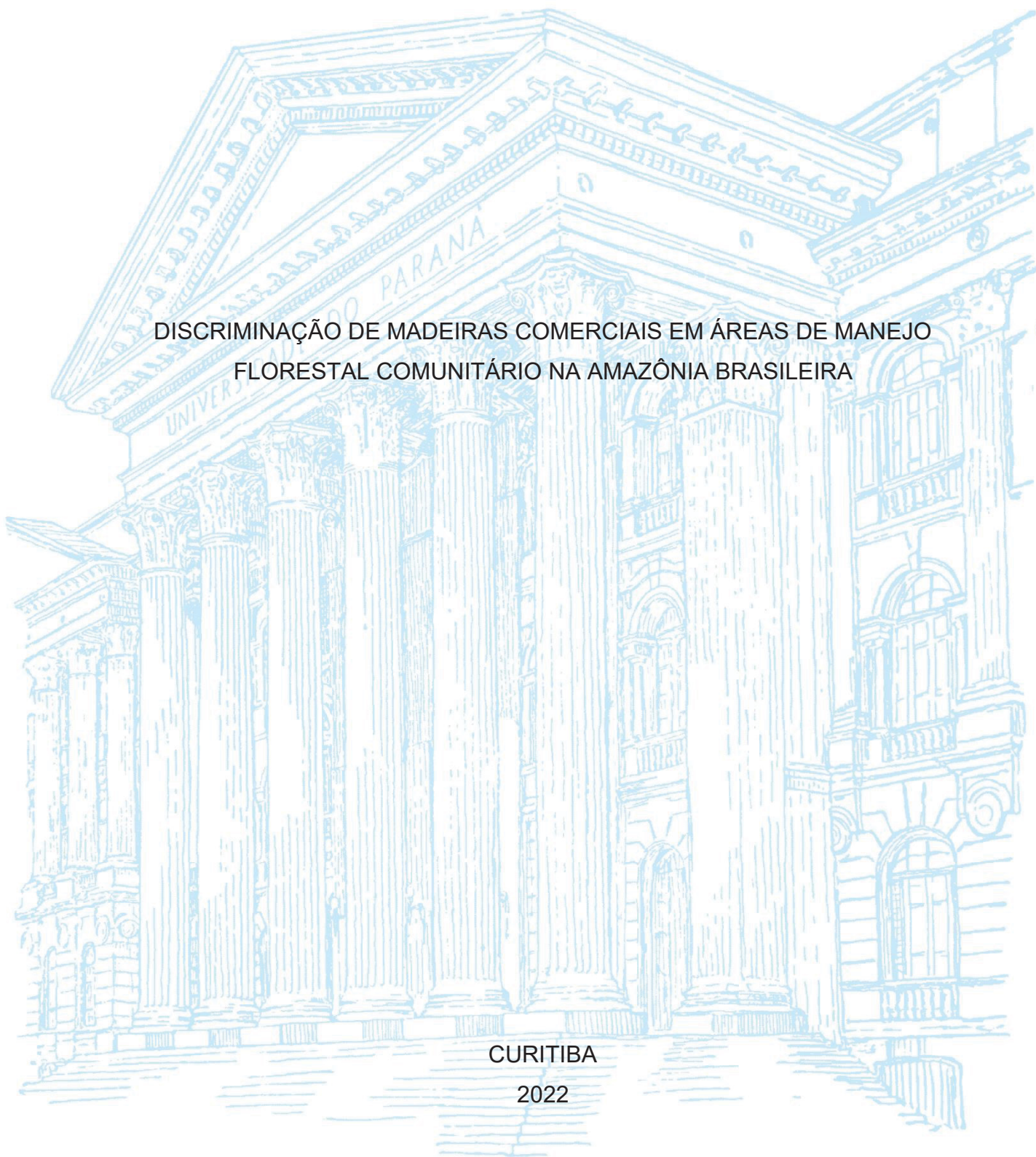
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOIELAN XIPAIA DOS SANTOS

DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS COMERCIAIS EM ÁREAS DE MANEJO
FLORESTAL COMUNITÁRIO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

CURITIBA

2022



JOIELAN XIPAIA DOS SANTOS

DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS COMERCIAIS EM ÁREAS DE MANEJO
FLORESTAL COMUNITÁRIO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal. Área de Concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

Orientadora: Profa. Dra. Silvana Nisgoski

Coorientadoras: Profa. Dra. Patrícia Soffiatti e Profa. Dra. Graciela Inés Bolzon de Muñiz

CURITIBA

2022

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Santos, Joielan Xipaia dos

Discriminação de madeiras comerciais em áreas de manejo florestal comunitário na Amazônia Brasileira / Joielan Xipaia dos Santos. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Orientadora: Profa. Dra. Silvana Nisgoski

Coorientadoras: Profa. Dra. Patrícia Soffiatti

Profa. Dra. Graciela Inés Bolzon de Muñiz

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 27/10/2022.

1. Madeira - Identificação - Amazônia. 2. Florestas - Manejo.
3. Madeira - Anatomia. 4. Espectroscopia de infravermelho. 5. Teses.
I. Nisgoski, Silvana. II. Soffiatti, Patrícia. III. Bolzón Muñiz, Graciela Inés.
IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.810(811)

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JOIELAN XIPAIA DOS SANTOS** intitulada: **DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS COMERCIAIS EM ÁREAS DE MANEJO FLORESTAL COMUNITÁRIO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**, sob orientação da Profa. Dra. SILVANA NISGOSKI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Outubro de 2022.

Assinatura Eletrônica
28/10/2022 18:49:00.0
SILVANA NISGOSKI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
31/10/2022 12:06:43.0
SIMONE RIBEIRO MORRONE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
01/11/2022 08:52:13.0
CLÁUDIA FRANCA BARROS
Avaliador Externo (INSTITUTO DE PESQUISAS JARDIM BOTANICO
DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica
31/10/2022 09:29:41.0
ERIKA AMANO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
30/10/2022 22:20:14.0
LÍVIA CÁSSIA VIANA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS)

À Deus e à minha família Xipaya.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Silvana Nisgoski, pelo total apoio, liberdade e contribuições valiosas ao desenvolvimento deste trabalho, pela confiança e credibilidade a mim depositada.

Às minhas Coorientadoras, Professoras Patrícia Soffiatti e Graciela Inés Bolzon de Muñiz, pelas valiosas contribuições e sugestões a este trabalho.

À minha mãe Maria Lúcia Xipaia de Carvalho e meu pai Francisco Curuaia Mendes pelo apoio incondicional nessa longa jornada, pela compreensão nos momentos de ausência. Obrigada pelo esforço para que eu pudesse superar cada obstáculo e, principalmente, pelo amor incondicional. A vocês, minha família, sou eternamente grata por tudo que sou, que conseguir conquistar.

Aos meus irmãos, pelos momentos felizes que tivemos juntos, que fizeram desta jornada não somente um período de crescimento profissional, mas também de crescimento pessoal.

Ao Deivison Venicio Souza por todo o amor, apoio e companheirismo ao longo de toda essa jornada.

As minhas amigas Helena Cristina Vieira e Tawani Lorena Naide, que sempre estiveram me apoiando em minha caminhada pessoal e profissional.

Aos amigos de Curitiba por todos os momentos repartidos e por mostrarem que não há barreiras de áreas de pesquisa e regiões de origem à verdadeira amizade.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal pela honra de poder estudar na instituição de ensino florestal mais antiga do país e que tantas conquistas proporciona à ciência florestal no Brasil.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudo.

Finalizo meus agradecimentos a Deus, por colocar pessoas tão especiais em mais esta etapa da minha vida. Sem elas certamente nada disso seria possível. Obrigada Deus por estar sempre comigo e pela fé que deposita em meu coração.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

“Se soubesse que o mundo se acabaria amanhã, eu ainda hoje plantaria uma árvore.”

Martín Luther

RESUMO

A correta identificação de espécies florestais é de extrema importância, pois o uso do nome vernacular omite a verdadeira ocorrência geográfica das espécies. No entanto, existe grande dificuldade de relacionar nome científico com o nome vernacular, haja vista que não há uma padronização que associe um nome popular a um nome científico. O principal objetivo desta pesquisa é contribuir para conservação da flora em áreas de Manejo Florestal Comunitário na Amazônia Brasileira, usando de ferramentas inovadoras de distinção de espécies florestais de valor comercial associada à caracterização anatômica da madeira. As amostras de madeira utilizadas nesta pesquisa foram coletadas nas Comunidades Extrativistas Paraíso e Arimum, localizadas na Reserva Extrativista Verde para Sempre, no Estado do Pará. A identificação das amostras de madeira foi realizada através da caracterização anatômica macroscópica e microscópica, de acordo com as normas da Associação Internacional dos Anatomistas de Madeira (IAWA, 1989) no laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira (LANAQM) da Universidade Federal do Paraná, UFPR. Foram avaliadas amostras de madeira das famílias Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae nas três superfícies anatômicas: transversal, radial e tangencial. A determinação da cor das amostras foi realizada através da curva de reflectância no espectro visível, na faixa de 360 a 740 nm, e da análise de componentes principais (PCA) com base nos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* e h). Os espectros do Infravermelho Próximo (NIR), na faixa de 4.000 a 10.000 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} , foram obtidos diretamente das amostras de madeira nas diferentes seções anatômicas (transversal, tangencial e radial). Os espectros originais e em segunda derivada foram avaliados através da Análise de Componentes Principais (PCA) e modelos de classificação k -NN foram treinados. O conjunto de dados foi dividido em aprendizado (70%) e teste (30%), usando de amostragem estratificada aleatória. O método k -fold cross validation foi usado para encontrar o hiperparâmetro k de ajuste ótimo. Todas as análises foram realizadas no ambiente R. Observou-se uniformidade das características anatômicas da madeira nas análises macroscópicas e microscópicas das espécies avaliadas. Os caracteres anatômicos mais eficazes para a discriminação das amostras das famílias Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae foram o tipo de parênquima axial, presença de fibras septadas, tipo e agrupamento de vasos, presença de células oleíferas e amido. No que tange à técnica colorimétrica, os resultados indicaram que os dados do sistema CIEL* a^* b^* produziram informações úteis para a discriminação das madeiras. Em relação aos resultados do NIR, foram promissores e indicaram a possibilidade de integração da espectroscopia NIR e técnicas de aprendizado de máquina na discriminação de espécies comercializadas na Amazônia brasileira. Porém, outros estudos são necessários, bem como a construção de um banco de dados espectral com mais amostras das espécies de outras famílias.

Palavras-chave: Caracteres anatômicos, CIELAB, infravermelho próximo, madeiras nativas.

ABSTRACT

The correct identification of forest species is extremely important, as the use of the vernacular name omits the true geographic occurrence of the species. However, there is great difficulty in relating the scientific name with the vernacular name, given that there is no standardization that associates a popular name with a scientific name. The main objective of this research is to contribute to the conservation of flora in areas of Community Forest Management in the Brazilian Amazon, using innovative tools to distinguish commercially valuable forest species associated with the anatomical characterization of wood. The wood samples used in this research were collected in the Paraiso and Arimum Extractive Communities, located in the Verde para Sempre Extractive Reserve, in the State of Pará. The identification of wood samples was performed through macroscopic and microscopic anatomical characterization, according to the norms of the International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1989) in the Laboratory of Anatomy and Quality of Wood (LANAQM) of the Federal University of Paraná, UFPR. Wood samples from the Lauraceae, Proteaceae and Fabaceae families were evaluated on the three anatomical surfaces: transverse, radial and tangential. The determination of color samples was through the reflectance curve in the visible spectrum, in the range from 360 to 740 nm, and the principal component analysis (PCA) based on the colorimetric parameters (L^* , a^* , b^* , C^* and h). The Near Infrared (NIR) spectra, in the range from 4.000 to 10.000 cm^{-1} and resolution of 4 cm^{-1} , were obtained directly from wood samples in different anatomical sections (transverse, tangential and radial). The original and second derivative spectra were evaluated using Principal Component Analysis (PCA) and k-NN classification models were trained. The dataset was divided into learning (70%) and testing (30%), using stratified random sampling. The k-fold cross validation method was used to find the optimal fit hyperparameter k. All analyzes were performed in the R environment. Uniformity of the anatomical characteristics of the wood samples from the macroscopic and microscopic analyzes of the evaluated species was observed. The most effective anatomical characters for the discrimination of samples from the Lauraceae, Proteaceae and Fabaceae families were the type of axial parenchyma, presence of septate fibers, type and grouping of vessels, presence of oil cells and starch. Regarding the colorimetric technique, the results indicated that the data from the CIEL* a^* b^* system produced useful information for the discrimination of woods. Regarding the NIR results, they were promising and indicated the possibility of integrating NIR spectroscopy and machine learning techniques in the discrimination of marketed species in the Brazilian Amazon. However, other studies are necessary, as well as the construction of a spectral database with more samples of species from other families.

Keywords: Anatomical characters, CIELAB, near infrared, native woods.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO – RESERVA EXTRATIVISTA VERDE PARA SEMPRE PARÁ.	37
FIGURA 1.2 - IMAGENS MACROSCÓPICAS DA MADEIRA DAS DIFERENTES ESPÉCIES DO GRUPO “LOUROS”. BARRA DE ESCALA = 1000 µm.	48
FIGURA 1.3 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>ANIBA</i> SP. (A-D) E <i>NECTANDRA</i> SP. (E-I). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G, H) E MATERIAL DISSOCIADO (D, I). BARRA DE ESCALA = 100 µm.....	52
FIGURA 1.4 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>OCOTEA</i> SP., - LPI (A-D) E - LR (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 µm.....	53
FIGURA 1.5 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>MEZILAUROS</i> SP. - IT (A-D) E - ITA (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 µm.....	54
FIGURA 1.6 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>EUPLASSA</i> SP. (A-D) E <i>ROUPALA</i> SP. (EH). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 µm.....	56
FIGURA 1.7 - A) GRÁFICO BILOT DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DA MADEIRA DO GRUPO “LOUROS”. B) E C) CONTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS VARIÁVEIS E PESOS PARA CADA COMPONENTE.	59
FIGURA 1.8 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO ENTRE ESPÉCIES VERSUS SEÇÃO ANATÔMICA PARA DADOS COLORIMÉTRICOS DAS MADEIRAS CONHECIDAS COMO “LOUROS” NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	61

FIGURA 1.9 - ESPECTROS MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA VISÍVEL DE AMOSTRAS DO GRUPO “LOUROS” COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.....	65
FIGURA 1.10 - GRÁFICO BILOT E CONTRIBUIÇÃO (EM PORCENTAGEM) E PESOS DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS PARA CADA COMPONENTE PRINCIPAL.	67
FIGURA 1.11 - MÉDIA DOS ESPECTROS NIR DAS MADEIRAS DO GRUPO “LOUROS” COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.....	69
FIGURA 1.12 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.	72
FIGURA 1.13 - MATRIZ DE CONFUSÃO COM AS PREVISÕES NA AMOSTRA DE RETENÇÃO DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.	74
FIGURA 1.14 - IMAGENS MACROSCÓPICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA MADEIRA DE ALGUMAS ESPÉCIES CONFUNDIDAS PELOS CLASSIFICADORES PLS-DA (ESCALA = 2mm).....	75

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - IMAGENS MACROSCÓPICA DE AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE. BARRA DE ESCALA = 1000 µm.....	100
FIGURA 2.2 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>ORMOSIA</i> SP. - (A-D) E <i>DIPTERYX ODORATA</i> (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100µm.....	104
FIGURA 2.3 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>HYMENOLOBIUM PETRAEUM</i> (A-C) E <i>ENTEROLOBIUM MAXIMUM</i> (D-G). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, D), SEÇÃO RADIAL (B, E), SEÇÃO TANGENCIAL (C, F) E MATERIAL DISSOCIADO (G). BARRA DE ESCALA = 100 µm.	105
FIGURA 2.4 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>HYMENAEA COURBARIL</i> 1210 (A-E) E 1339 (F-I). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, B, F), SEÇÃO RADIAL (C, G), SEÇÃO TANGENCIAL (D, H) E MATERIAL DISSOCIADO (E, I). BARRA DE ESCALA = 100 µm.	106

FIGURA 2.5 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE <i>PSEUDOPTADENIA</i> <i>SUAVEOLENS</i> - 141 (A-D) E - 664 (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 μm .	108
FIGURA 2.6 - A) GRÁFICO BILOT DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DA MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE; B) E C) CONTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS VARIÁVEIS E PESOS PARA CADA COMPONENTE.	111
FIGURA 2.7 - ESPECTROS MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA NO VISÍVEL DE AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.	118
FIGURA 2.8 - GRÁFICO BILOT E CONTRIBUIÇÃO (EM PERCENTAGEM) E CARGAS (B, C) DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS PARA CADA COMPONENTE PRINCIPAL.....	119
FIGURA 2.9 - GRÁFICO BILOT (A) E CONTRIBUIÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA PARA OS DOIS PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS (B, C) NO PCA DE ESPECTROS VISÍVEIS.....	121
FIGURA 2.10 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE TODAS AS SEÇÕES DE CORTE DA MADEIRA (A); DESTAQUE DA FAIXA ESPECTRAL DE APROXIMADAMENTE 5500-6100 cm^{-1} (B); DESTAQUE DA FAIXA ESPECTRAL DE APROXIMADAMENTE 8400-9000 cm^{-1} (C).	123
FIGURA 2.11 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.	126
FIGURA 2.12 - MATRIZ DE CONFUSÃO REUNINDO TODAS AS PREDIÇÕES FORA DA AMOSTRA EM VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.....	127

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.....	145
FIGURA 3.2 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO A* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.....	146
FIGURA 3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO B* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.....	147
FIGURA 3.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.....	148
FIGURA 3.5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO H DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.....	149
FIGURA 3.6 - GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS.	151
FIGURA 3.7 - ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL PARA AS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE.	152
FIGURA 3.8 - ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS	153
FIGURA 3.9 - GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS ESPECTROS ORIGINAIS MÉDIOS DA REGIÃO DO VISÍVEL DE MADEIRAS COMERCIAIS DE ESPÉCIES DE TRÊS FAMÍLIAS BOTÂNICAS.....	154
FIGURA 3.10 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS PARA AS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE.	155
FIGURA 3.11 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS	156
FIGURA 3.12 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DOS ESPECTROS NIR ORIGINAIS MÉDIOS DAS ESPÉCIES E FAMÍLIAS AVALIADAS.....	157

FIGURA 3.13 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.	159
FIGURA 3.14 - MATRIZ DE CONFUSÃO COM AS PREVISÕES NA AMOSTRA DE RETENÇÃO DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.	160

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

QUADRO 1.1 - AMOSTRAS DE MADEIRA DAS FAMÍLIAS LAURACEAE E PROTEACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, NO ESTADO DO PARÁ.	38
QUADRO 1.2 - NÚMERO DE LEITURAS EM CADA AMOSTRA DE MADEIRA AVALIADA.	41
QUADRO 1.3 - VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.	46
QUADRO 1.4 - PRINCIPAIS RESULTADOS ESTATÍSTICOS DE “ESPÉCIES EM CADA SEÇÃO ANATÔMICA”.	62
QUADRO 1.5 - PRINCIPAIS RESULTADOS DAS “SEÇÕES ANATÔMICAS EM CADA NÍVEL DE ESPÉCIE”.	62

CAPÍTULO 2

QUADRO 2.1- AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAISO E ARIMUM, NO ESTADO DO PARÁ.	92
QUADRO 2.2- NÚMERO DE LEITURAS NAS AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE, COLETADA NA COMUNIDADE PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.	94
QUADRO 2.3- VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.	98
QUADRO 2.4- RESULTADOS DO DESDOBRAMENTO DA ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE ESPÉCIES E SEÇÃO ANATÔMICA DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.	113
QUADRO 2.5- INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PRINCIPAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO “ESPÉCIES DENTRO DE CADA NÍVEL DE SEÇÃO ANATÔMICA DA MADEIRA”.	114

QUADRO 2.6- INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PRINCIPAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO “SEÇÃO ANATÔMICA DA MADEIRA DENTRO DE CADA NÍVEL DE ESPÉCIE”.....	115
---	-----

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.1 - AMOSTRAS DE MADEIRA DAS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.	142
---	-----

CONSIDERAÇÕES FINAIS

QUADRO 1 - ARGUMENTOS FAVORÁVEIS E CONTRA-ARGUMENTOS NO EMPREGO DAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS.....	166
--	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1.1 - DIMENSÕES CELULARES DAS MADEIRAS POPULARMENTE CONHECIDAS COMO “LOURO”, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.....	50
TABELA 1.2 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.....	71

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS DIMENSÕES DAS CÉLULAS DE MADEIRAS PERTENCENTES À FAMÍLIA FABACEAE, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ, BRASIL.	102
TABELA 2.2 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES E HIPERPARÂMETROS DE AJUSTE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.....	124

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.....	158
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	- <i>Artificial Neural Network</i> – Redes neurais artificiais
AMFS	- Área de Manejo Florestal Sustentável
CITES	- Convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies Silvestres Ameaçadas de Extinção
DAP	- Diâmetro à altura do peito (1,30m do solo)
ICMBio	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
k-NN	- <i>K Nearest Neighbors</i> – Vizinho mais próximo
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
NIR	- Espectroscopia no infravermelho próximo
PCA	- Análise dos Componentes Principais
PLS-DA	- <i>Partial Least Squares Discriminant Analysis</i> – análise discriminante por soma dos quadrados parciais
R	- Plano Radial
RESEX	- Reserva Extrativista
SVM	- <i>Support Vector Machine</i>
SISBIO	- Sistema de Informações de Autorização e Biodiversidade
SISGEN	- Sistema Nacional de Gerenciamento do Patrimônio Genético
T	- Plano Tangencial
X	- Plano Transversal

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	23
OBJETIVOS.....	27
Objetivo geral	27
Objetivos específicos	27
ESTRUTURA DA TESE.....	28
REFERÊNCIAS.....	29
CAPÍTULO 1	31
IDENTIFICAÇÃO ANATÔMICA, ESPETROSCOPIA NO VISÍVEL, CIELAB E INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) DAS MADEIRAS DO GRUPO “LOUROS” PERTENCENTES ÀS FAMÍLIAS LAURACEAE E PROTEACEAE COMERCIALIZADAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA .	31
RESUMO.....	32
ABSTRACT.....	33
1.1 INTRODUÇÃO	34
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	37
1.2.1 Caracterização anatômica da madeira	39
1.2.2 Colorimetria – espectroscopia no visível	40
1.2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	41
1.2.4 Análise estatística	41
1.2.4.1 Caracterização anatômica da madeira	41
1.2.4.2 Colorimetria – espectroscopia no visível	42
1.2.4.3 Espectroscopia no infravermelho próximo.....	43
1.2.4.3.1 Algoritmos de aprendizado de máquina	43
1.2.4.3.2 <i>Support Vector Machine</i> - SVM	43
1.2.4.3.3 <i>Partial Least Squares – Discriminant Analysis</i> - PLS-DA.....	44
1.2.4.3.4 <i>k-nearest neighbors k-NN</i>	44
1.2.4.3.5 Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação	45
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
1.3.1 Caracterização anatômica da madeira	48
1.3.2 Descrição e comparação anatômica da madeira - família Lauraceae....	50
1.3.2.1 Preciosa (PR) versus louro preto (LP).....	51

1.3.2.2	Louro pimenta (LPI) versus louro rosa (LR)	52
1.3.2.3	Itaúba (IT) versus itaúba amarela (ITA).....	53
1.3.3	Descrição e comparação anatômica da madeira - família Proteaceae ..	55
1.3.3.1	Louro branco (LB) versus louro vermelho (LV).....	55
1.3.4	Análise de componente principal.....	57
1.3.5	Colorimetria - espectroscopia no visível.....	60
1.3.5.1	Análise de Dois Fatores	60
1.3.5.2	Espectro de Reflectância	64
1.3.5.3	Análise de Componente Principal	66
1.3.6	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	68
1.3.6.1	Análise dos espectros médios	68
1.3.6.2	Desempenho do classificador	70
1.3.6.3	Classificação incorreta	73
1.4	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS.....	78

CAPÍTULO 2.....85

IDENTIFICAÇÃO ANATÔMICA, ESPETROSCOPIA NO VISÍVEL, CIELAB E INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) DE SEIS ESPÉCIES ARBÓREAS DA FAMÍLIA FABACEAE COMERCIALIZADA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA 85

RESUMO.....86

ABSTRACT.....87

2.1	INTRODUÇÃO	88
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	91
2.2.1	Caracterização da estrutura anatômica da madeira	92
2.2.2	Colorimetria - espectroscopia no visível	93
2.2.3	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	94
2.2.4	Análise estatística	95
2.2.4.1	Caracterização anatômica da madeira	95
2.2.4.2	Colorimetria – espectroscopia no visível	95
2.2.4.3	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	96
2.2.4.3.1	Algoritmos de aprendizado de máquina	96
2.2.4.3.2	<i>Support Vector Machine</i> - SVM	96

2.2.4.3.3	<i>Partial Least Squares – Discriminant Analysis - PLS-DA</i>	96
2.2.4.3.4	<i>k-nearest neighbors k-NN</i>	97
2.2.4.3.5	Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação	97
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
2.3.1	Caracterização anatômica da madeira	100
2.3.1.1	Louro cumarú versus Cumarú	102
2.3.1.2	Angelim pedra versus Fava tamboril	104
2.3.1.3	Jatobá (1210) versus Jatobá (1339).....	105
2.3.1.4	Timborana (141) versus Timborana (664).....	107
2.3.2	Análise de Componente Principal	109
2.3.3	Colorimetria – espectroscopia no visível	112
2.3.3.1	Análises de Dois Fatores	112
2.3.3.2	Espectro de reflectância	117
2.3.3.3	Análise do componente principal.....	118
2.3.4	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	122
2.3.4.1	Análises dos espectros médios	122
2.3.4.2	Desempenho do classificador	123
2.3.4.3	Classificação incorreta	126
2.4	CONCLUSÕES	130
	REFERÊNCIAS	132

CAPÍTULO 3.....138

ESPECTROSCOPIA VIS/NIR NA DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS

DAS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE 138

RESUMO.....139

ABSTRACT.....140

3.1	INTRODUÇÃO	141
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	142
3.2.1	Colorimetria – espectroscopia no visível	143
3.2.2	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	143
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	144
3.3.1	Colorimetria - espectroscopia no visível.....	144
3.3.2	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	155
3.4	CONCLUSÕES	162

REFERÊNCIAS.....	163
CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
REFERÊNCIAS GERAIS	168
APÊNDICE 1 – CHAVE DICOTÔMICA	179

INTRODUÇÃO GERAL

As Reservas Extrativistas (RESEXs) constituem uma categoria de Unidade de Conservação (UC) introduzida pela Lei 9.985, de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). As UCs são importantes na conservação da biodiversidade, sendo estabelecido pelo SNUC dois grupos de categorias: Proteção Integral e Uso Sustentável (BRASIL, 2000). Atualmente, 13,57% (n = 357) das UCs do território nacional estão situadas no Bioma Amazônia, sendo 99 pertencentes à categoria de Proteção Integral e 258 de Uso Sustentável. As RESEXs somam aproximadamente 21,57% (n = 77) do total de UCs no Bioma Amazônia (MMA, 2022).

As RESEXs categorizadas como UCs de Uso Sustentável tem por objetivo básico compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais (BRASIL, 2000). Portanto, nas UCs de Uso Sustentável, é permitido às comunidades e famílias residentes (ou mesmo do entorno), a realização de diversas atividades, como visitação, turismo, práticas agrícolas, criação de animais, e também o uso sustentável dos recursos florestais, como Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNM) e Madeireiros.

Na Amazônia, o Manejo Florestal Comunitário (MFC) para fins madeireiros tem ganhado grande importância para os povos e comunidades tradicionais beneficiários das UCs de Uso Sustentável. O principal marco regulatório da atividade foi a Instrução Normativa n.º 16, de 4 de agosto de 2011, que estabeleceu as diretrizes e os procedimentos administrativos para a aprovação do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) comunitário para exploração de recursos madeireiros no interior de Reserva Extrativista, Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) e Floresta Nacional (FLONA), proposto e executado por povos e comunidades tradicionais beneficiários da UC (ICMBIO, 2011).

A Instrução Normativa n.º 16 foi um marco, pois promoveu mudanças significativas no cenário do MFC em UCs de Uso Sustentável, como a transferência da responsabilidade do licenciamento de PMFS Comunitários do IBAMA para o ICMBio. Portanto, o ICMBio assumiu o dever de analisar, aprovar e supervisionar PMFS Comunitários em FLONA, RESEX e RDS (ICMBIO, 2019). Esta instrução normativa estabelece as diretrizes, critérios e requisitos do MFC, dos documentos a serem apresentados (Por exemplo, Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS,

Plano Operacional Anual - POA). Ao final do processo de licenciamento, o órgão ambiental competente (ICMBio) emite a Autorização de Exploração Florestal (AUTEX), com a especificação do volume de madeira por espécie permitidos para exploração, e dentre outras informações.

O Brasil destaca-se no cenário mundial por possuir extensas áreas florestais nativas (IBÁ, 2016), resguardando uma expressiva fração da diversidade mundial de fungos e plantas (entre 9,5 e 9,9%), com 18.932 espécies endêmicas, isto é, uma das maiores taxas de endemismo (46,2%) do planeta (FORZZA et al., 2010). A região Amazônica ganha destaque, por cobrir 49,3% da área do território brasileiro (SFB, 2013), possuir 13.375 espécies documentadas, dentre as quais 2.046 (15,4%) são endêmicas do Brasil (FORZZA et al., 2010). Ter Steege et al. (2013) estimaram 227 espécies "hiperdominantes" (1,4% do total), englobando 50% de todas as árvores na Amazônia.

No entanto, a exploração e comercialização de madeiras ilegais tem contribuído para o crescimento contínuo dos índices de desmatamento das florestas Amazônicas, alertando a sociedade para o risco de extinção de espécies (COSTA; BAJGIELMAN, 2016). Martinelli e Moraes (2013) estimaram para a Amazônia brasileira 87 espécies ameaçadas de extinção, 90 com dados insuficientes e 142 não ameaçadas, porém consideradas de interesse para conservação e pesquisa. Feeley e Silman (2009) estimaram que até 2050, entre 5% a 9% das espécies de plantas da Amazônia serão extintas, com redução de 12% a 24% do habitat.

Na atualidade, há um grande empenho de várias instituições nacionais e internacionais no sentido de combater a exploração ilegal de espécies de interesse comercial madeireiro; tal esforço tem como finalidade controlar, proibir ou desmotivar a exploração seletiva de espécies florestais produtoras de madeira (SOARES et al., 2017). Nesse sentido, Gomes et al. (2010) expõem que conciliar o uso sustentável dos recursos florestais com o desenvolvimento econômico é um dos grandes desafios que fomentam pesquisas nas mais diversas áreas do desenvolvimento sustentável.

O setor florestal no Brasil e especialmente, na Amazônia Brasileira, encara o grande desafio sobre como conservar os ecossistemas florestais, suprir a demanda crescente de produtos florestais e, ao mesmo tempo, promover o desenvolvimento sustentável de forma a reduzir a pobreza. Sendo que as florestas estão estreitamente relacionadas a questões sociais e desempenham um papel importante na subsistência das populações tradicionais que dela dependem para sobreviver (VIDAL, 2005).

Nesse sentido, com o intuito de explorar os recursos florestais de forma racional e frear o desmatamento ilegal, decidiu-se implantar o manejo florestal comunitário na Reserva Extrativista Verde para Sempre, no Estado do Pará, para gerar desenvolvimento socioambiental e econômico, pautado na gestão participativa, na diversificação das atividades econômicas e na capacitação dos beneficiários, devendo ser compatibilizada com a rotina produtiva e as atividades existentes, possibilitando a construção coletiva e a promoção de projetos de longo prazo (INCRA, 2010).

O êxito do manejo florestal comunitário depende da execução de políticas públicas coerentes com as necessidades dos comunitários e da utilização de ferramentas que propiciem informações confiáveis sobre o potencial florestal, como a volumetria de madeira existente na área (BARROS; SILVA JÚNIOR, 2009).

Em termos gerais, para a identificação das espécies florestais são utilizados materiais reprodutivos e vegetativos. Porém, no setor madeireiro faz-se necessário realizar a identificação anatômica de madeira, técnica que exige muito tempo e pessoas especializadas para que esta tarefa seja feita de forma correta. Apesar de permitir a identificação da maioria das madeiras comerciais conhecidas, a identificação macroscópica se mostra restritiva quando se deseja uma identificação botânica segura em nível específico. A identificação microscópica, analisa os aspectos do lenho, como tipos de pontoações, tipo de ornamentação das paredes celulares, composição celular dos raios parenquimáticos, dimensões celulares, presença de inclusões inorgânicas (cristais e sílicas), entre outras características importantes não só para a identificação da madeira, mas também para sua correta utilização (BOTOSSO, 2011).

No entanto, com o surgimento dos avanços tecnológicos, descobriram-se novos métodos, dentre eles os não destrutivos para a caracterização de madeira permitindo, assim, melhorar o aproveitamento dessa matéria prima (OLIVEIRA et al., 2015). Dentre estas técnicas não destrutivas enquadram-se a colorimetria e a espectroscopia do infravermelho próximo (NIR). São métodos considerados atrativos por serem rápidos e exigirem pouco tempo de preparo das amostras, além de não danificar o material analisado (SO et al., 2004; BRASHAW et al., 2009).

Desta forma, tendo em vista a importância socioeconômica e ecológica da Floresta Amazônica e das espécies da família Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae pertencentes a este rico bioma, esta tese teve como objetivo principal discriminar

madeiras de espécies comerciais utilizando-se de diferentes ferramentas, desde as destrutivas (anatomia macroscópica e microscópica) a tecnologias inovadoras não destrutivas (colorimetria e a espectroscopia do infravermelho próximo) de madeiras advindas de comunidades extrativistas, localizadas na Resex Verde para Sempre, no Estado do Pará.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Aplicar técnicas inovadoras na discriminação de espécies florestais com potencial madeireiro oriundas de áreas de Manejo Florestal Comunitário na Amazônia brasileira.

Objetivos específicos

- Realizar a caracterização anatômica (macro e microscópica) de madeiras de espécies comerciais Amazônicas;
- Avaliar o emprego da Espectrometria no Infravermelho Próximo (NIR) e da Colorimetria na discriminação de espécies florestais Amazônicas de valor madeireiro;
- Avaliar a influência das três direções de cortes da madeira (longitudinal tangencial e radial) na discriminação das espécies;
- Avaliar o uso de espectros NIR no aprendizado de modelos de classificação de espécies da flora.

ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está dividido em três capítulos, abordando os seguintes temas:

Capítulo 1: *Identificação Anatômica, Espectroscopia no Visível, CIELAB e Infravermelho Próximo (NIR) das madeiras do grupo “louros” pertencentes às famílias Lauraceae e Proteaceae comercializadas na Amazônia Brasileira.* Este capítulo apresenta a descrição dos caracteres anatômicos macroscópicos e microscópicos de oito amostras de madeiras sólidas, coletadas nas comunidades extrativistas da reserva Verde para Sempre no Estado do Pará, pertencentes às famílias botânicas Lauraceae e Proteaceae. Posteriormente, avaliou-se também o potencial da técnica Colorimetria e Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e a influência de cada plano de corte da madeira (transversal, tangencial e radial) para a distinção dessas madeiras.

Capítulo 2: *Identificação Anatômica, Espectroscopia no Visível, CIELAB e Infravermelho Próximo (NIR) de seis espécies arbóreas da família Fabaceae comercializadas na Amazônia Brasileira.* Este capítulo apresenta a descrição dos caracteres anatômicos macroscópicos e microscópicos da madeira de seis espécies coletadas nas comunidades extrativistas da reserva Verde para Sempre no Estado do Pará, pertencentes a família botânica Fabaceae. Posteriormente, avaliou-se também o potencial da técnica Colorimetria e Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e a influência de cada plano de corte da madeira (transversal, tangencial e radial) para a distinção dessas madeiras.

Capítulo 3: *Espectroscopia VIS/NIR na discriminação de amostras de madeira das famílias Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae.* Este capítulo mostra a possibilidade de separação de amostras de madeira de diferentes gêneros coletadas nas comunidades extrativistas da Reserva Verde para Sempre, no estado do Pará, com base em espectros no visível (360 a 740 nm) e espectros em infravermelho (4000 a 10000 cm^{-1} ou 1000 a 2500 nm).

REFERÊNCIAS

BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 51, p.115-126, 2009.

BRASHAW, B.K.; BUCUR, V.; DIVOS, F. Nondestructive testing and evaluation of wood: a worldwide research update. **Forest Products Journal**, v.59, n.3, p.7-14, 2009.

BRASIL. 2000. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF (2000 jul. 19). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso: Agosto 7, 2022

BOTOSSO, P.C. **Identificação Macroscópica de Madeiras**: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Embrapa Florestas, Colombo, 2011. 65p.

COSTA, M.L.M.N.; BAJGIELMAN, T. **Estratégia nacional para a conservação ex situ de espécies ameaçadas da Flora Brasileira**. Centro Nacional de Conservação da Flora-CNCFlora: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2016. 24p.

FEELEY, K.J.; SILMAN, M.R. Extinction risks of Amazonian plant species. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America - PNAS**. v.106, n.30, p.12382-12387, 2009.

FORZZA, R.C.; BAUMGRATZ, J.F.A.; BICUDO, C.E.M.; CARVALHO, J.R.A.A.; COSTA, A.; COSTA, D.P.; HOPKINS, M.; LEITMAN, P.M.; LOHMANN, L.G.; MAIA, L.C.; MARTINELLI, G.; MENEZES, M.; MORIM, M.P.; COELHO, M.A.N.; PEIXOTO, A.L.; PIRANI, J.R.; PRADO, J.; QUEIROZ, L.P.; SOUZA, V.C.; STEHMANN, J.R.; SYLVESTRE, L.S.; WALTER, B.M.T.; ZAPPI, D. **Catálogo das Plantas e Fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 878p.

GOMES, J.M.; CARVALHO, J.O.D.P.; SILVA, M.G.; NOBRE, D.N.V.; TAFFAREL, M.; FERREIRA, J.E.R.; SANTOS, R.N.J. Sobrevivência de espécies arbóreas plantadas em clareiras causadas pela colheita de madeira em uma floresta de terra firme no município de Paragominas na Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v.40, n.1, p.171-178, 2010.

IBÁ. RELATÓRIO ANUAL: Indústria Brasileira de árvores. Brasília: 1ed. 2016, 100p. INCRA (Brasília, DF). Instrução normativa nº 65 de 27 de dezembro de 2010. **Estabelece critérios e parâmetros para as atividades de manejo florestal sustentável em projetos de assentamento**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 251, 31 dez. 2010.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). 2011. **Instrução Normativa n.º 16, de 4 de agosto de 2011**. Regula, no âmbito do Instituto Chico Mendes, as diretrizes e os procedimentos administrativos para a aprovação do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) comunitário para exploração de recursos madeireiros no interior de Reserva Extrativista, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Floresta Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF (2011 agosto 08). Disponível <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/ICMBIO/IN0016-040811.PDF>. Acesso: Agosto 7, 2022.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). 2019. **Manejo Florestal Comunitário em Unidades de Conservação de Uso Sustentável na Amazônia**: Guia sobre Planejamento Participativo, Execução Colaborativa e Gestão Comunitária em Unidades de Conservação de Uso Sustentável na Amazônia. Brasília: 2019. Disponível em: http://www.ift.org.br/wpcontent/uploads/2019/11/GUIA_manejo_ICMBio_2019_baixa-1.pdf. Acesso: Agosto 7, 2022.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A. **Livro vermelho da flora do Brasil**. Rio de Janeiro: CNCFlores Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1 ed. 2013, 1100p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). 2022. **Painel Unidades de Conservação Brasileiras**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiMDNmZTA5Y2ltNmFkMy00Njk2LWI4YjYtZDZJNzFkOGM5NWQ4IiwidCI6IjJmY2ZmE5LTNmOTMtNGJiMS05ODMwLTZyNDY3NTJmMDNINCIsImMiOiJF9>. Acesso: Agosto 7, 2022.

OLIVEIRA, E.M.; BRAGA, J.W.B.; COSTA, A.F. Discriminação de madeiras similares por fluorescência molecular e mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, São Paulo, v.38, n.0015200, p.1-4, 2015.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N.C.; SABATIER, D.; BARALOTO, C.; SALOMÃO, R.P.; GUEVARA, J.E.; SILMAN, M.R. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. **Science**, v.342, n.6156, p.1243092–1243092, 2013.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo – 2013**: dados de 2007-2012. Brasília: SFB, 2013. 188p.

SOARES, L.F.; SILVA, D.C.; BERGO, M.C.J.; CORADIN, V.T.R.; BRAGA, J.W.B.; PASTORE, T.C.M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeira Amazônicas. **Química Nova**, São Paulo, v.40, n.4, p.418 - 426, 2017.

SO, C.L.; VIA, B. K.; GROOM, L. H. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**, v.54, n.3, p.6-16, 2004.

VIDAL, N. G. Acordos Empresa Florestal-Comunidade no Brasil: Situação Atual e Oportunidades para Ação. *Traduzido por*: Amantino Ramos de Freitas. **Forest Trends**. Washington, D.C. 2005.

CAPÍTULO 1

IDENTIFICAÇÃO ANATÔMICA, ESPETROSCOPIA NO VISÍVEL, CIELAB E INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) DAS MADEIRAS DO GRUPO “LOUROS” PERTENCENTES ÀS FAMÍLIAS LAURACEAE E PROTEACEAE COMERCIALIZADAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Artigos aceitos e publicados referentes ao capítulo 1:

1. SANTOS, J.X., VIEIRA, H.C., NAIDE, T.L., SOUZA, D.V., STYGAR, M., DE MUNIZ, G.I.B., SOFFIATTI, P., & NISGOSKI, S. (2022). Anatomical traits of “louros” wood from the Brazilian amazon for wood identification. **Journal of Tropical Forest Science** (Status: aceito).
2. SANTOS, J.X., VIEIRA, H.C., SOUZA, D.V., COSTA, P.A.B., DE MUNIZ, G.I.B., SOFFIATTI, P., & NISGOSKI, S. (2021). Characterization of wood popularly known as “Louros” in the Brazilian amazon by visible spectroscopy and CIELAB parameters. **Forest Systems**, 30(2), e 007.
3. SANTOS, J.X., VIEIRA, H.C., SOUZA, D.V., DE MENEZES, M.C., DE MUNIZ, G.I.B., SOFFIATTI, P., & NISGOSKI, S. (2021). Discrimination of “Louros” wood from the Brazilian Amazon by near-infrared spectroscopy and machine learning techniques. **European Journal of Wood and Wood Products**, 79: 989–998.

RESUMO

Considerando a importância da correta identificação de madeiras, de forma a garantir o uso apropriado e contribuir para a redução da comercialização ilegal, esse capítulo teve como objetivo descrever os caracteres anatômicos (macroscópicos e microscópicos), avaliar o potencial dos parâmetros colorimétricos, espectroscopia no visível e da espectroscopia do infravermelho próximo na discriminação das madeiras do grupo “louros” pertencentes às famílias Lauraceae e Proteaceae. As espécies selecionadas foram: louro vermelho, louro branco, louro pimenta, louro preto, louro rosa, itaúba, itaúba amarela e preciosa. As amostras foram coletadas nas comunidades extrativistas localizadas na Reserva Extrativista Verde para Sempre – Pará, Brasil. Cubos com dimensões de 2,5 x 2,5 x 2,5 cm foram obtidos de discos da base da árvore das diferentes espécies, abrangendo a variação medula casca. Todas as análises foram efetuadas nas três superfícies, transversal, radial e tangencial. Os dados obtidos das características anatômicas foram submetidos à análise estatística quantitativa descritiva. A avaliação colorimétrica foi realizada com base nos dados do sistema CIEL*a*b*, analisados por PCA e ANOVA em delineamento inteiramente casualizado em esquema de dois fatores. Os espectros de infravermelho próximo foram obtidos na faixa de 4000 a 10000 cm⁻¹, com resolução de 4 cm⁻¹, diretamente da amostra. Foram testadas três abordagens de aprendizado de máquina, ou seja, *Support Vector Machine* (SVM), *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* (PLS-DA) e *k-nearest neighbors* (k-NN). Para construir modelos de aprendizagem, baseados em espectros de infravermelho próximo, duas situações foram consideradas: (1) aplicar espectros de todas as seções de madeira e (2) usar apenas espectros de uma seção de madeira. Apesar da grande uniformidade estrutural observada em nível macroscópico e microscópico foi possível estabelecer diferenças significativas entre a estrutura anatômica de oito espécies, registrando-se seis diferentes gêneros: *Ocotea*, *Roupala*, *Euplassa*, *Nectandra*, *Aniba* e *Mezilaurus*. Os caracteres anatômicos mais efetivos para a separação das espécies foram o tipo e distribuição do parênquima axial, formato das pontoações radio-vasculares, tipo de agrupamento dos vasos, presença de células oleíferas e amidos. A PCA produziu evidências de padrões de cores e indicou alguns parâmetros que podem ser mais úteis na caracterização. Os dados do sistema CIEL*a*b* produziram informações úteis para distinção de madeira do grupo “louros”. Em geral, os espectros NIR médios das amostras “Louros” foram semelhantes. Em todos os testes, os modelos construídos com o algoritmo PLS-DA apresentaram acurácia e F1-Score superior a 97%. Ao analisar PLS-DA aplicando espectros de apenas uma seção de madeira, a seção tangencial teve resultados ligeiramente superiores. Portanto, a difícil discriminação das espécies conhecidas como “louro” explica a exploração e o comércio equivocado dessas madeiras. Assim as técnicas de Anatomia, Colorimetria e Infravermelho próximo podem ser usadas como ferramentas de separação deste grupo de espécies.

Palavras-chave: Distinção de espécies, Lauraceae, Proteaceae, Parâmetros de cor.

ABSTRACT

Considering the importance of the correct identification of woods in order to guarantee the proper use and to contribute to the reduction of illegal commercialization, this chapter aimed to describe the anatomical characters (macroscopic and microscopic), and evaluate the potential of colorimetric parameters, vis spectroscopy and near infrared spectroscopy in discrimination of the woods of the “louros” group belonging to the families Lauraceae and Proteaceae. The selected species were: *louro vermelho*, *louro branco*, *louro pimenta*, *louro preto*, *louro rosa*, *itaúba*, *itaúba amarela* e *preciosa*. Samples were collected in extractive communities located in the Verde Para Sempre Extractive Reserve – Pará, Brazil. Wooden cubes with dimensions of 2,5 x 2,5 x 2,5 cm were obtained at discs from tree base, of each evaluated species, involving pith to bark variation. All analysis was done in the three anatomical surfaces, transversal, radial and tangential. The data obtained from the anatomical characteristics were submitted to descriptive quantitative statistical analysis. The colorimetric evaluation was performed based on data from the CIEL*a*b* system, analyzed by PCA and ANOVA in a completely randomized design in a two-factor scheme. The near-infrared spectra were obtained in the range from 4.000 to 10.000 cm^{-1} , with a resolution of 4 cm^{-1} , directly from the sample surfaces oriented in the three anatomical sections: transverse, radial and tangential. Three machine learning approaches were tested, *i.e.*, Support Vector Machine (SVM), Partial Least Squares – Discriminant Analysis (PLS-DA) and k-nearest neighbors (*k*-NN). To build learning models, based on near-infrared spectra, two situations were considered: (1) apply spectra of all sections of wood and (2) use only spectra of a section of wood. Despite the great structural uniformity observed at the macroscopic and microscopic levels, it was possible to establish significant differences between the anatomical structure of eight species, registering six different genera: *Ocotea*, *Roupala*, *Euplassa*, *Nectandra*, *Aniba* and *Mezilaurus*. The most effective anatomical characters for the separation of species were the type and distribution of axial parenchyma, shape of the radiovascular pits, type of vessel grouping, presence of oil cells and starches. As for PCA, it produced some evidence of color patterns and some parameters that may be more useful in characterization. The data from the CIEL*a*b* system produced useful information for distinguishing wood from the “louros” group. In general, the average spectra of the “Louros” samples were similar. In all tests, the models built with the PLS-DA algorithm showed accuracy and F1-Score above 97%. When analyzing PLS-DA applying spectra of only one section of wood, the tangential section had slightly better results. Therefore, the difficult discrimination of the woods of the “louro” group explains the exploitation and the wrong trade in wood. Thus, anatomy, colorimetry and near infrared techniques can be used as tools to assist in the separation of this group of “laurel” species.

Keywords: Species distinction, Lauraceae, Proteaceae, Color parameters.

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a madeira é empregada para diversos fins. Na região amazônica, a exploração de madeira para o processamento industrial é uma das principais atividades econômicas da região, tendo ligação direta com a oferta abundante de madeira das mais diversas espécies (SOARES et al., 2014). No entanto, a madeira é um material que apresenta grande variabilidade, sobretudo, as espécies arbóreas tropicais da região Amazônica.

Nos inventários florestais é comum as espécies serem identificadas primeiro pelos nomes vulgares o que pode acarretar futuros erros, haja vista, que uma única espécie pode ser conhecida por diversos nomes populares. Em função disso, torna-se necessário fazer a identificação precisa da espécie, visando o correto uso da madeira (CORADIN; CAMARGOS, 2002; CANDIAN; SALES, 2009). Outro fator de risco proveniente de uma incorreta identificação da espécie florestal é a comercialização ilegal de madeiras, visto que contribui para a superexploração de uma única espécie (SOARES et al. 2017).

Dentre as espécies de madeiras tropicais, merecem destaque as pertencentes às famílias Lauraceae e Proteaceae. No estado do Pará, algumas madeiras pertencentes a estas famílias são conhecidas vulgarmente como “louros”, formando um grupo de espécies muito valorizadas na região Amazônica. Fazem parte deste grupo os indivíduos denominados de: louro pimenta, louro preto, louro vermelho, louro branco, louro rosa e a itaúba, itaúba-amarela e preciosa (mesmo sem receberem a denominação de Louro, estão contidas nesse grupo) (SEMAS-PA, 2016).

A família Lauraceae possui cerca de 52 gêneros e aproximadamente 3.000 espécies lenhosas, distribuídas pelas regiões pantropicais (ROHWER, 1993; FLORA DO BRASIL, 2020). Possui relevante importância econômica destacando-se as madeiras dos gêneros *Ocotea* sp. Aubl., *Nectandra* sp. P.J. Bergius, *Mezilaurus* sp. Kuntze ex Taub. e *Aniba* sp. Aubl., que são amplamente comercializadas por apresentar excelente qualidade e múltipla utilização, especialmente para marcenaria, construção civil e naval, além de apresentarem interesses medicinais (GOTTIEB, 1972; RIBEIRO et al., 1999). Mesmo pertencendo à diferentes gêneros, devido à acentuada uniformidade morfológica, a família Lauraceae constitui um dos grupos taxonômicos de maior dificuldade para caracterização das espécies (CAIAFA; MARTINS, 2007).

Já a família Proteaceae possui cerca de 80 gêneros e mais de 1,750 espécies de arbustos e árvores (WESTON; BARKER, 2006). No Brasil pode ser encontrada na Amazônia brasileira e na Mata Atlântica, com um total aproximado de 33 espécies (FLORA DO BRASIL, 2020). No que concerne à madeira, os gêneros mais notáveis são: *Roupala* sp. Aubl., e *Euplassa* sp. Salisb. ex Knight. (PAULA; COSTA, 2011).

O processo de identificação de madeira é complexo, envolvendo etapas de identificação macroscópica e microscópica. Na identificação macroscópica, em comparação à identificação microscópica, são utilizados instrumentos mais simples, e esta ocorre de maneira mais prática e rápida. As características macroscópicas podem ser reunidas em dois grupos distintos: as organolépticas e as anatômicas. As características organolépticas englobam a cor, brilho, odor, gosto, grã, textura, densidade, dureza e desenhos da madeira. Já as características anatômicas reúnem aspectos relacionados aos anéis de crescimento, e forma, tamanho ou distribuição de elementos celulares, como vasos (ou poros) e parênquima axial (BOTOSSO, 2011).

As técnicas de identificação macroscópica, em geral, são suficientes para identificar uma amostra de madeira ao nível de gênero (GASSON, 2011). Porém, a identificação precisa da madeira depende principalmente de suas características microscópicas, visto que as características macroscópicas, apesar de fornecerem informações importantes, podem ser bastante variáveis (BERNAL et al., 2011).

Ainda em relação à identificação de espécies, outros métodos também são utilizados, como as técnicas não-destrutivas. Dentre estas técnicas enquadram-se a colorimetria e espectroscopia no visível, um método que pode ser utilizado para a discriminação ou caracterização de espécie de madeira através da cor, uma vez que é uma das características mais importantes para a identificação e indicação de usos, sobretudo quando associadas aos aspectos de textura e desenho (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001). No entanto, vários fatores podem influenciar a cor da madeira como a composição química, anatomia, procedimento de derruba da árvore, posição da amostra na árvore, meio ambiente, altura, diâmetro, idade da árvore, exposição à luz natural ou artificial, além dos fatores genéticos inerentes a cada espécie (PASTORE et al. 2004; SOTELO-MONTES et al. 2008, 2013; VIEIRA et al., 2019).

Para padronizar os parâmetros de cor numericamente, o sistema CIEL*a*b* foi estabelecido pela CIE (Comisión International de L'Eclairage ou Comissão Internacional de Iluminantes), com base na definição de cor de três parâmetros: a luminosidade representada pela variável (L^*) está relacionada à posição no eixo preto-

branco; coordenada cromática do eixo verde-vermelho (a^*) e eixo azul-amarelo (b^*), e também a saturação (C^*) e o ângulo de matiz (h), calculados através dos valores de a^* e b^* (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

Outra técnica para discriminação de espécies através de amostras de madeira é a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR), que tem sido utilizada com sucesso como um método não-destrutivo e rápido, com qualidade de análises satisfatórias (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). A tecnologia NIR pode ser aplicada com instrumentos de imagem portáteis, para análise espectral com base em uma ampla gama de métodos quimiométricos e de processamento multivariado, com os dados resultantes servindo para identificar ou classificar materiais (PASQUINI, 2018).

Algumas pesquisas relatam o potencial da aplicação da técnica NIR associada ao aprendizado de máquina para identificação de madeira. Entre eles, Snel et al. (2018) utilizou espectros NIR e PLS-DA (mínimos quadrados parciais com análise discriminante) para identificar espécies de *Dalbergia* com eficiência de 90%. Resultados satisfatórios também foram obtidos por Lazarescu et al. (2017) na diferenciação de madeira seca de *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. e *Abies amabilis* (Dougl.) Forbes, onde a identificação correta foi de 89,8% e 99,1% para os modelos PLS-DA e ANN (Redes Neurais Artificiais).

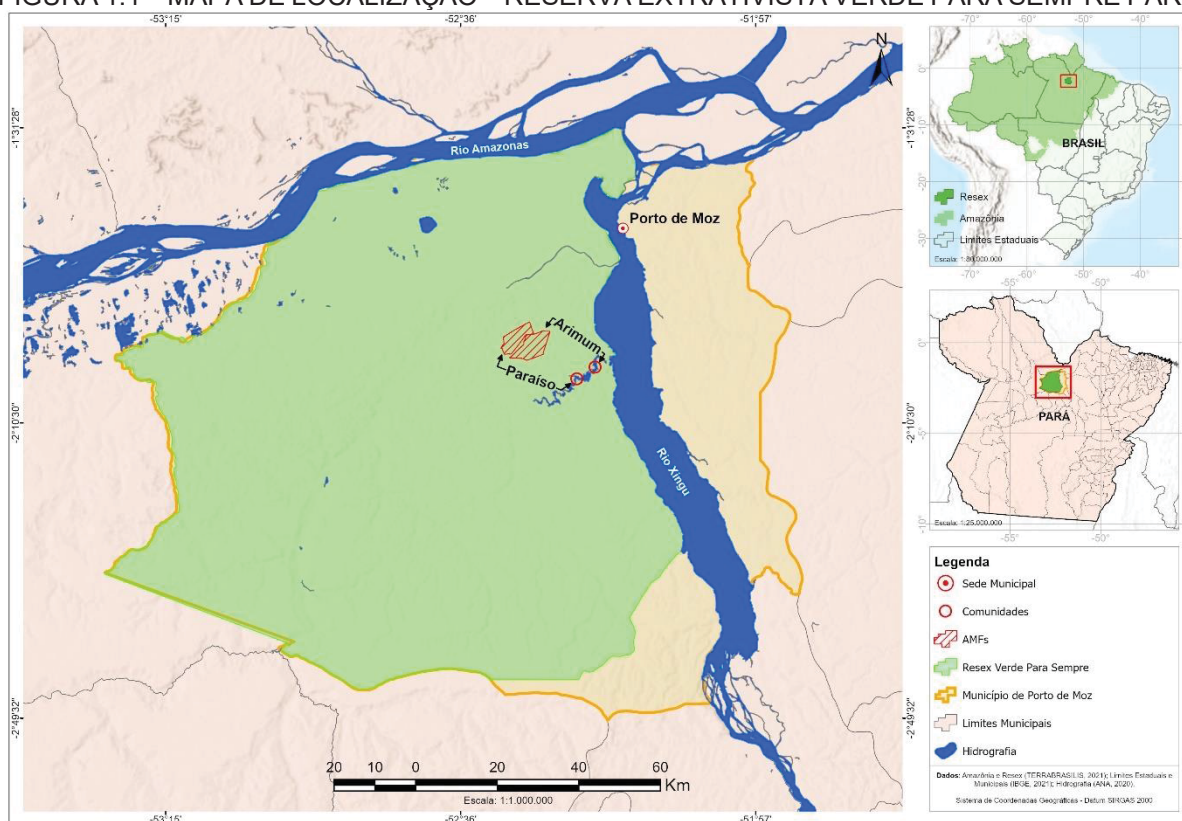
A discriminação de espécies de madeira de alto valor comercial e extensivamente exploradas é importante para a conservação e proteção da flora brasileira. Por fim, este estudo é uma contribuição para o conhecimento do potencial das diferentes técnicas utilizadas para caracterização ou distinção de espécies de madeira com valor comercial na Amazônia brasileira.

Assim, o objetivo deste estudo foi descrever os caracteres anatômicos (macroscópicos e microscópicos) e verificar o potencial de discriminação das técnicas não destrutivas, Colorimetria e Infravermelho próximo (NIR), de oito amostras de madeiras pertencentes ao grupo “louros”, oriundas das famílias botânicas Lauraceae e Proteaceae, comercializadas na Amazônia Brasileira.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Área de Manejo Florestal Sustentável (AMFS) pertencente à duas comunidades extrativistas, Paraíso e Arimum. Ambas as comunidades se encontram na Reserva Extrativista “Verde Para Sempre”, localizada a 01°55'45,4 " S e 52°56'10,5 " W, com uma área total de 1.289.362,78 hectares, no Município de Porto de Moz, Estado do Pará (FIGURA 1.1). Paraíso tem um volume autorizado de exploração anual de madeira de 2.198,64 m³ (Autorização 7/2017) e Arimum tem permissão para extrair 4.740,74 m³ (Autorização 9/2016).

FIGURA 1.1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO – RESERVA EXTRATIVISTA VERDE PARA SEMPRE PARÁ.



FONTE: A autora (2022).

O estudo foi aprovado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Instituto Chico Mendes (ICMBio) sob o número 64485-1, conforme cadastro no Sistema de Informações de Autorização e Biodiversidade (SISBIO). Todas as espécies analisadas estão cadastradas no Sistema Nacional de Gerenciamento do Patrimônio Genético (SisGen) sob o código A1D7BF7.

As espécies deste estudo foram coletadas em dois censos florestais realizados em Unidades de Produção Anual (UPA-2016 e UPA-2017). As árvores foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de cada área de exploração legal entre os dias 23 e 25 de agosto de 2018. Os procedimentos para as análises basearam-se nas seguintes etapas: 1) seleção do espécime (árvore); 2) corte da árvore e remoção de um disco de madeira com 5 cm de espessura com 10 cm acima do ponto de corte; 3) retirou-se uma faixa central de 5 cm de largura do disco de madeira, no sentido casca medula; 4) estas faixas de madeiras com 5 cm de largura por 5 cm de espessura foram seccionadas em cubos de madeira sólidas com dimensões 2,5x2,5x2,5 cm (comprimento, largura e espessura). Estes cubos foram usados para realização das análises macroscópicas e microscópicas da madeira, leituras no sistema CIEL*a*b* e na Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR).

A identificação das espécies ocorreu no Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira (LANAQM) da Universidade Federal do Paraná, UFPR. Nesta pesquisa foram utilizados 101 cubos de madeiras sólidas (QUADRO 1.1). A amostragem dos indivíduos abrangeu toda a variação radial do tronco, sendo assim, não houve a separação entre cerne e alburno. Todas as amostras foram identificadas somente a nível de gênero, pois os caracteres anatômicos macroscópicos e microscópicos da madeira foram muito semelhantes, não fornecendo informações suficientes para uma distinção segura para separá-las a nível de espécies.

QUADRO 1.1 - AMOSTRAS DE MADEIRA DAS FAMÍLIAS LAURACEAE E PROTEACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, NO ESTADO DO PARÁ.

Nome vernacular	Código	Nome científico	Família	Comunidade	Árvores	Cubos de madeira sólida
Preciosa	PR	<i>Aniba</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	11
Louro preto	LP	<i>Nectandra</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	12
Louro pimenta	LPI	<i>Ocotea</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	11
Louro rosa	LR	<i>Ocotea</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	13
Itaúba	IT	<i>Mezilaurus</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	27
Itaúba amarela	ITA	<i>Mezilaurus</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	8
Louro branco	LB	<i>Euplassa</i> sp.	Proteaceae	Arimum	1	11
Louro vermelho	LV	<i>Roupala</i> sp.	Proteaceae	Arimum	1	8
Total de amostras					8	101

FONTE: A autora (2022).

1.2.1 Caracterização anatômica da madeira

A caracterização da estrutura macroscópica e microscópica do lenho das amostras foi realizada de acordo com as normas da *International Association of Wood Anatomists* (IAWA, 1989) e Madeiras comerciais do Brasil (CORADIN et al., 2010). A identificação das amostras de madeira por meio de análises da estrutura anatômica macroscópica foi realizada através da orientação dos corpos de prova nas três direções de corte da madeira: transversal e longitudinal (radial e tangencial). Inicialmente, para padronizar as superfícies e realçar as características anatômicas, os cubos de madeira foram polidos com lixa de granulometria de número 80, 600 e 1500. Em seguida, fez-se as análises da estrutura anatômica com uso de lupa de 10x aumento.

Para a captura das imagens macroscópicas foi utilizado um estereomicroscópio, marca Zeiss modelo Stereo Discovery- V12 com Software Axio Vision com uma escala micrométrica acoplada à lente. Em seguida, foi realizada a descrição anatômica, verificando-se as características gerais da madeira, a saber: cor; brilho; odor; resistência ao corte manual; presença de camadas de crescimento; parênquima axial: visibilidade e tipo; raios: visibilidade; vasos: visibilidade, tipo, distribuição e obstrução.

Para as análises microscópicas da madeira foram preparados corpos de prova com dimensões 2,5x2,5x2,5 cm (comprimento, largura e espessura) nas três direções de corte da madeira (transversal, tangencial e radial). Preparou-se lâminas permanentes com cortes de espessura de 25 µm para as análises e mensuração das seguintes características anatômicas: i) frequência dos raios; ii) altura dos raios; iii); largura dos raios em número de células; iv) frequência dos vasos; v) diâmetro dos vasos. A coloração seguiu o método de tripla coloração, sendo desidratadas em série alcoólica ascendente. Para as medições dos elementos celulares utilizou-se estereomicroscópio, marca Zeiss modelo Stereo Discovery- V12 com Software Axio Vision com uma escala micrométrica acoplada à lente.

O material dissociado foi produzido pelo método de Franklin (1945). As imagens foram obtidas com um estereomicroscópio Zeiss Discovery V12 acoplado a uma câmera e processadas com o software Axio Vision para mensuração das características microscópicas.

Para detectar a presença de amido, o iodo de Lugol foi aplicado de acordo com as técnicas usuais de anatomia vegetal descritas por Jansen (1962). Lâminas de madeira foram cortadas e colocadas em água destilada com 3 gotas de Lugol, e após 3 minutos as amostras foram lavadas com água destilada e lâminas provisórias foram preparadas para avaliação microscópica.

1.2.2 Colorimetria – espectroscopia no visível

A avaliação colorimétrica foi realizada com base no sistema CIEL* a^* b^* , com espectrofotômetro Konica Minolta CM-5, com o software Spectra Magic NX, utilizando iluminante D65 e ângulo de observação de 10° , operando na faixa espectral de 360 a 740 nm e resolução de 10 nm. Para padronizar as superfícies e eliminar a influência da oxidação, todas as amostras foram polidas com lixa com granulometria progressiva até 1500. Todas as amostras foram mantidas em temperatura de $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. As amostras de madeira permaneceram nessas condições até serem realizadas todas as leituras.

Em seguida, estas foram submetidas a medições aleatórias nas três direções de corte da madeira (transversal, tangencial e radial). Em cada bloco, realizaram-se 18 leituras (seis em cada seção), totalizando 1.818 (QUADRO 1.2) leituras na região do espectro visível, no intervalo de 360 a 740 nm. Foram obtidos os seguintes parâmetros colorimétricos: luminosidade (L^*); coordenada do eixo verde-vermelho (a^*); e coordenada do eixo azul-amarelo (b^*). Com os valores de a^* e b^* foram calculados a saturação (C^*) e o ângulo de tinta (h) de acordo com as equações (Eq. 1) e (Eq. 2), respectivamente.

$$C^* = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$h = \arctg\left(\frac{b^2}{a^2}\right) \quad (2)$$

QUADRO 1.2 - NÚMERO DE LEITURAS EM CADA AMOSTRA DE MADEIRA AVALIADA.

Nome vernacular	Código	Nome científico	Cubos de madeira sólida	N.º de leituras
Preciosa	PR	<i>Aniba</i> sp.	11	198
Louro preto	LP	<i>Nectandra</i> sp.	12	216
Louro pimenta	LPI	<i>Ocotea</i> sp.	11	198
Louro rosa	LR	<i>Ocotea</i> sp.	13	234
Itaúba	IT	<i>Mezilaurus</i> sp.	27	486
Itaúba amarela	ITA	<i>Mezilaurus</i> sp.	8	144
Louro branco	LB	<i>Euplassa</i> sp.	11	198
Louro vermelho	LV	<i>Roupala</i> sp.	8	144
Total de amostras			101	1.818

FONTE: A autora (2022).

1.2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

A preparação da amostra pode influenciar os espectros NIR (HEIN et al., 2010), portanto, para representar a forma mais comum de transporte de madeira, os espectros foram obtidos diretamente da superfície. Foi usado um espectrômetro Tensor 37 (Bruker), adaptado com uma esfera de integração, operando em reflectância difusa (4000 a 10000 cm^{-1}) com resolução 4 cm^{-1} . Para padronizar as superfícies e eliminar a influência da oxidação, todas as amostras foram polidas com lixa com granulometria progressiva até 1500. Todas as amostras foram mantidas em ambiente climatizado com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. As amostras de madeira permaneceram nessas condições até serem realizadas todas as leituras. Em seguida, estas foram submetidas a medições aleatórias nas três direções de corte da madeira: (transversal, tangencial e radial). Seguindo o mesmo padrão da colorimetria, em cada bloco, realizaram-se 18 leituras (seis em cada seção), totalizando 1.818 (QUADRO 1.2).

1.2.4 Análise estatística

1.2.4.1 Caracterização anatômica da madeira

A análise de variância (ANOVA) foi realizada com os dados das dimensões anatômicas em delineamento inteiramente casualizados com o pacote ExpDes.pt

(FERREIRA et al., 2018). Os aspectos estruturais avaliados foram: raios por milímetro; largura do raio (μm); altura do raio (μm); vasos por milímetro quadrado; e diâmetro do vaso (μm). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada para avaliar a influência das características anatômicas para agrupamento de materiais, com o pacote FactoMineR (LÊ et al., 2008; KASSAMBARA; MUNDT, 2017), e os resultados foram extraídos com o pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON, 2020). Um gráfico biplot foi construído para verificar a relação das amostras de PCA e a contribuição de cada variável para os componentes principais. Todas as análises foram realizadas com a linguagem R (versão 3.4.3).

1.2.4.2 Colorimetria – espectroscopia no visível

Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* e h) foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em um delineamento inteiramente casualizados em esquema de dois fatores (8×3) (espécie $\times$ seção anatômica), com 18 réplicas por cubos de madeira maciça, 6 réplicas em cada seção anatômica. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$). A análise foi feita com a linguagem R (versão 3.4.3) com o ExpDes. pacote pt (FERREIRA et al., 2013). O teste Snedecor F de ANOVA ($\alpha = 0,05$) foi aplicado para verificar a significância da interação dos fatores. Quando foram encontradas interações significativas, foi realizado o desdobramento das interações e aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). O objetivo deste procedimento foi analisar o comportamento dos fatores de espécie em cada seção anatômica da madeira e vice-versa.

A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, por isso apresenta grande variabilidade. Portanto, uma única árvore apresenta diferenças nas características anatômicas da madeira, por exemplo, a cor, o desenho, que estão relacionadas às características sensoriais. Por isso, para a ANOVA fatorial, cada dado obtido em diferentes posições nas três superfícies de cada cubo de madeira maciça foi considerado uma unidade amostral independente.

Para avaliar a influência dos parâmetros colorimétricos para agrupamento de espécies, a Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada com o pacote FactoMineR (KASSAMBARA; MUNDT, 2017; LÊ et al. 2008), e os principais resultados foram extraídos com o pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON,

2020). Para a análise de PCA, os dados foram padronizados para média zero e desvio padrão. A decisão sobre o número de componentes principais foi feita considerando a porcentagem cumulativa da variância explicada e o número de autovalor maior que 1. O autovalor representa a quantidade de variação em cada PC. Além disso, foram avaliadas as cargas e calculada a contribuição, em porcentagem, de cada parâmetro para os PCs. Um gráfico biplot foi construído para verificar a relação das amostras de PCA e a contribuição de cada variável para os componentes principais. As curvas de reflectância de espectros visíveis foram traçadas com o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

1.2.4.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

1.2.4.3.1 Algoritmos de aprendizado de máquina

Neste estudo, três técnicas de aprendizado de máquina foram testadas para reconhecer as espécies de madeira: (a) *Support Vector Machine* (SVM); (b) *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* (PLS-DA); e (c) *k-nearest neighbors* (k-NN). Todas as análises foram feitas com a linguagem R. Uma breve descrição de cada uma é apresentada a seguir.

1.2.4.3.2 *Support Vector Machine* - SVM

Algoritmo aplicado para *Support Vector Machine* - SVM é uma abordagem flexível desenvolvida para problemas de classificação (KUHN; JOHNSON, 2013). A ideia básica do SVM é encontrar um (ou vários) hiperplanos em um espaço de alta dimensão, e então escolher aquele que garanta a melhor separação entre as classes (respostas esperadas). Um SVM não linear usa funções de kernel (por exemplo, polinomial, radial) para estimar limites, buscando maximizar os limites entre hiperplanos (AHMAD et al., 2018). Neste estudo, o SVM foi baseado na função de kernel radial, cuja implementação está disponível na biblioteca 'kernlab' (KARATZOGLOU et al., 2004). Esta versão do algoritmo possui dois hiperparâmetros de ajuste: C (custo de violação de restrição) e sigma (parâmetro do kernel de base radial).

1.2.4.3.3 *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* - PLS-DA

A análise *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* (PLS-DA) é uma extensão do modelo de regressão clássico de soma dos quadrados parciais (PLS) (WOLD et al., 2001; SANTANA et al., 2020) aplicado à aprendizagem em modelos preditivos, que é uma generalização da Regressão Linear Múltipla (MLR) (WOLD et al., 2001). PLS em particular, é uma técnica importante porque é robusta à presença de variáveis fortemente colineares e ruído, e também funciona bem com poucos preditores e relativamente poucas amostras (WOLD et al., 2001; MEVIK et al., 2020). Em problemas de classificação, a abordagem é semelhante à usada pelo PLS clássico, mas a resposta esperada é uma variável de categoria (SANTANA et al., 2020). Neste estudo, o algoritmo 'pls' no pacote CARET (KUHNN et al., 2016) que faz interface com o pacote de mesmo nome (MEVIK et al., 2020) foi aplicado para implementação do PLS-DA. Nesse caso, uma matriz de variáveis fictícias é criada com uma coluna em cada classe. Esta matriz de resposta é usada como uma entrada para a função `plsr()` do pacote 'pls' (KUHNN, 2008). A função `softmax` transforma a previsão dos modelos em “valores semelhantes à probabilidade”, e a classe com maior valor é a prevista. Esta versão possui um hiperparâmetro de ajuste, *ncomp*, que representa o número de componentes principais.

1.2.4.3.4 *k-nearest neighbors* k-NN

O método *k-NN* é um método de aprendizagem supervisionada e não paramétrico frequentemente aplicado à análise de regressão e classificação (HECHENBICHLER; SCHLIEP, 2004; SONG et al., 2017). É considerado um dos 10 principais métodos de mineração de dados (WU et al., 2008). Ao usar *k-NN*, alguns elementos essenciais estão presentes: um conjunto de dados rotulado, uma métrica de distância ou similaridade para calcular a distância entre os objetos, o valor de *k* (número de vizinhos mais próximos) e um esquema para ponderar os vizinhos, atribuindo maior peso para aqueles mais próximos da instância a ser prevista (MCROBERTS et al., 2015; LI et al., 2017). Neste estudo, o algoritmo 'knn' implementado no pacote CARET (Treinamento de Classificação e Regressão) (KUHNN et al., 2016) foi aplicado. Esta versão possui um hiperparâmetro de ajuste: *k* é o número de vizinhos mais próximos. Como padrão, o algoritmo utiliza a métrica

euclidiana para o cálculo da distância entre a observação e o peso uniforme para os vizinhos mais próximos.

1.2.4.3.5 Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação

Os modelos preditivos foram construídos com espectros de infravermelho próximo com base na suposição de que espectros de diferentes seções anatômicas de madeira (transversal, radial e tangencial) podem produzir padrões para a discriminação de espécies. Assim, para modelos de aprendizagem, quatro experimentos foram estabelecidos: E1 é o espectro NIR aplicado de todas as seções de madeira ($n = 1.818$); E2 é a aplicação apenas dos espectros NIR da seção transversal de madeira ($n = 606$); E3 é a aplicação apenas de espectros NIR da seção tangencial de madeira ($n = 606$); e E4 é a aplicação apenas de espectros NIR da seção radial de madeira ($n = 606$).

O método de validação cruzada repetida k-fold (validação cruzada 5 vezes, repetido dez vezes) com base na estratificação e bloqueio foi usado para estimar o desempenho dos classificadores. Portanto, cada modelo de aprendizado preditivo foi avaliado em 50 amostras de validação. Para a criação das partições de validação cruzada, foi utilizada a função `cvo_create_folds()` do pacote `manyROC` (GEGZNA, 2020), especificando o vetor da variável resposta (espécie) como fator de estratificação e a coluna de identificação do bloco (cubos de madeira maciça) como bloqueio fator. Assim, o procedimento foi feito para garantir que os dados do mesmo bloco de uma espécie estivessem exclusivamente no conjunto de treinamento ou validação, para ter resultados mais realistas nas estimativas de desempenho dos modelos.

O aprendizado dos modelos preditivos foi feito por meio da interface do pacote `CARET`, um framework disponível em linguagem R para classificação e análise de regressão (KUHN et al., 2016). Na fase de pré-processamento, todos os preditores foram centralizados e escalados. Para cada algoritmo de aprendizado de máquina, uma grade de hiperparâmetros candidatos foi estabelecida. Portanto, a estratégia de pesquisa de grade foi usada para encontrar os hiperparâmetros de ajuste ideais. As variantes do hiperparâmetro para cada algoritmo de aprendizado de máquina são mostradas na Quadro 1.3.

QUADRO 1.3 - VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.

Algoritmo	Variantes de Hiperparâmetros	Método/Pacote	Autores
Support Vector Machine (SVM)	$C = 2^c(-2, 0, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)$ $\text{Sigma} = c(0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,05)$	svmRadial/kernlab	Karatzoglou et al. (2004)
Partial Least Squares -Discriminant Analysis	ncomp = seq(1:30)	pls/pls	Mevik et al. (2020)
k-Nearest Neighbor	k = seq(2, 25, 1)	knn/caret	Kuhn et al. (2016)

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: SVM = Support Vector Machine; PLS-DA = Partial Least Squares Discriminant Analysis; k-NN = k-Nearest Neighbor; C = custo de violação de restrições; *sigma* = parâmetro kernel de base radial; k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais.

A matriz de confusão foi calculada para cada amostra de validação. Posteriormente, uma matriz de confusão simples foi obtida adicionando as 50 matrizes determinadas em amostras de validação. Em cada experimento, a matriz de confusão que reúne todas as previsões fora da amostra foi usada para avaliar a confusão entre as espécies do grupo “Louros” pelos classificadores mais precisos. As métricas para o desempenho da classificação do modelo foram extraídas usando a função *confusionMatrix()* do pacote CARET, que produz uma matriz de confusão e muitas métricas usando a abordagem um contra todos. Os modelos selecionados por validação cruzada foram avaliados aplicando-se a exatidão das métricas (Eq. 1), recall (Eq. 2), pontuação F1 (Eq. 3) e precisão (Eq. 4). Onde: Verdadeiro positivo (TP) = número de amostras classificadas corretamente na classe C_i ; Verdadeiro negativo (TN) = número de amostras corretamente classificadas como não pertencentes à classe C_i ; Falso positivo (FP) = número de amostras classificadas incorretamente na classe C_i ; Falso negativo (FN) = número de amostras classificadas incorretamente como não pertencentes à classe C_i . A seleção do modelo final foi baseada na “regra de tolerância”, que sugere a seleção do modelo preditivo mais simples que está dentro de uma tolerância percentual no modelo empiricamente ótimo na validação cruzada (KUHN et al. 2016). Portanto, no experimento, foi estabelecida uma tolerância de 1,5% para o modelo de precisão (isso é padrão no pacote CARET).

$$\text{Acurácia} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$F1 - score = (1 + \beta^2) \frac{Precis\tilde{a}o.Recall}{((\beta^2.Precis\tilde{a}o) + Recall)} \quad (3)$$

$$Precis\tilde{a}o = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Caracterização anatômica da madeira

Foram identificadas oito árvores, seis gêneros e duas famílias: *Aniba*, *Nectandra*, *Ocotea* e *Mezilaurus*, da família Lauraceae; e *Euplassa* e *Roupala* da família Proteaceae (FIGURA 1.2). Em detalhe: uma *Aniba* sp., (PR - preciosa), uma *Nectandra* sp., (LP - louro preto), duas *Ocotea* sp., (LPI - louro pimento, LR - louro rosa), uma *Roupala* sp., (LV - louro vermelho), uma *Euplassa* sp., (LB - louro branco), e dois *Mezilaurus* sp., (IT- itaúba, ITA - itaúba amarela). Todas as amostras foram identificadas apenas, nível de gênero porque as características anatômicas eram muito semelhantes para permitir uma distinção segura em nível de espécie. As amostras foram classificadas em três grupos com base na cor do cerne (FIGURA 1.2): cinza esbranquiçado a escuro (*Nectandra* sp. e *Ocotea* sp.), vermelho acastanhado (*Aniba* sp. e *Mezilaurus* sp.) e amarelo claro a escuro (*Euplassa* sp. e *Roupala* sp.).

FIGURA 1.2 - IMAGENS MACROSCÓPICAS DA MADEIRA DAS DIFERENTES ESPÉCIES DO GRUPO “LOUROS”. BARRA DE ESCALA = 1000 µm.



FONTE: A autora (2022).

Os valores médios de cada característica anatômica (TABELA 1.1) corroboram a semelhança da madeira dentro do gênero.

Foi possível perceber que os valores médios das características anatômicas indicaram que LB - *Euplassa* sp. teve menor frequência de raio, e PR - *Aniba* sp. e o gênero *Mezilaurus* apresentou maiores valores de frequência de raios. Amostras de LV - *Roupala* sp. e LB - *Euplassa* sp. apresentaram maiores valores para altura e largura do raio. Além disso, *Euplassa* apresentou maiores valores de altura dos raios.

Com relação às dimensões e frequência dos vasos, o gênero *Mezilaurus* apresentou maior frequência de vasos, enquanto para o diâmetro tangencial dos vasos, maiores valores foram encontrados em LP - *Nectandra* sp. e LB - *Euplassa* sp.

TABELA 1.1 - DIMENSÕES CELULARES DAS MADEIRAS POPULARMENTE CONHECIDAS COMO “LOURO”, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.

Nome científico	Estatística	Raios/mm	Largura do raio (µm)	Altura do raio (µm)	Vasos/mm ²	Diâmetro vasos (µm)
PR – <i>Aniba</i> sp.	Min	5	15	210	5	75
	Méd	6,70e	32,43a	490,96a	7,60c	109,93ab
	Max	12	50	780	13	160
	Dp	1,49	7,78	133,87	2,03	18,18
LP – <i>Nectandra</i> sp.	Min	3	22,78	74,22	2	178,47
	Méd	4,86c	33,70a	308,801a	3,76a	246,82e
	Max	7	48,6	604,79	6	314,28
	Dp	1,11	6,53	121,77	1,07	34,66
LPI – <i>Ocotea</i> sp.	Min	4	17,37	176,65	3	50
	Méd	6,00de	32,67a	376,29a	6,03b	127,51b
	Max	8	56,36	812,84	10	223,96
	Dp	1,39	8,10	118,03	2,08	33,14
LR – <i>Ocotea</i> sp.	Min	3	24,84	142,55	3	129,25
	Méd	5,5cd	38,87a	427,43a	7,40bc	169,68c
	Max	8	55,12	777,13	10	216,25
	Dp	1,33	7,61	176,61	1,85	21,74
IT – <i>Mezilaurus</i> sp.	Min	5	18	250	6	90
	Méd	6,43e	28,76a	471,30a	11,43d	122,70ab
	Max	9	62	700	16	150
	Dp	1,10	9,04	113,34	2,18	17,49
ITA – <i>Mezilaurus</i> sp.	Min	4	20	250	6	60
	Méd	6,60e	40,40a	492,33a	11,83d	103,56a
	Max	9	51	930	16	140
	Dp	1,19	8,44	145,74	2,84	18,04
LB – <i>Euplassa</i> sp.	Min	1	273,55	2351,26	3	126,81
	Méd	1,23a	506,40b	5579,81c	4,40a	199,82d
	Max	2	891,38	9879,38	7	259,08
	Dp	0,43	155,73	2028,54	1,33	37,36
LV – <i>Roupala</i> sp.	Min	2	16,87	59,09	2	93,93
	Méd	2,43b	511,21b	1994,36b	4,43a	163,85c
	Max	3	776,38	4456,56	10	251,65
	Dp	0,50	217,50	1559,53	1,48	36,48

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A mesma letra em cada característica anatômica indica que não há diferença entre as espécies com base no teste de Tukey em $\alpha = 0,05$. Min = mínimo; Máx = máximo; Méd= média; Dp= desvio padrão.

1.3.2 Descrição e comparação anatômica da madeira - família Lauraceae

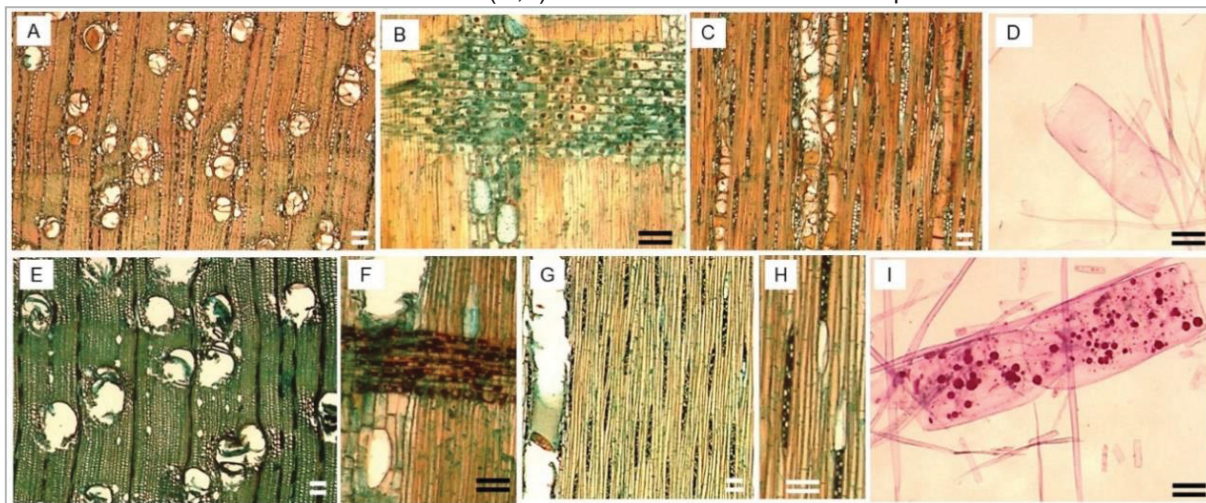
Todas as amostras de madeira avaliadas apresentavam porosidade difusa, placa de perfuração simples, pontoações e raios não estratificados.

1.3.2.1 Preciosa (PR) versus louro preto (LP)

A madeira do gênero *Aniba* sp., (PR - preciosa) e *Nectandra* sp. (LP - louro preto) apresentou características macroscópicas distintas. *Aniba* sp., tinha cerne vermelho-acastanhado; odor e sabor agradáveis; vasos visíveis a olho nu e obstruídos por tilos; parênquima axial indistinto em aumento de 10x, paratraqueal escasso; raios invisíveis com ampliação de 10x. *Nectandra* sp. tinha cerne cinza escuro; odor e sabor indistintos; vasos visíveis a olho nu, com porosidade difusa, vasos obstruídos por tilos e óleo resina; parênquima axial visível com aumento de 10x, vasicêntrico paratraqueal e confluyente aliforme losangular; raios visíveis com aumento de 10x, não estratificados.

Em relação aos caracteres anatômicos microscópicos, *Aniba* sp., apresentou (FIGURA 1.3 A-D) anéis de crescimento poucos e distintos com fibras de paredes espessas; vasos solitários e em múltiplos radiais de 2-3, tilos presentes, elementos de vasos com apêndices curtos, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas, pontoações radio-vasculares grandes; parênquima axial escasso ou vasicêntrico; raios heterogêneos, com células dos raios do corpo procumbentes e uma fileira de células marginais eretas ou quadradas, unisseriados e bisseriados; fibras de paredes muito espessas, não septadas; células oleíferas no parênquima axial e radial. A madeira de *Nectandra* sp. (FIGURA 1.3 E-I) possui anéis de crescimento distintos, separados por fibras de paredes espessas; vasos solitários e em múltiplos radiais de 2-4, elementos de vasos com ou sem apêndices curtos ou médios, placas de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas, pontoações radio-vasculares com bordas distintas, maiores que as intervasculares em tamanho e forma; parênquima axial vasicêntrico, ocasionalmente escasso ou confluyente; raios heterogêneos com células do corpo procumbentes e eretas e células marginais quadradas, bi/trisseriados; fibra de parede espessa, septada; células oleíferas predominantes no parênquima radial, ocasionalmente no parênquima axial.

FIGURA 1.3 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Aniba* sp. (A-D) E *Nectandra* sp. (E-I). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G, H) E MATERIAL DISSOCIADO (D, I). BARRA DE ESCALA = 100 μ m.



FONTE: A autora (2022).

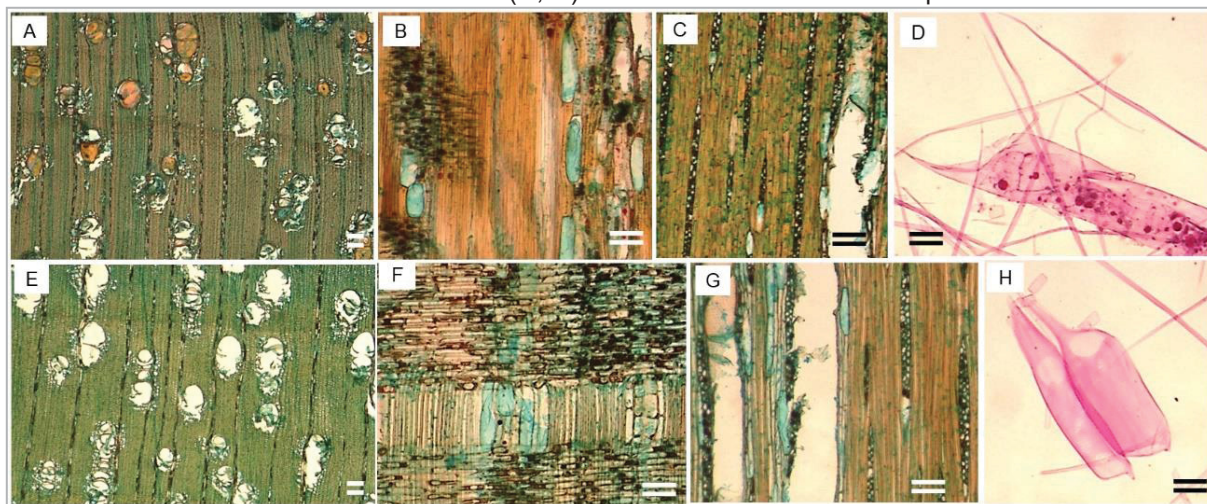
1.3.2.2 Louro pimenta (LPI) versus louro rosa (LR)

Ambos são do gênero *Ocotea* sp., e são muito semelhantes nessas características anatômicas: cerne e alburno, distintos pela cor; cerne de cinza escuro a preto; vasos visíveis a olho nu e obstruídos por tilos; parênquima axial indistinto em aumento de 10x, paratraqueal escasso; raios visíveis com aumento de 10x na superfície transversal e visíveis a olho nu na superfície tangencial. Odor e sabor são diferentes, imperceptíveis para louro rosa e apimentado para louro pimenta.

As características microscópicas também eram muito semelhantes. Em ambas as amostras, os anéis de crescimento foram distintos pelo espessamento da parede das fibras; porosidade difusa, tilos presentes, placa de perfuração simples; fibras septadas; raios heterogêneos, com células do corpo procumbentes e quadradas marginais e células eretas, não estratificados. LPI (FIGURA 1.4 A-D) tinha elementos de vasos largos e estreitos, com e sem apêndices, vasos solitários e múltiplos radiais de 2-3; pontoações intervasculares alternas, pontoações radio-vasculares com bordas distintas, semelhantes às pontoações intervasculares em tamanho e forma; parênquima axial escasso e vasicêntrico; células oleíferas presentes no parênquima axial e radial. LR (FIGURA 1.4 E-H) tinha elementos de vasos largos e estreitos, com apêndices curtos ou longos, solitários e múltiplos radiais de 2-4; pontoações intervasculares alternas, pontoações radio-vasculares com bordas distintas, maiores

do que as pontoações intervasculares em tamanho e forma; parênquima axial escasso e vasicêntrico; células oleíferas associada aos raios.

FIGURA 1.4 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Ocotea* sp., - LPI (A-D) E - LR (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 μ m.



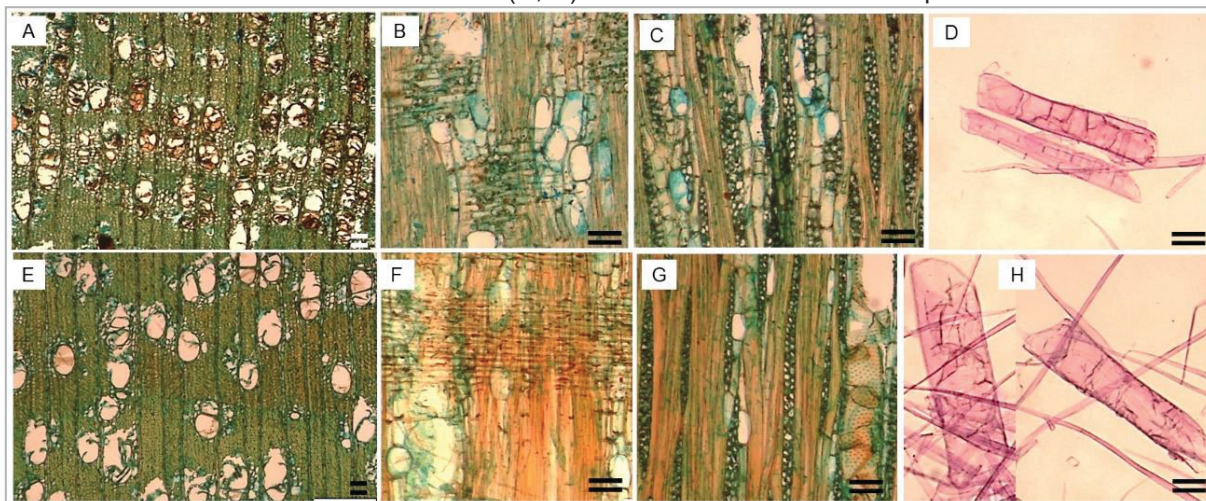
FONTE: A autora (2022).

1.3.2.3 Itaúba (IT) versus itaúba amarela (ITA)

Ambas são do gênero *Mezilaurus* sp., e têm cerne vermelho-acastanhado ou amarelo-acastanhado; odor agradável e ligeiramente adocicado, sabor imperceptível; vasos distintos a olho nu, obstruídos por tilos; parênquima axial indistinto com aumento de 10x; raios visíveis a olho nu na superfície transversal e radial.

No nível microscópico, ambas as amostras de madeira tinham anéis de crescimento indistintos ou às vezes limitados por regiões de fibra mais espessas; porosidade difusa, vasos abundantes, de pequeno e médio porte, solitários e em múltiplos radiais de 2-3; tilos presentes, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares grandes, alternas, pontoações radio-vasculares semelhantes às intervasculares com bordas distintas; parênquima axial escasso e vasicêntrico; raios heterogêneos, células do corpo procumbentes com células marginais eretas e quadradas, bisseriados; células oleíferas no parênquima radial e axial em IT (FIGURA 1.5 A-D) e predominantes no parênquima axial em ITA (FIGURA 1.5 E-H).

FIGURA 1.5 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Mezilaurus* sp. - IT (A-D) E - ITA (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 μ m.



FONTE: A autora (2022).

Ao comparar as estruturas anatômicas das madeiras da família Lauraceae, várias características anatômicas semelhantes foram encontradas entre as amostras. Também deve ser notado que este comportamento também foi relatado por Richter para a mesma família botânica (1981). As espécies estudadas apresentavam porosidade difusa, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas, pequena variação nas pontoações radio-vasculares e vasos com e sem apêndices. Na América tropical, África e Ásia, a porosidade difusa está presente em 97% das espécies de madeira; placas de perfuração simples, representam 87% e pontoações intervasculares alternas, correspondem a 94% das espécies de madeira tropical (WHEELER et al., 2007).

Anéis de crescimento distintos foram identificados nos gêneros *Nectandra* sp. e *Ocotea* sp., que é muito comum em espécies de Lauraceae (COSTER, 1927). Soffiatti et al. (2016) relataram anéis de crescimento distintos para *Ocotea puberula* e comentaram que alguns gêneros da família podem ter anéis de crescimento indistintos ou fracamente distintos. A formação de anéis de crescimento em regiões tropicais está associada, na maioria das situações, a variações na atividade cambial e sazonalidade (WORBES, 1989), portanto, em muitas espécies tropicais, os anéis de crescimento correspondem às estações chuvosa e seca (CALLADO et al., 2013). No entanto, Alves e Angyalossy-Alfonso (2000) relataram que este parâmetro não pode ser aplicado para separação de espécies porque é fortemente influenciado pelas condições ambientais.

A maioria das espécies da família Lauraceae apresentava parênquima axial paratraqueal, escasso e/ou vasicêntrico. Os gêneros *Nectandra* sp. e *Ocotea* sp. tinham essa característica associada às fibras septadas. De acordo com Wheeler et al. (2007), as fibras septadas são mais comuns nas regiões tropicais, sendo mais frequentes no Hemisfério Sul do que no Norte. Em estudo com várias espécies brasileiras 491 espécies, Alves e Angyalossy-Alfonso (2002) descreveram alta frequência de parênquima axial associado às fibras septadas, e também relataram que 56% das amostras com fibras septadas eram oriundas do Norte e Nordeste do Brasil. Soffiatti et al. (2016), avaliando características anatômicas da madeira de 17 espécies da Mata Atlântica do Sul do Brasil, relataram a presença de parênquima vasicêntrico em *Ocotea puberula* (Rich.) Nees e *Roupala montana* Aubl.

Em regiões tropicais, a presença de parênquima axial é abundante (WHEELER; BAAS, 1991) e está associada à ocorrência de fibras septadas, que potencializam a mobilização e armazenamento de metabólitos, sendo uma possível adaptação a ambientes onde as taxas fotossintéticas são elevadas (ALVES; ANGYALOSSY-ALFONSO, 2002). Essas características foram confirmadas neste estudo.

As amostras da família Lauraceae apresentavam células oleíferas associadas ao parênquima axial e radial, corroborando outros estudos que descrevem sua presença ligada a raios, parênquima axial ou entre fibras (SINGH et al., 2015). Longui et al. (2014) descreveu células de óleo associadas a raios em *Ocotea curucutuensis* J.B. Baitello. Richter (1981) observou que a localização, a disposição e o conteúdo das células de óleo na família Lauraceae têm baixa significância taxonômica.

1.3.3 Descrição e comparação anatômica da madeira - família Proteaceae

Tal como acontece com as amostras de madeira da família Lauraceae, as amostras de madeira da família Proteaceae também tinham porosidade difusa, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas e raios não estratificados.

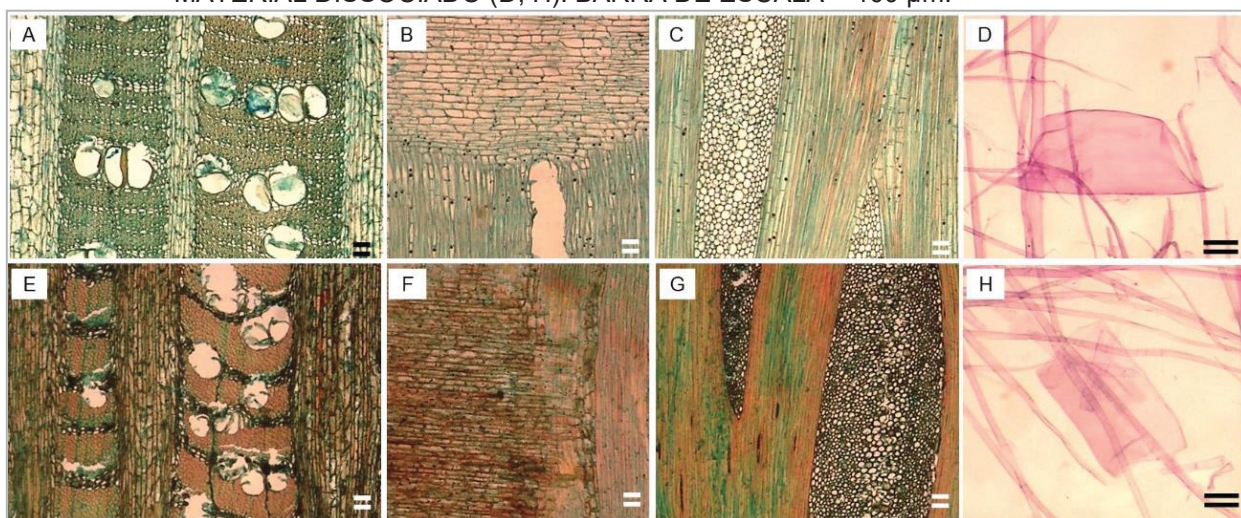
1.3.3.1 Louro branco (LB) versus louro vermelho (LV)

Euplassa sp. (LB - louro branco) e *Roupala* sp. (LV - louro vermelho) apresentaram algumas características macroscópicas semelhantes, como cerne

amarelo acastanhado; odor e sabor indistintos; vasos visíveis a olho nu, obstruídos por tilos; raios visíveis a olho nu em cortes transversais e tangenciais, não estratificados; parênquima axial visível a olho nu em *Euplassa* sp. em linhas estreitas e em *Roupala* sp. em bandas largas.

As características microscópicas também eram ligeiramente diferentes. *Euplassa* sp. (FIGURA 1.6 A-D) possui vasos solitários, múltiplos tangenciais de 2-4, aglomerados presentes, elementos de vaso com ou sem apêndices grandes; pontoações intervasculares alternas, pontoações radio-vasculares com bordas distintas maiores que as pontoações intervasculares; parênquima axial em faixas estreitas ou linhas onduladas de até três células de largura; raios heterogêneos, com células procumbentes, quadradas e eretas mescladas ao longo do raio. O amido foi observado no parênquima axial e radial. *Roupala* sp. (FIGURA 1.6 E-H) apresenta vasos solitários, múltiplos tangenciais de 2-3, alguns aglomerados presentes; elementos de vasos com apêndices em ambos os lados, curtos e longos; pontoações intervasculares alternas; pontoações radio-vasculares com bordas distintas maiores que as pontoações intervasculares; parênquima axial em faixas largas, de até seis células de largura; raios heterogêneos, com células do corpo procumbentes e marginais quadradas ou eretas; fibras de paredes muito espessas, não septadas.

FIGURA 1.6 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Euplassa* sp. (A-D) E *Roupala* sp. (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 μ m.



FONTE: A autora (2022).

Considerando os caracteres anatômicos da família Proteaceae, Chattaway (1948) indicou a importância dos grandes raios e do padrão tangencial formado nas seções transversais pelos vasos e parênquima axial. Avaliando especificamente amostras de *Euplassa* sp., observaram-se vasos múltiplos em arranjo tangencial, parênquima axial em faixas finas ou linhas de até três células de largura, fibras não septadas, entre outras, características semelhantes às descritas na literatura para espécies do mesmo gênero. Detienne e Jacquet (1983) descreveram -se *Euplassa pinnata* Johnst. e Brandes et al. (2020) estudaram *Euplassa cantareirae* Sleumer, comentando sobre a presença de corpos de sílica nas células dos raios. Para o gênero *Roupala*, Sonsin et al. (2014) encontraram características semelhantes na madeira de *Roupala montana* Aubl., sendo a única diferença em relação ao material aqui estudado o número de células do parênquima axial.

Em relação aos caracteres qualitativos da madeira da família Proteaceae, a maioria dos caracteres foi semelhante em *Euplassa* sp. e *Roupala* sp. Duas diferenças principais foram verificadas, a presença de amido no parênquima axial e radial em *Euplassa* e o número de células por faixa no parênquima axial: em *Roupala*, uma a seis células e em *Euplassa*, uma a duas. Alguns outros autores também descreveram madeiras desses gêneros. Chattaway (1948) e Mennega (1966) descreveram características anatômicas semelhantes, como anéis de crescimento indistintos, placa de perfuração simples, vasos solitários e múltiplos em arranjo tangencial, raios heterogêneos com células procumbentes e quadradas. Mennega (1966) comentou que a madeira do gênero *Euplassa* possui pontoações intervasculares mais circulares internamente e parênquima axial em faixas arqueadas, com largura de 1-2 células, e Chattaway (1948) descreveu o gênero *Roupala* como tendo madeira com parênquima em faixas arqueadas com 4 ou mais células. A presença de amido na madeira de *Euplassa* não foi relatada anteriormente na literatura.

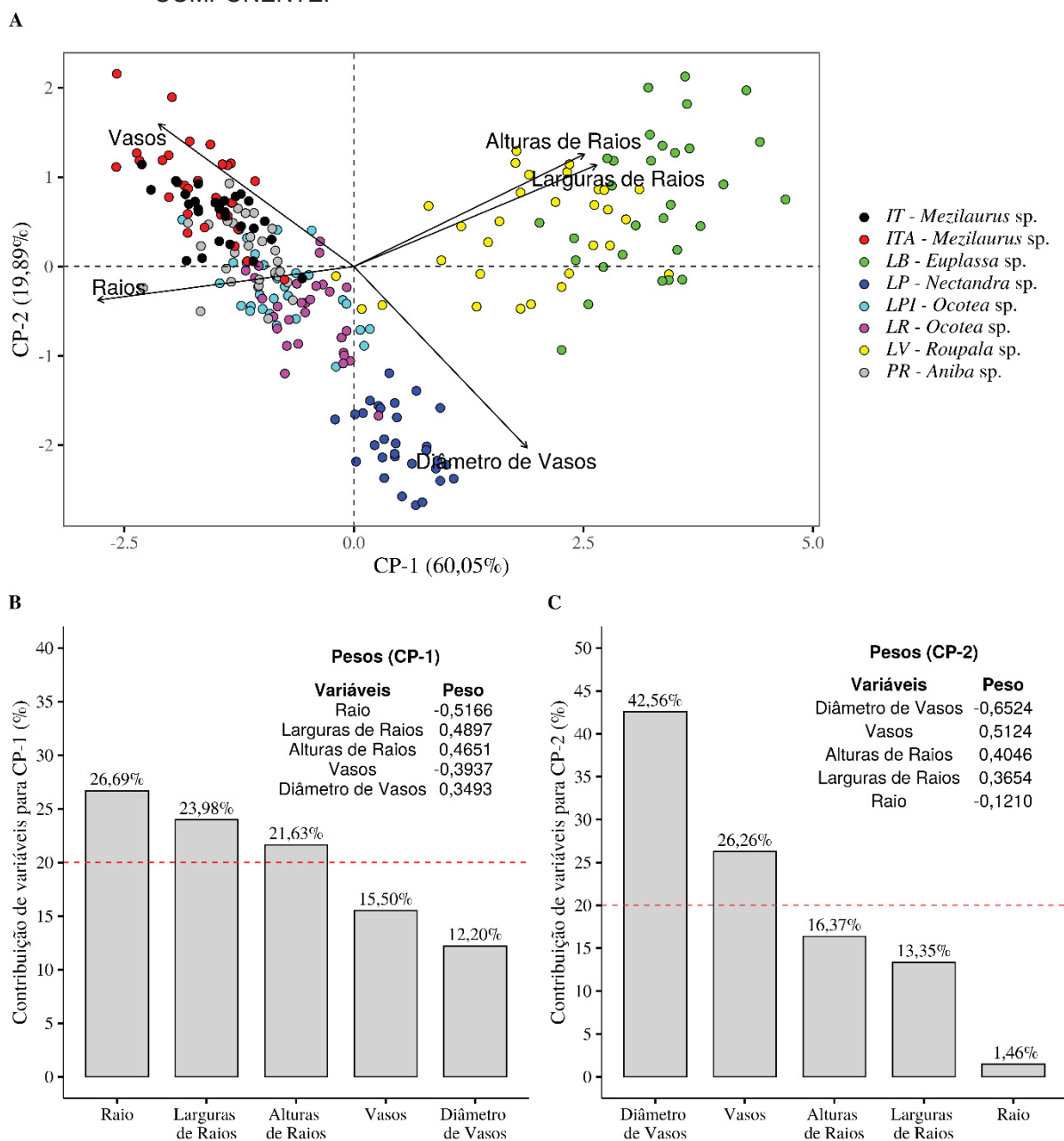
1.3.4 Análise de componente principal

A análise de componentes principais foi realizada para verificar a existência de quaisquer padrões em características microscópicas que possam permitir a discriminação da madeira do grupo “louros”. Os dois primeiros componentes principais foram retidos para inferências porque tinham autovalores (λ_i) maiores que 1 e expressaram aproximadamente 79,94% da variação total dos dados padronizados

(FIGURA 1.7). A contribuição percentual e o valor de carregamento para cada característica anatômica (FIGURA 1.7B, 1.6C) indicaram que as características do raio (frequência, largura e altura) tiveram mais importância na variância explicada pelo PC-1. Por outro lado, as características dos vasos (diâmetro e frequência) foram mais influentes no PC-2.

A PCA demonstrou que as características microscópicas de LV - *Roupala* sp., e LB - *Euplassa* sp., foram fortemente caracterizados por maior largura e altura de raio e menor frequência de raio e vaso. Amostras de LP - *Nectandra* sp., apresentaram valores elevados para o diâmetro tangencial do vaso e valores baixos para a frequência do vaso. Amostras de outros gêneros (IT e ITA - *Mezilaurus*, LPI e LR - *Ocotea*, PR - *Aniba*) ficaram visualmente próximas no gráfico de PCA da Figura 1.7, compartilhando valores maiores para frequência de raios e vasos, e valores menores para outras características anatômicas.

FIGURA 1.7 - A) GRÁFICO BIPLLOT DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DA MADEIRA DO GRUPO “LOUROS”. B) E C) CONTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS VARIÁVEIS E PESOS PARA CADA COMPONENTE.



FONTE: A autora (2022).

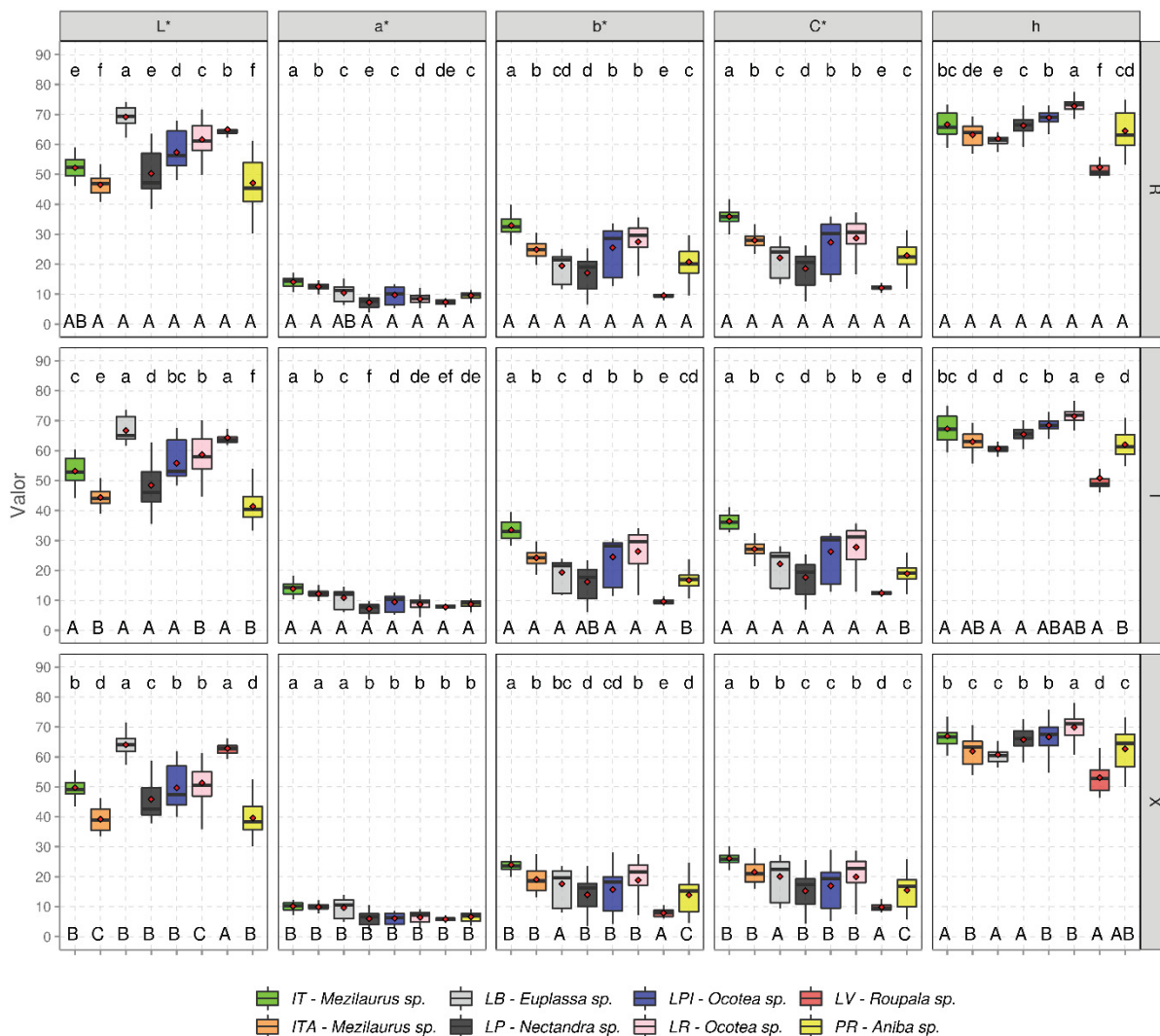
LEGENDA: raio = raios (mm); altura do raio (μm); largura do raio (μm); vasos = vasos por milímetro quadrado; diâmetro do vaso (μm).

1.3.5 Colorimetria - espectroscopia no visível

1.3.5.1 Análise de Dois Fatores

O teste F-Snedecor da ANOVA ($\alpha = 0,05$) indica que as interações espécie x seção anatômica foram altamente significativas para todos os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h), permitindo inferir que os fatores não atuam de forma independente, ou seja, pelo menos um nível do fator “espécie” tem comportamento diferente em um nível do fator “seção anatômica” e vice-versa. Detalhes das interações “espécie x seção anatômica” para cada parâmetro colorimétrico são relatados na Figura 1.8. As Quadros 1.4 e 1.5 mostram os principais resultados da análise entre “espécies por seção anatômica” (QUADRO 1.4) e “seção anatômica dentro de cada espécie” (QUADRO 1.5).

FIGURA 1.8 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO ENTRE ESPÉCIES VERSUS SEÇÃO ANATÔMICA PARA DADOS COLORIMÉTRICOS DAS MADEIRAS CONHECIDAS COMO “LOUROS” NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: As letras minúsculas comparam as médias dos parâmetros colorimétricos médios em cada subfigura, entre as espécies e para cada seção anatômica. As letras maiúsculas comparam as médias dos parâmetros colorimétricos, entre as seções anatômicas de cada espécie. Teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). R = superfície radial, T = superfície tangencial, X = superfície transversal, L* = luminosidade; a* = coordenada cromática verde-vermelha, b* = coordenada cromática azul-amarela, C* = cromia ou saturação, h = ângulo de tinta.

QUADRO 1.4 - PRINCIPAIS RESULTADOS ESTATÍSTICOS DE “ESPÉCIES EM CADA SEÇÃO ANATÔMICA”.

Parâmetros Colorimétricos	Análise de desdobramento
L*	a) Média de LB - <i>Euplassa</i> sp. e LV - <i>Roupala</i> sp. diferem estatisticamente apenas para superfície radial; b) Na superfície radial e transversal, as médias de ITA - <i>Mezilaurus</i> sp. e PR - <i>Aniba</i> sp. eram iguais; c) Na superfície tangencial e transversal, as médias de LR - <i>Ocotea</i> sp. e LPI - <i>Ocotea</i> sp. eram iguais.
a*	a) Em superfície radial e tangencial, IT - <i>Mezilaurus</i> sp. tem médias significativamente mais altas, e LV - <i>Roupala</i> sp. e LP - <i>Nectandra</i> sp., possuem médias estatisticamente inferiores, iguais entre si; b) Em corte transversal, IT - <i>Mezilaurus</i> sp., ITA - <i>Mezilaurus</i> sp. e LB - <i>Euplassa</i> sp. têm médias estatisticamente iguais, enquanto as espécies são iguais entre si.
b*	a) IT - <i>Mezilaurus</i> sp. possui médias significativamente mais altas em todos os níveis anatômicos; b) LV - <i>Roupala</i> sp. possui médias significativamente mais baixas em todos os níveis anatômicos.
c*	a) IT - <i>Mezilaurus</i> sp. possui médias significativamente mais altas em todos os níveis anatômicos; b) LV - <i>Roupala</i> sp. possui médias significativamente mais baixas em todos os níveis anatômicos; c) ITA - <i>Mezilaurus</i> sp., LPI - <i>Ocotea</i> sp. e LR - <i>Ocotea</i> sp. têm médias iguais nas seções radial e tangencial.
h	a) LR - <i>Ocotea</i> sp. possui média superior em todos os níveis anatômicos; b) LV - <i>Roupala</i> sp. tem médias estatisticamente mais baixas em todas as seções anatômicas.

FONTE: A autora (2022).

QUADRO 1.5 - PRINCIPAIS RESULTADOS DAS “SEÇÕES ANATÔMICAS EM CADA NÍVEL DE ESPÉCIE”.

Parâmetros Colorimétricos	Análise de desdobramento
L*	a) Médias de LB - <i>Euplassa</i> sp., LPI - <i>Ocotea</i> sp. e LP - <i>Nectandra</i> sp. são significativamente mais baixos na superfície transversal; b) Médias de LR - <i>Ocotea</i> sp., ITA - <i>Mezilaurus</i> sp. e PR - <i>Aniba</i> sp. são significativamente maiores na superfície radial.
a*	a) As médias são menores na superfície transversal, exceto para LB - <i>Euplassa</i> sp.
b*	a) LR - <i>Ocotea</i> sp., LPI - <i>Ocotea</i> sp., IT - <i>Mezilaurus</i> sp. e ITA - <i>Mezilaurus</i> sp. possuem médias inferiores na superfície transversal; b) LB - <i>Euplassa</i> sp. e LV - <i>Roupala</i> sp. não tem diferenças estatísticas entre as seções.
c*	a) LR - <i>Ocotea</i> sp., LPI - <i>Ocotea</i> sp., IT - <i>Mezilaurus</i> sp., LP - <i>Nectandra</i> sp., PR - <i>Aniba</i> sp. e ITA - <i>Mezilaurus</i> sp. possuem médias inferiores na superfície transversal; b) Médias de LB - <i>Euplassa</i> sp. e LV - <i>Roupala</i> sp. não têm diferenças estatísticas entre os níveis de superfície anatômicas.
h	a) LB - <i>Euplassa</i> sp., LV - <i>Roupala</i> sp., IT - <i>Mezilaurus</i> sp. e LP - <i>Nectandra</i> sp. não têm diferenças estatísticas entre os níveis de superfície anatômicas.

FONTE: A autora (2022).

Os parâmetros colorimétricos da madeira do grupo “louros” variaram substancialmente. Nos dados médios das seções, a luminosidade (L^*) variou de 42,69 a 66,64; a coordenada cromática a^* apresentou valores de 6,80 a 2,69 e a coordenada cromática b^* apresentou valores de 8,99 a 30,13; croma (C^*) variou de 11,44 a 32,78; e o ângulo de matiz (h) de 52,05 a 71,42. De acordo com a classificação descrita em Camargos e González (2001), madeiras com valores de luminosidade menores ou iguais a 56 ($L^* \leq 56$) são consideradas escuras, e com valores maiores que 56 ($L^* > 56$) são classificadas como claras. Assim, louro branco (LB - *Euplassa* sp.), louro vermelho (LV - *Roupala* sp.) e louro rosa (LR - *Ocotea* sp.) foram classificados como madeiras claras e outros como escuras.

Madeira de LB - *Euplassa* sp. e LV - *Roupala* sp. foram semelhantes em quase todas as características anatômicas, exceto no número de células na faixa do parênquima axial, que em *Euplassa* sp. variou de um a dois, e em *Roupala* sp., de um a seis, o que pode contribuir para variações no parâmetro L^* na superfície radial. Isso também ocorreu em função da composição química das células do parênquima, que armazenam substâncias e podem conter uma grande variedade de extrativos. Em estudo com madeira Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Baar et al. (2014) descreveram correlação positiva entre o teor de extrativos e o parâmetro L^* , ou seja, geralmente maior teor de extrativos foi relacionado à cor mais clara da madeira.

Considerando o fator espécie, as madeiras de LR - *Ocotea* sp. e LPI - *Ocotea* sp. tiveram médias semelhantes em L^* , ao avaliar separadamente as seções tangenciais ou transversais. Isso pode estar relacionado às características anatômicas das espécies, visto que são do mesmo gênero botânico. Os resultados deste estudo são semelhantes aos descritos por Silva et al. (2017) na seção tangencial de *Ocotea* sp. ($L^* = 56,72$; $a^* = 8,84$; $b^* = 22,45$; $C^* = 24,17$ e $h = 68,6$).

Amostras de PR - *Aniba* sp. apresentaram diferenças nos parâmetros colorimétricos L^* , b^* , C^* e h entre os cortes tangencial e radial, o que está relacionado às características anatômicas, conforme descrito em outros estudos. Isso pode ser o resultado do arranjo celular, dimensões dos vasos e dos raios (NISHINO et al., 1998; SOUSA et al., 2019).

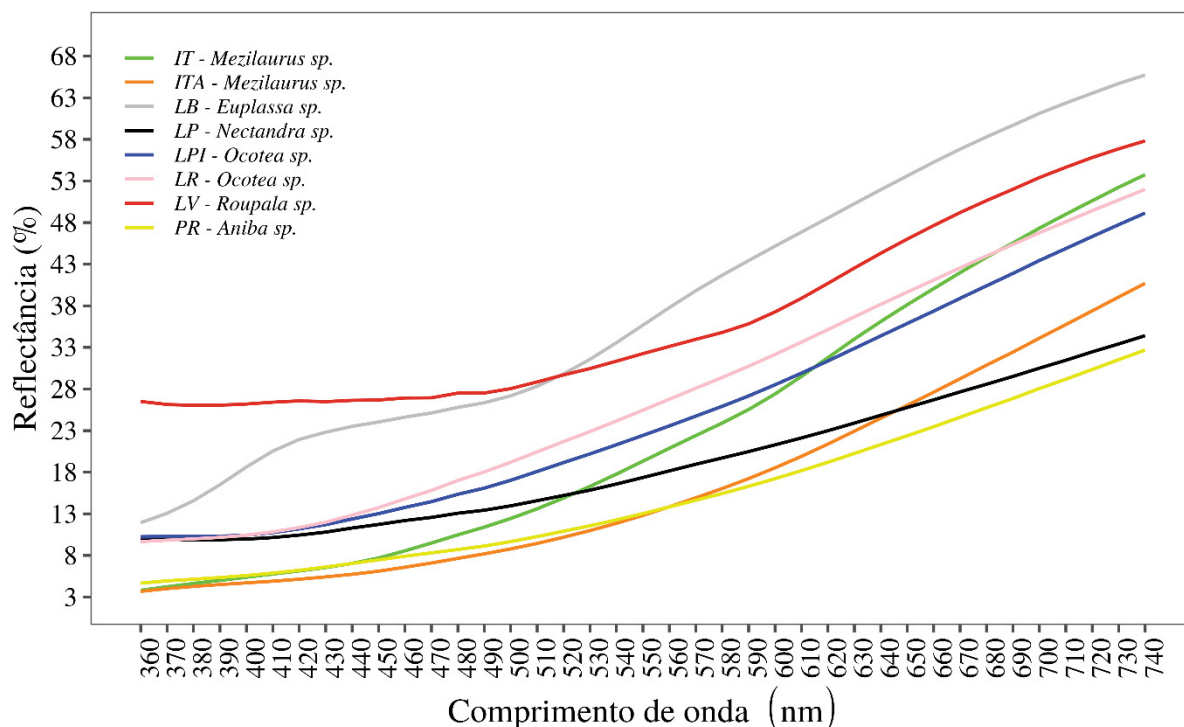
Menores valores de L^* na superfície transversal de LB - *Euplassa* sp., LPI - *Ocotea* sp. e LP - *Nectandra* sp. pode estar relacionado às paredes das células das fibras. Os parâmetros C^* e h são calculados e influenciados pelos valores das

coordenadas cromáticas a^* e b^* . Portanto, os valores médios de C^* para IT - *Mezilaurus* sp. e LV - *Roupala* sp. tinham a mesma tendência de a^* e b^* .

1.3.5.2 Espectro de Reflectância

Os espectros de reflectância no visível da madeira do grupo “louros” indicam algumas diferenças (FIGURA 1.9). Nos primeiros comprimentos de onda, de 360 a 450 nm, há uma tendência de formação de três grupos que podem ser identificados visualmente. Grupo 1: Amostras de LB - *Euplassa* sp. e LV - *Roupala* sp. apresentam maior reflectância em comparação às outras amostras, contribuindo para a diferenciação da família Proteaceae em relação às Lauraceae. Grupo 2: LR - *Ocotea* sp., LPI - *Ocotea* sp. e LP - *Nectandra* sp. tiveram reflectância semelhante até 430 nm, a partir de 440 nm, o gênero *Ocotea* possui maior reflectância em comparação ao gênero *Nectandra*, com influência da coloração amarelada e avermelhada. Grupo 3: Amostras do PR - *Aniba* sp. tiveram menor reflectância. Quando se compara as amostras do gênero *Mezilaurus* (IT e ITA) os espectros de reflectância foram semelhantes de 360 a 450 nm, sendo que ITA apresenta maiores valores nos demais comprimentos de onda, em relação à cor amarelada.

FIGURA 1.9 - ESPECTROS MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA VISÍVEL DE AMOSTRAS DO GRUPO “LOUROS” COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.



FONTE: A autora (2022).

Em relação aos espectros de refletância no visível, o comportamento de todas as amostras de madeira do grupo “louros” mostrou a influência do amarelo e do vermelho na formação da cor, sendo algumas mais avermelhadas que outras. Em alguns casos, os espectros visíveis podem ser aplicados para a caracterização de espécies ou gêneros, conforme descrito por Nisgoski et al. (2017a) ao avaliar sete espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, que relataram a formação de dois grupos, madeira com coloração vermelho-rosa ou cinza-amarelo-marrom, e destacaram a influência da região de 640 a 740 nm para distinção de espécies.

As madeiras do grupo “Louros” estão entre as principais espécies madeireiras comercialmente exploradas na Amazônia brasileira. Então, este estudo tem impacto na conservação de espécies produzindo informações que podem contribuir para um banco de dados e no futuro colaborar para aplicações práticas na supervisão florestal e para diminuir os danos ecológicos e socioeconômicos e aumentar a credibilidade da venda de madeira tropical.

1.3.5.3 Análise de Componente Principal

É consenso que a cor da madeira é influenciada por diversos fatores, como idade da árvore, composição química, origem do material e fatores genéticos (ARCE; MOYA, 2015; GONÇALEZ et al., 2014; SOTELO-MONTES et al., 2013; SILVA et al., 2017), densidade da madeira (SOUSA et al., 2019) e características de cada seção anatômica da madeira (NISHINO et al., 2000). Em função do exposto acima, não foi possível diferenciar as amostras com base apenas no teste de média, sendo necessária a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA).

No PCA, dois componentes principais tiveram autovalores (λ_i) maiores que 1: PC-1 representa 64% ($\lambda_i = 3,20$) e PC-2 20,6% ($\lambda_i = 1,03$) da variação total nos dados padronizados (FIGURA 1.10). No gráfico biplot (FIGURA 1.10A) é possível verificar a existência de uma grande correlação positiva entre os parâmetros b^* e C^* , ou seja, madeiras com alto valor de b^* apresentaram alto valor de C^* . Por outro lado, os parâmetros L^* e a^* apresentaram correlação negativa, ou seja, as madeiras com maiores valores de a^* apresentam menores valores de luminosidade. O ângulo de matiz (h) teve distribuição quase perpendicular em relação a L^* e a^* , e, portanto, baixa correlação entre eles.

A porcentagem de contribuição e cargas de cada parâmetro foi investigada (FIGURAS 1.10B e 1.10C). Os parâmetros b^* e C^* apresentaram maior influência na variância explicada pelo PC-1, com correlação de 0,9843 e 0,9805, respectivamente, e o ângulo de matiz apresentou maior efeito no PC-2, contribuindo com 50% da variância total explicada. Os parâmetros C^* , b^* , a^* e h tiveram correlação positiva com PC-1, e o parâmetro a^* teve correlação negativa com PC-2.

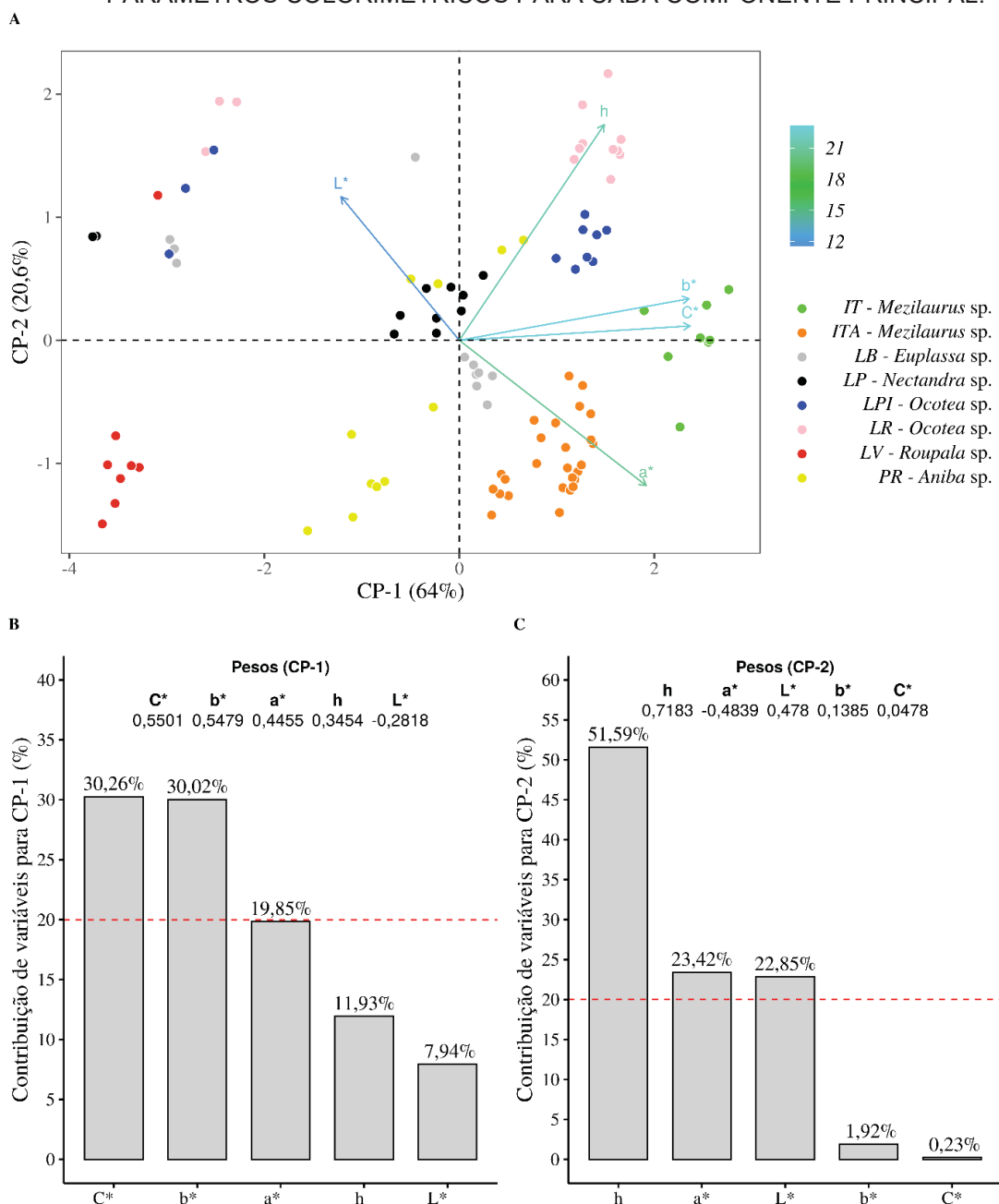
Com base na análise de PCA, verificou-se que os parâmetros colorimétricos forneceram informações importantes para a distinção da madeira do grupo “louros”, além de algumas espécies terem maior similaridade em alguns parâmetros. O ângulo de matiz, por exemplo, foi útil para caracterização de LR - *Ocotea* sp. (valores maiores) e PR - *Aniba* sp. (valores mais baixos). Além disso, este parâmetro influenciou a separação de LR - *Ocotea* sp. e LPI - *Ocotea* sp., do mesmo gênero, mas espécies com coloração diferente.

Madeira de ITA - *Mezilaurus* sp. e IT - *Mezilaurus* sp. estavam especialmente próximos, mas a luminosidade traz informações para esta distinção de espécies, e os parâmetros a^* , b^* e C^* tiveram menor influência. Em geral, ITA - *Mezilaurus* sp.

apresentou menores valores de L^* e IT - *Mezilaurus* sp. teve maiores valores de b^* e C^* .

Parâmetros colorimétricos para LV - *Roupala* sp. permitiram uma distinção adequada de outras espécies. As madeiras de LP - *Nectandra* sp. (preto, central) e LB - *Euplassa* sp. (cinza, central) tinham características semelhantes, mas estavam separadas pelos parâmetros L^* e a^* .

FIGURA 1.10 - GRÁFICO BILOT E CONTRIBUIÇÃO (EM PORCENTAGEM) E PESOS DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS PARA CADA COMPONENTE PRINCIPAL.



FONTE: A autora (2022). LEGENDA: Linha pontilhada vermelha: indica a quantidade de variação que cada parâmetro contribuiria, se todos apresentassem a mesma proporção de contribuição no PC.

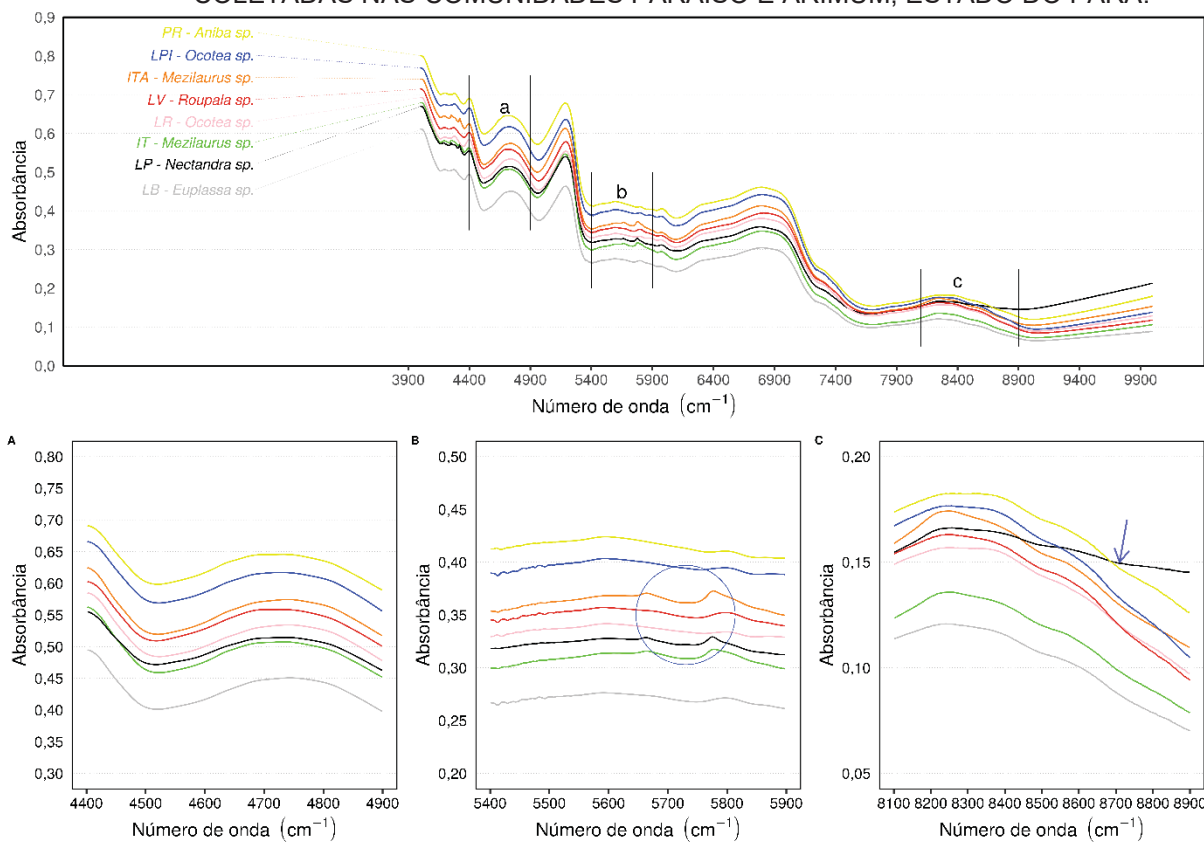
1.3.6 Espectroscopia no infravermelho próximo

1.3.6.1 Análise dos espectros médios

Os espectros NIR originais médios das amostras de madeiras das famílias Lauraceae e Proteaceae das comunidades Paraíso e Arimum (RESEX Verde para Sempre), pertencentes a seis gêneros diferentes foram similares, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. Soares et al. (2017) estudando espécies nativas da Amazônia também observaram um alto grau de similaridade entre as amostras, indicando a necessidade da utilização de técnicas quimiométricas para melhor discriminação das espécies.

De maneira geral, para as amostras analisadas, as bandas em que se observaram maiores diferenças foram as 4400 a 4900 cm^{-1} (FIGURA 1.11A), 5400 a 5900 cm^{-1} (FIGURA 1.11B) e 8100 a 8900 cm^{-1} (FIGURA 1.11C). No intervalo compreendido entre 4400 a 4900 cm^{-1} (FIGURA 1.11A), o louro preto (*Nectandra* sp.) e itaúba (IT-*Mezilaurus* sp.) diferenciaram-se das demais. Schwanninger et al. (2011) afirmam que nesses comprimentos de onda são encontradas celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, com maior predominância de celulose e hemicelulose.

FIGURA 1.11 - MÉDIA DOS ESPECTROS NIR DAS MADEIRAS DO GRUPO “LOUROS” COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: IT- Itaúba, ITA-Itaúba amarela, LB-Louro branco, LP-Louro preto, LPI-Louro pimenta, LR-Louro rosa, LV-Louro vermelho, e PR-Preciosa.

Nas bandas de 5620 a 5800 cm^{-1} (FIGURA 1.11B) amostras de madeira de itaúba e itaúba amarela, ambas do gênero *Mezilaurus* sp., e louro preto, do gênero *Nectandra* sp., apresentaram picos, enquanto as demais amostras, louro rosa e louro pimenta (*Ocotea* sp.), Louro branco (*Euplassa* sp.), preciosa (*Aniba* sp.) e louro vermelho (*Roupala* sp.) não. Esta região está relacionada aos componentes da parede celular, principalmente a celulose, juntamente com a lignina e a hemicelulose (SCHWANNINGER et al., 2011). Considerando a região entre 8100 e 8900 cm^{-1} (FIGURA 1.11C), somente a LP-*Nectandra* sp. (louro preto) apresentou comportamento espectral diferenciado das demais. Comportamento semelhante foi observado por Muñiz et al. (2016) ao diferenciar espécies comercializadas como “angelim”, encontrando diferença entre as amostras nos números de onda compreendidos entre 8099 a 8749 cm^{-1} . Nessas bandas, a lignina é o principal componente (SCHWANNINGER et al., 2011).

1.3.6.2 Desempenho do classificador

A Tabela 1.2 lista a métrica de desempenho (acurácia e F1-Score) na validação cruzada (validação cruzada 5 vezes, repetida 10 vezes) para a melhor classificação em cada experimento. Em geral, em todos os experimentos, os modelos de aprendizagem que aplicam o algoritmo PLS-DA tiveram acurácia e F1-Score superior a 97%. Melhores modelos para PLS-DA obtidos usando espectros NIR de seções individuais (E2, E3, E4) mostraram precisão semelhante ao melhor modelo PLS-DA aprendido usando dados de todas as seções de madeira (E1). O mesmo comportamento foi observado para os modelos construídos com SVM e k -NN, mas, nesses modelos, a acurácia foi menor.

TABELA 1.2 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.

Experimento	Estatística	10x5 – Partições de Validação Cruzada								
		SVM ^a			PLS-DA			k-NN		
		HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia	F1-Score
E ₁	Média	C =	92,35	90,73		98,59	98,37		78,83	74,69
	DP	128	2,25	2,79		1,26	1,58		2,76	3,53
	Min.	sigma	87,38	82,96	ncomp	96,00	93,88	k = 2	72,75	68,28
	Máx.	= 0,005	97,09	96,55	= 16	100	100		86,42	85,62
E ₂	Média	C = 16	86,37	83,37		98,56	98,41		81,78	77,71
	DP	sigma	4,81	5,73		1,52	1,67		4,57	6,21
	Min.	=	70,59	68,17	ncomp	95,04	94,65	k = 2	71,29	59,91
	Máx.	0,005	93,86	92,94	= 14	100	100		90,00	86,88
E ₃	Média	C = 64	89,91	88,30		98,99	98,89		81,04	77,74
	DP	sigma	3,52	4,24		1,48	1,78		3,11	3,73
	Min.	=	80,83	78,72	ncomp	93,65	92,95	k = 2	75,39	70,45
	Máx.	0,005	95,00	95,43	= 11	100	100		93,33	92,29
E ₄	Média	C = 16	88,08	85,72		98,15	97,61		81,40	76,99
	DP	sigma	3,37	3,98		2,18	2,80		3,41	4,11
	Min.	=	80,83	77,48	ncomp	90,91	89,78	k = 2	71,67	66,11
	Máx.	0,005	93,94	93,08	= 14	100	100		87,12	85,32

FONTE: A autora (2022).

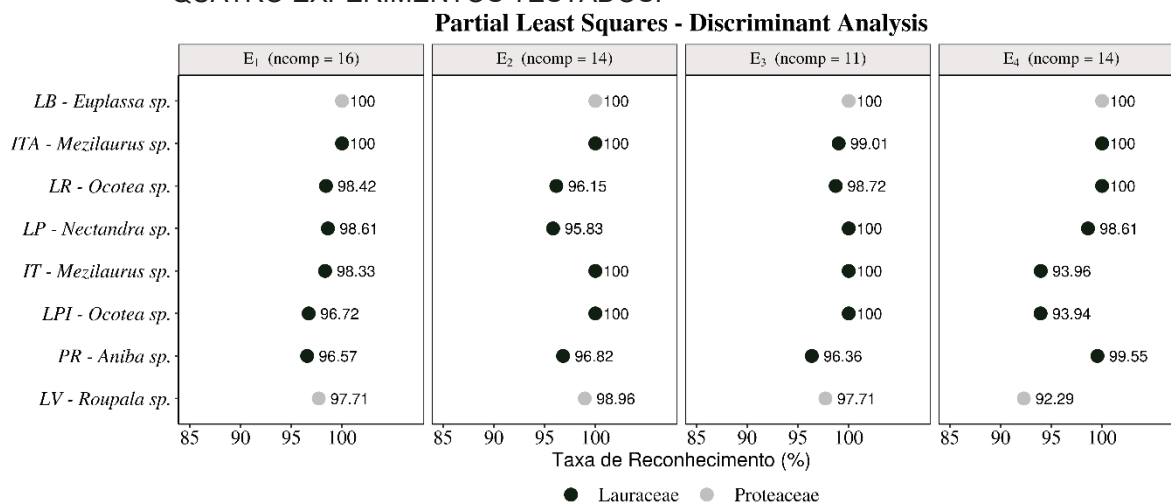
LEGENDA: Todas as medidas são expressas como uma porcentagem. SVM = *Support Vector Machine*; PLS-DA = *Partial Least Squares Discriminant Analysis*; k-NN = *k-Nearest Neighbor*; HAO = Hiperparâmetro de Ajuste Ótimo; Dp = desvio padrão na reamostragem; mín. = mínimo, máx. = máximo; E1: classificador treinado com espectros NIR de todas as seções; E2: classificador treinado com espectros NIR de seções transversais; E3: classificador treinado com espectros NIR de seções tangenciais; E4: classificador treinado com espectros NIR de seções radiais; C = custo de violação de restrições; *sigma* = parâmetro kernel de base radial, k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais. Radial kernel.

A integração de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) e PLS-DA na discriminação de madeira tropical foi abordada por outros estudos científicos (por exemplo, Pastore et al. (2011), Bergo et al. (2016, Soares et al. (2017), Snel et al. (2018). Pastore et al. (2011) obtiveram bons resultados ao usar espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e PLS-DA para discriminar quatro madeiras que se parecem com mogno. Bergo et al. (2016) avaliaram a combinação de NIR e PLS-DA para discriminar *Swietenia macrophylla* de *Carapa guianensis*, *Cedrela odorata* e *Micropholis melinoniana* usando amostras de pó e bloco maciço, e relataram uma taxa de classificação correta superior a 96,8% para amostras de *S. macrophylla* de 27 países. Soares et al. (2017), estudando seis espécies tropicais, relataram taxas de eficiência superiores a 90% usando a técnica NIR portátil em combinação com PLS-DA. Finalmente, Snel et al. (2018) avaliaram o potencial de NIR em combinação com PLS-DA para sete espécies de *Dalbergia* listadas na Convenção sobre o Comércio

Internacional de Espécies Silvestres Ameaçadas de Extinção (CITES) e encontraram uma taxa de eficiência superior a 90%.

A Figura 1.12 apresenta a recuperação média (taxa positiva verdadeira por espécie) nas amostras de validação para uma classificação mais precisa de PLS-DA nos quatro experimentos testados. Mais uma vez, a taxa positiva verdadeira para os modelos PLS-DA em quatro testes foi semelhante. Em todos os experimentos, LB - *Euplassa* sp. teve taxas de reconhecimento de 100%. Por outro lado, outras espécies foram melhor reconhecidas por modelos com espectros NIR de seções individuais, por exemplo, IT — *Mezilaurus* sp. e LPI— *Ocotea* sp. teve um recall de 100% para classificação treinada com espectros NIR de seção transversal ou tangencial. Os resultados indicam que há evidências de que, independente da seção de madeira, os espectros NIR possuem padrões informativos que podem ser aplicados à discriminação de espécies no grupo “Louros”, que podem ser treinados por aprendizado de máquina.

FIGURA 1.12 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA E1 = classificador treinado usando espectros NIR de todas as seções; E2 = classificador treinado usando espectros NIR de seções transversais; E3 = classificador treinado usando espectros NIR de seções tangenciais; E4 = classificador treinado usando espectros NIR de seções radiais. ncomp = número de componentes principais.

1.3.6.3 Classificação incorreta

A matriz de confusão (CM) para os classificadores PLS-DA mais precisos em cada experimento é mostrada na Figura. 1.13. Essas matrizes de confusão reúnem todas as previsões fora da amostra - $n = 18.180$ (E1) e $n = 6.060$ (E2, E3 e E4) - em validação cruzada repetida. De maneira geral, os resultados dos experimentos E2, E3 e E4 indicaram que um melhor nível de distinção entre algumas espécies pode ser alcançado independente dos cortes anatômicos da madeira, pois possuem informações peculiares para o aprendizado de máquina. Por exemplo, para classificação com base na seção transversal (E2), LP — *Nectandra* sp. foi erroneamente classificado como LR — *Ocotea* sp. (esta foi a maior taxa de confusão), no entanto, quando os espectros NIR das seções tangencial e radial são aplicados, os modelos PLS-DA não apresentam erros de classificação nesta espécie.

FIGURA 1.13 - MATRIZ DE CONFUSÃO COM AS PREVISÕES NA AMOSTRA DE RETENÇÃO DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.

Referência	E ₁ (ncomp = 16)								E ₂ (ncomp = 14)								
	PR - Aniba sp.	1				23	33	11	1912		1			7	13		639
	LV - Roupala sp.			26		7			1407						5	475	
	LR - Ocotea sp.					37	2303					6	4	20	750		
	LPI - Ocotea sp.				1	1915	6		58					660			
	LP - Nectandra sp.		28			2130		2						690		30	
	LB - Euplassa sp.				1980									660			
	ITA - Mezilaurus sp.			4860													
	IT - Mezilaurus sp.	1416	24							480							
	E ₃ (ncomp = 11)								E ₄ (ncomp = 14)								
PR - Aniba sp.				1		23		636		1				2		657	
LV - Roupala sp.					11			469			37					443	
LR - Ocotea sp.					10	770								780			
LPI - Ocotea sp.						660								620	1	39	
LP - Nectandra sp.					720					10		710					
LB - Euplassa sp.						660						660					
ITA - Mezilaurus sp.			1604			16						1620					
IT - Mezilaurus sp.	480								451	8					3		18
	IT - Mezilaurus sp.	ITA - Mezilaurus sp.	LB - Euplassa sp.	LP - Nectandra sp.	LPI - Ocotea sp.	LR - Ocotea sp.	LV - Roupala sp.	PR - Aniba sp.	IT - Mezilaurus sp.	ITA - Mezilaurus sp.	LB - Euplassa sp.	LP - Nectandra sp.	LPI - Ocotea sp.	LR - Ocotea sp.	LV - Roupala sp.	PR - Aniba sp.	
	Predito																

FONTE: A autora (2022).

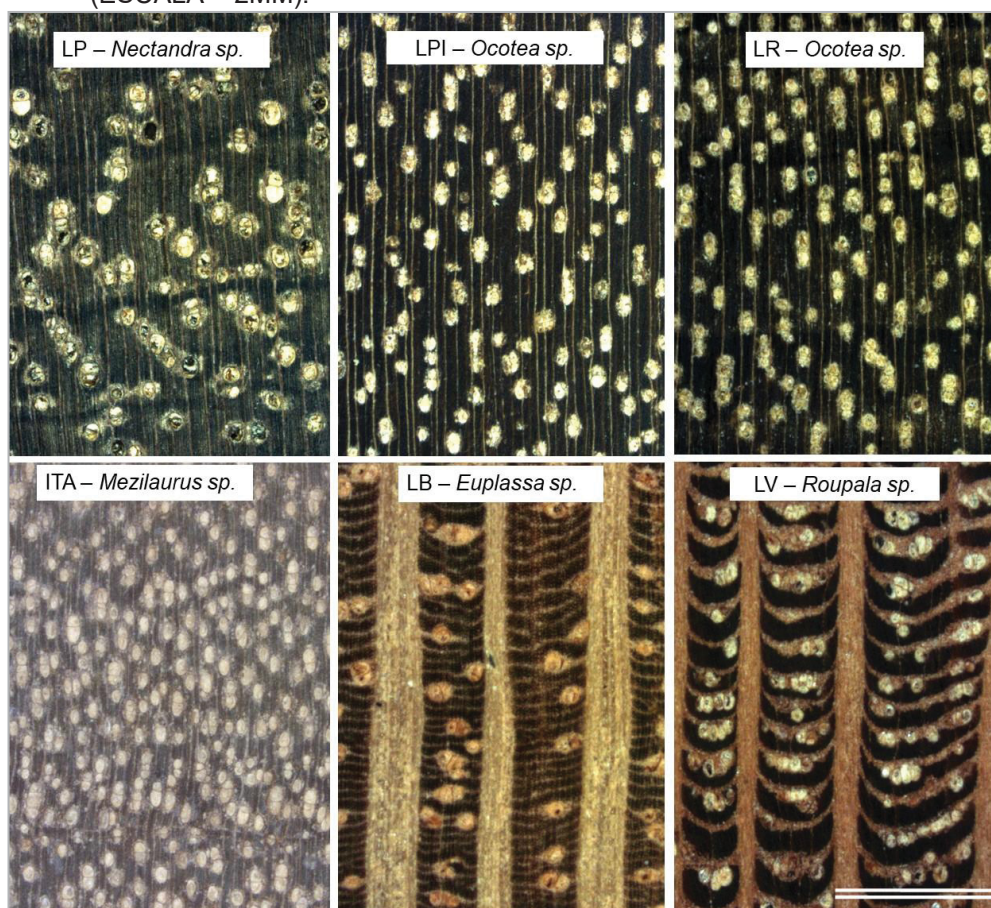
LEGENDA: E1 = classificador treinado usando espectros NIR de todas as seções; E2 = classificador treinado usando espectros NIR de seções transversais; E3 = classificador treinado usando espectros NIR de seções tangenciais; E4 = classificador treinado usando espectros NIR de seções radiais. ncomp = número de componentes principais.

Considerando todos os resultados (E1, E2, E3 e E4), apenas os espectros de LB - *Euplassa* sp. foram corretamente identificados. Este resultado pode ser confirmado na Figura 1.11 onde os espectros NIR têm um comportamento distinto, principalmente em regiões de 7100 a 7400 cm⁻¹ (com alguma curva acentuada) e entre 4100 a 4300 cm⁻¹ (com suavização de picos de absorbância).

Alguns resultados de confusão são descritos a seguir e podem ser justificados por características anatômicas semelhantes (FIGURA 1.14) ou influência da superfície avaliada. Amostras de LV — *Roupala* sp. foram frequentemente classificadas como LB — *Euplassa* sp. Na análise com todas as seções e apenas com espectros de seções individuais, o que pode ser justificado por serem ambas da mesma família

botânica (Proteaceae) e apresentarem características anatômicas semelhantes, como anéis de crescimento indistintos e altura e largura dos raios (FIGURA 1.14) em comparação com espécies de Lauraceae (*Ocotea*, *Nectandra*, *Mezilaurus* e *Aniba*).

FIGURA 1.14 - IMAGENS MACROSCÓPICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA MADEIRA DE ALGUMAS ESPÉCIES CONFUNDIDAS PELOS CLASSIFICADORES PLS-DA (ESCALA = 2MM).



FONTE: A autora (2022).

No Experimento 2 (E2) - classificador PLS-DA aprendido com espectros NIR da seção transversal, LP — *Nectandra* sp. e LR — *Ocotea* sp. tiveram maiores taxas de classificação incorreta. LP — *Nectandra* sp. foi erroneamente classificado apenas como LR — *Ocotea* sp., porém LR — *Ocotea* sp. foi frequentemente classificado como LPI — *Ocotea* sp. Essa confusão pode ser observada na Figura 1.14, onde os caracteres anatômicos transversais são muito semelhantes. Quando a avaliação foi baseada em espectros NIR do Experimento tangencial 3 — E3) e seções radiais (Experimento 4 — E4), a maior confusão ocorreu em espécies da família Lauraceae.

Essa confusão na família Lauraceae também foi descrita por Nisgoski et al. (2017b) que relataram uma grande influência do corte anatômico e pré-tratamento de

espectros na distinção de *Ocotea porosa*, *Ocotea pretiosa* e *Nectandra* sp. com base em madeira maciça. Além disso, Hwang et al. (2018), relataram diversas espécies da família Lauraceae sendo subagrupadas independentemente do gênero original.

1.4 CONCLUSÕES

Observaram -se uniformidade das características anatômicas das amostras de madeira nas análises macroscópicas e microscópicas das espécies avaliadas do grupo “louros”. Os caracteres anatômicos mais eficazes para a discriminação das amostras foram o tipo de parênquima axial, presença de fibras septadas, tipo e agrupamento de vasos, presença de células oleíferas e amido.

No que tange à técnica colorimétrica, os resultados indicaram que os dados do sistema CIEL*a*b* produziram informações úteis para a discriminação das madeiras do grupo “louros”.

O ângulo de matiz foi indicado para discriminar LR - *Ocotea* sp. e LPI - *Ocotea* sp. e a luminosidade foi mais importante na discriminação de ITA - *Mezilaurus* sp. e IT - *Mezilaurus* sp.

Considerando a superfície anatômica, tendência semelhante foi observada para as seções radiais e tangenciais. Em geral, as superfícies longitudinais foram mais indicadas para a caracterização deste grupo.

Ressalta-se a importância de pesquisas futuras com um número maior de espécies e assim, contribuir para informações e banco de dados para uso prático. Portanto, a técnica colorimétrica pode ser uma ferramenta auxiliar na separação deste grupo de madeiras.

Em relação aos resultados do NIR, estes foram promissores e indicaram a possibilidade de integração da espectroscopia NIR e técnicas de aprendizado de máquina na discriminação de espécies comercializadas como “Louros” na Amazônia brasileira. Porém, outros estudos são necessários, bem como a construção de um banco de dados espectral com mais amostras das espécies das famílias Lauraceae e Proteaceae.

O PLS-DA foi mais adequado para aprender a reconhecer as espécies do grupo “Louros” aplicando espectros NIR de seções individuais ou combinando todas as seções.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, I.; BASHERI, M.; IQBAL, M.J.; RAHIM, A. Performance comparison of support vector machine, random forest, and extreme learning machine for intrusion detection. **IEEE Access** n.6, p.33789–33795, 2018.
- ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. **IAWA Journal**, v.21, n.1, p.3-30, 2000.
- ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 2. Axial parenchyma, rays and fibres. **IAWA Journal**, v.23, n.4, p.391-418, 2002.
- ARCE, N.; MOYA, R. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. **Cerne**, v.21, n.3, p.353-362, 2015.
- BAAR, J.; WIMMER, R.; D'AMICO, S. Dependence of colour and discolouration on total extractive content of African Padauk and Jatobá. **Wood Science and Technology**, v.48, n.6, p.1155-1165, 2014.
- BERGO, M.C, PASTORE, T.C.; CORADIN, V.T.; WIEDENHOEFT, A.C.; BRAGA, J.W. NIRS identification of *Swietenia macrophylla* is robust across specimens from 27 countries. **IAWA Journal**, v.37, n.3, 420–430, 2016.
- BERNAL, R.A.; CORADIN, V.; CAMARGOS, J.; COSTA, C.; PISSARRA, J. Wood anatomy of Lecythidaceae species called tauari. **IAWA Journal**, v.32, n.1, p.97–112, 2011.
- BOTOSSO, P.C. **Identificação Macroscópica de Madeiras**: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Embrapa Florestas, Colombo, 2011. 65p.
- BRANDES, A.F.N.; NOVELLO, B.Q.; LEMOS, D.N.; NASCIMENTO, L.B.; ALBUQUERQUE, R.P.; TAMAIO, N.; BARROS, C.F. Wood anatomy of endangered Brazilian species. **IAWA Journal**, v.41, n.4, 510-576, 2020.
- CAIAFA, A.N.; MARTINS, F.R. Taxonomic identification, sampling methods, and minimum size of the tree sampled: implications and perspectives for studies in the Brazilian Atlantic Rainforest. **Functional Ecosystems and Communities**, v.1, n.2, p.95-104, 2007.
- CALLADO, C.H.; ROIG, F.A.; TOMAZELLO-FILHO, M.; BARROS, C.F. Cambial growth periodicity studies of South American woody species—a review. **IAWA Journal**, v.34, n.3, p.213-230, 2013.
- CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n.71, p.30-41, 2001.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v.9, n.4, p. 83-98, 2009.

CHATTAWAY, M.M. The wood anatomy of the Proteaceae. **Australian Journal of Biological Sciences**, v.1, n.3, p.279-302, 1948.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação**. IBAMA, Brasília, 2002.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A.; PASTORE, T.C.M.; CHRISTO, A.G. **Madeiras Comerciais do Brasil**: Chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 2010.

COSTER, C. **Zur anatomie und physiologie der zuwachszone-und jahresringbildung in den tropen**. Leiden Brill, 225p. Dissertação (Doctoral Agricultura e Veterinária). Universidade de Wageningen, 1927.

DETENNE, P.; JACQUET, P. **Atlas d'identification des bois de l'amazonie et des régions voisines**. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne, 1983. 640p.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA D.A, FERREIRA, M.E.B. **Package 'ExpDes.Pt'**. 2013.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA D.A. ExpDes.pt: **Pacote Experimental Designs. R package version 1.2.0**. <https://CRAN.Rproject.org/package=ExpDes.pt>. 2018.

FLORA DO BRASIL. **Lauraceae in Flora do Brasil 2020 em construção**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em 21 janeiro de 2020.

FRANKLIN, G.L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature, London**, v.155, n.3924, p.51-51, 1945.

GASSON, P. How precise can wood identification be? Wood anatomy's role in support of the legal timber trade, Especially CITES. **IAWA Journal**, v.32, n.2, p.137–154, 2011.

GEGZNA, V. **ManyROC: tools for ROC analysis**. Disponível em: <<https://github.com/gegzn/manyROC>>. Acesso em 12 janeiro de 2020.

GONÇALEZ, J. C.; MARQUES, M. H. B.; KARAS, M. C. S.; JANIN, G.; RIBEIRO, P. G. Effect of drying process on Marupá wood color. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v.16, n.3, p.337–342, 2014.

GOTTLIEB, O. R. Chemosystematics of the Lauraceae. **Phytochemistry**, v.11, n.5, p.1537-1570, 1972.

HECHENBICHLER, K.; SCHLIEP, K. **Weighted k-nearest-neighbor techniques and ordinal classification** Sonderforschungsbereich. Disponível em <<https://epub.ub.uni-muenchen.de/>>. Acesso em 26 abril 2022.

HEIN, P.R.G.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung**, v.64, n.1, p.45-54, 2010.

HWANG, S.W.; KOBAYASHI, K.; ZHAI, S.; SUGIYAMA, J. Automated identification of lauraceae by scale-invariant feature transform. **Journal of Wood Science**, v.64, n.2, 69–77, 2018.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features of hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.219-332, 1989.

JANSEN, W. A. 1962. **Botanical histochemistry**. WF Freeman and Co, San Francisco.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra**: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.5. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. 2017.

KARATZOGLOU, A.; SMOLA, A.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. Kernlab—an S4 package for kernel methods in R. **Journal of Statistical Software**, v.11, n.9, p.1–20, 2004.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v.28, n.5, p.1–26, 2008.

KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied predictive modeling**. Springer, New York, 2013.

KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; COOPER, T.; MAYER, Z.; KENKEL, B.; THE R CORE TEAM, BENESTY M, LESCARBEAU, R.; ZIEM, A.; SCRULLA, L.; TANG, Y.; CANDAN, C.; HUNT, T. **Caret: classification and regression training**. R package version 6.0-73, 2016.

LAZARESCU, C.; HART, F.; PIROUZ, Z.; PANAGIOTIDIS, K.; MANSFIELD, S.D.; BARRETT, J.D.; AVRAMIDIS, S. Wood species identification by near infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v.8, n.1, p.32–35, 2017.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR R: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.

LI, C.; QIU, Z.; LIU, C. An improved weighted k-nearest neighbor algorithm for indoor positioning. **Wireless Personal Communication**, v.96, n.2, p.2239–2251, 2017.

LONGUI, E.L.; ASSAD, A.; ARZOLLA, F. A.; VILELA, F.E.; BAITELLO, J.B.; DE LIMA, I.L.; FLORSHEIM, S.M. Ecological wood anatomy of *Ocotea curucutuensis*. **IAWA Journal**, v.35, n.4, p.356-362, 2014.

MENNEGA, A.M.W. Wood anatomy of the genus *Euplassa* and its relation to other Proteaceae of the Guianas and Brazil (Botanical Museum and Herbarium, Utrecht). **Acta Botanica Neerlandica**, v.15, p.117-129, 1966.

MEVIK, B.H.; WEHRENS, R.; LILAND, K.H. **Partial Least Squares and Principal Component Regression**. R package version 2. 7-3. 2020.

MCROBERTS, R. E.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Optimizing the k-nearest neighbors' technique for estimating forest aboveground biomass using airborne laser scanning data. **Remote Sensing and Environment**, n.163, p.13– 22, 2015.

MUÑIZ, I. B.; CARNEIRO, M. E.; BATISTA, R.; RODRIGUES, F.; SCHARDOSIN, F.Z.; NISGOSKI, S. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.18, n.3, 505-522, 2016.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; CHANSON, B.; DÉTIENNE, P.; GRIL, J.; THIBAUT, B. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. **Journal of Wood Science**, v.44, n.1, p.3-8, 1998.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAINADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v.46, n.4, p.267-272, 2000.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.I.B.; GONÇALVES, T.A.P.; BALLARIN, A. Use of visible and near-infrared spectroscopy for discrimination of eucalypt species by examination of solid samples. **Journal of Tropical Forest Science**, v.29, n.3, p.371-379, 2017a.

NISGOSKI, S.; DE OLIVEIRA, A.A.; DE MUÑIZ, G.I.B. Artificial neural network and SIMCA classification in some wood discrimination based on near-infrared spectra. **Wood Science and Technology**, v.51, n.4, p.929–942, 2017b.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives—a review. **Analytica Chimica Acta** v.1026, p.8-36, 2018.

PASTORE, T.C.M.; SANTOS, K.O.; RUBIM, J.C.A spectrocolorimetric study on the effect of ultraviolet irradiation of four tropical hardwoods. **Bioresource Technology**, v.93, n.1, p.37-42, 2004.

PASTORE, T.C.M.; BRAGA, J.W.B.; CORADIN, V.T.R.; MAGALHÃES, W.L.E.; OKINO, E.Y.A.; CAMARGOS, J.A.A.; DE MUÑIZ, G.I.B.; BRESSAN, O.A.; DAVRIEUX, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixá. **Holzforschung**, v.65, n.1, 73–80, 2011.

PAULA, J.D.; COSTA, K.P. **Densidade da madeira de 932 espécies nativas do Brasil**. Cinco Continentes, Porto Alegre. 2011.

RIBEIRO, J.E.L.S.; HOPKINS, M.J.G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.A.; COSTA, M.D.S.; BRITO, J.D. **Guia de identificação das plantas vasculares de uma Floresta de Terra-Firme na Amazônia Central**. Flora da Reserva Ducke Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus.1999.

RICHTER, H.G. Wood and bark anatomy of Lauraceae. I. Aniba Aublet. **IAWA Journal**, v.2, p.79-87, 1981.

ROHWER, J.G. **Lauraceae**. IN: KUBITZKI, K.; ROHWER, J.G.; BITTRICH, V. (eds) Flowering Plants Dicotyledons. The Families and Genera of Vascular Plants. pp 366-391, 1993.

SANTANA, F.B.; SOUZA, A. A. M.; ALMEIDA, M. R.; BREITKREITZ, M. A. C.; FILGUEIRAS, P. R.; SENA, M. M.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para classificação de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio combinado com análise discriminante por mínimos quadrados parciais: Um tutorial, Parte V. **Química Nova**, v.43, n.3, p.371– 381, 2020.

SEMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará (SEMA-PA). **Extração e Comércio de Toras de Madeira Nativa por Essência**: 2016. Disponível em: <<http://monitoramento.semas.pa.gov.br/sisflora/relatorios.html>>. Acesso em 21 de outubro de 2020.

SILVA, R.A.F.; SETTER, C.; MAZETTE, S.S.; DE MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. **Ciência da Madeira**, v.8, n.1, p.36-41, 2017.

SINGH, M.K.; SHARMA, M.; SHARMA, C.L. Wood anatomy of some members of family Lauraceae with reference to their identification. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v.12, n.2, p.137-144, 2015.

SNEL, F.A.; BRAGA, J.W.B.; DA SILVA, D; WIEDENHOEFT, A.C.; COSTA, A.; SOARES, R.; CORADIN, V.T.R.; PASTORE, T.C.M. Potential field-deployable NIRS identification of seven *Dalbergia* species listed by CITES. **Wood Science and Technology**, v.52, n.5, p.1411–1427, 2018.

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

SOARES, L.F.; SILVA, D.C.D.; BERGO, M.C.; CORADIN, V.T.; BRAGA, J.W.; PASTORE, T. 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, 2017.

SOARES, W.F.; MELO, L.E.L.; LISBOA, P.L.B. Anatomia do lenho de cinco espécies comercializadas como ‘sucupira’. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.1, p.114- 125, 2014.

SOFFIATTI, P.; BOEGER, M.R.T.; NISGOSKI, S.; KAUI, F. Wood anatomical traits of the araucaria forest, southern Brazil. **Bosque**, v.37, n.1, p.21-31, 2016.

SONG, Y.; LIANG, J.; LU, J.; ZHAO, X. An efficient instance selection algorithm for k nearest neighbor regression. **Neurocomputing**, n.251, p.26–34, 2017.

SONSIN, J. A.; GASSON, P.; MACHADO, S. R.; CAUM, C.; MARCATI, C. R. **Atlas da diversidade de madeiras do cerrado paulista**. Fepaf, Botucatu. 2014.

SOTELO-MONTES, C.; HERNÁNDEZ, R.E.; BEAULIEU, J.; WEBER, J.C. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **New Forests**, v.35, p.57-73, 2008

SOTELO-MONTES, C.; WEBER, J.C.; GARCIA, R.A.; SILVA, D.A.; MUÑIZ, G.I.B. Variation in wood color among natural populations of five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. **Canadian Journal of Forest Research**, v.43, n.6, p.552-562, 2013.

SOUSA, W.C.S.; DE JESUS, B.L.; SOARES, A.A.V.; GOULART, S.L.; DE PAULA, P.T. Wood colorimetry for the characterization of Amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v.25, n.4, p.451-462, 2019.

THULEAU, S.; HUSSON F. 2020. **FactoInvestigate: Automatic Description of Factorial Analysis**. R package version 1.6. <https://CRAN.R-project.org/package=FactoInvestigate>.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. 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.

VIEIRA, H. C.; SILVA, E. L.; SANTOS, J. X.; MUÑIZ, G. I. B.; MORRONE, S. R.; NISGOSKI, S. Wood colorimetry of native species of Myrtaceae from an Araucaria Forest. **Floresta**, v.49, n.2, p.353-362, 2019.

WESTON, P.H.; BARKER, N.P. A new suprageneric classification of the Proteaceae, with an annotated checklist of genera. **Telopea**, v.11, p.314-344, 2006.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and intelligent laboratory System**, v.58, n.2, p.109–130, 2001.

WHEELER, E.A.; BAAS, P. A survey of the fossil record for Dicotyledonous wood and its significance for evolutionary and ecological wood anatomy. **IAWA Journal**, v.12, n.3, p.275-318, 1991.

WHEELER, E.A.; BAAS, P.; RODGERS, S. Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the Insidewood database. **IAWA Journal**, v.28, p.229-258, 2007.

WICKHAM, H. ggplot2: 2016. **Elegant Graphics for Data Analysis**; Springer-Verlag New York, USA.

WORBES, M. Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the Neotropics. **IAWA Journal**, v.10, p.109-122, 1989.

WU, X.; KUMAR, V.; QUINLAN, J. R.; GHOSH, J.; YANG, Q; MOTODA, H.; MCLACHLAN, G.J.; NG, A.; LIU, B.; YU, P.S.; ZHOU, Z-H; STEINBACH, M.; HAND, D.J.; STEINBERG, D. Top 10 algorithms in data mining. **Knowledge and Information Systems**, v.14, n.1, 1-37, 2008.

CAPÍTULO 2

IDENTIFICAÇÃO ANATÔMICA, ESPETROSCOPIA NO VISÍVEL, CIELAB E INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) DE SEIS ESPÉCIES ARBÓREAS DA FAMÍLIA FABACEAE COMERCIALIZADA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Artigo publicado referente ao capítulo 2:

1. Santos, J. X. D.; Vieira, H. C.; Naide, T. L.; Souza, D. V.; Muñiz, G. I. B. D.; Soffiatti, P.; Nisgoski, S. Vis spectroscopy and CIELAB parameters of six wood species of the Fabaceae family marketed in the Brazilian Amazon. **International Wood Products Journal**, v.12, n.3, p.164-171, 2021.

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi descrever os caracteres anatômicos macroscópicos e microscópicos de oito amostras de madeiras pertencentes a família botânica Fabaceae e avaliar o potencial de utilização da Técnica Colorimetria e Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para a distinção dessas madeiras comercializadas na Amazônia Brasileira. As amostras de madeira foram coletadas nas comunidades extrativistas Verde para Sempre no Estado do Pará. Da base das árvores selecionadas foram retirados discos, com os quais foram confeccionados cubos de madeira nas dimensões 2,5x2,5x2,5 cm. Estes cubos foram usados para realização das análises macroscópicas e microscópicas da madeira, leituras no sistema CIEL*a*b e NIR. A caracterização da estrutura macroscópica e microscópica das madeiras foi de acordo com as normas da IAWA e Madeiras comerciais do Brasil. A identificação da estrutura anatômica macroscópica das amostras foi realizada nas três direções de corte da madeira: transversal, tangencial e radial. Os dados obtidos das características anatômicas da madeira foram submetidos à análise estatística quantitativa descritiva. Apesar da grande uniformidade estrutural observada em nível macroscópicos e microscópico foi possível estabelecer diferenças significativas entre a estrutura anatômica, registrando-se seis diferentes gêneros: *Hymenolobium*, *Dipteryx*, *Ormosia*, *Enterolobium*, *Hymenaea* e *Pseudopiptadenia*. Os dados de cor foram obtidos diretamente das amostras de madeira sólidas nas diferentes seções anatômicas (transversal, radial e tangencial), na região do visível na faixa de 360 a 740nm. Os parâmetros colorimétricos L*, b* e C*, para a seção radial, foram mais promissores para a distinção da maioria das amostras de madeira analisadas. Os espectros do infravermelho próximo foram obtidos diretamente das amostras de madeira sólidas nas diferentes seções anatômicas (transversal, radial e tangencial). O conjunto de dados foi dividido em aprendizado (70%) e teste (30%), usando de amostragem estratificada aleatória. O método *k*-fold cross validation foi usado para encontrar o hiperparâmetro *k* de ajuste ótimo. No geral, as curvas espectrais médias das amostras de madeira foram semelhantes entre si. Quando consideradas as seções da madeira, o melhor resultado foi para a seção tangencial que apresentou uma acurácia de (98,87%) e o F1-Score (98,61%). O classificador PLS-DA construídos com os espectros NIRS mostrou maior acurácia na distinção de espécies, com desempenho médio dos modelos aprendidos superior a 98%. Todas as análises foram realizadas no ambiente R. Pode-se concluir que, os caracteres anatômicos mais efetivos para a separação das espécies foram os tipos de raios, parênquima axial, fibras e/ ou tiloses, óleo resina e cristais em série nas células dos parênquimas axiais e/ou radiais. A colorimetria – espectroscopia no visível e a espectroscopia no infravermelho próximo apresentaram potencial para discriminação de algumas espécies de madeira da família Fabaceae.

Palavras-chave: Parâmetros colorimétricos, espectros de reflectância, extrativismo, espécies de madeira, análise não destrutiva, Fabaceae.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to describe the macroscopic and microscopic anatomical characters of eight wood samples belonging to the Fabaceae botanical family and to evaluate the potential of using the Colorimetry and Near Infrared Spectroscopy (NIR) technique to distinguish these woods commercialized in the Brazilian Amazon. The wood samples were collected in the extractive communities Verde para Sempre in the State of Pará. Disks were removed from the tree base, and wooden cubes measuring 2,5x2,5x2,5 cm were made from them. These cubes were used to perform the macroscopic and microscopic analysis of the wood, to obtain data in the CIEL*a*b system and in the NIR. The characterization of the macroscopic and microscopic structure of the woods was in accordance with the IAWA and Commercial Woods of Brazil standards. The identification of the macroscopic anatomical structure of the samples was performed in the three directions of wood cutting: transversal, tangential and radial. The data obtained from the anatomical characteristics of the wood were submitted to descriptive quantitative statistical analysis. Despite the great structural uniformity observed at the macroscopic and microscopic levels, it was possible to establish significant differences between the anatomical structure, recording six different genera: *Hymenolobium*, *Dipteryx*, *Ormosia*, *Enterolobium*, *Hymenaea* and *Pseudopiptadenia*. Color data were obtained directly from solid wood samples in the different anatomical sections (transverse, radial and tangential), in the visible region in the range of 360 to 740nm. The colorimetric parameters L*, b* and C*, from radial section were more promising to discrimination for most of the analyzed wood samples. The near infrared spectra were obtained directly from solid wood samples in different anatomical sections (transverse, radial and tangential). The dataset was divided into learning (70%) and testing (30%), using stratified random sampling. The k-fold cross validation method was used to find the optimal fit hyperparameter k. In general, the average spectral curves of the wood samples were similar to each other. When considering the wood sections, the best result was for the tangential section, which presented an accuracy of (98.87%) and the F1-Score (98.61%). The PLS-DA classifier built with the NIRS spectra showed greater accuracy in distinguishing species, with an average performance of the learned models above 98%. All analyzes were performed in the R environment. It can be concluded that the most effective anatomical characters for the separation of species were the types of rays, axial parenchyma, fibers and/or tyloses, oleoresin and crystals in series in the axial and/or radial parenchyma cells. Colorimetry – visible spectroscopy and near-infrared spectroscopy showed potential for discrimination of some wood species of the Fabaceae family.

Keywords: Color parameters, reflectance spectra, extractivism, wood species, nondestructive analysis, Fabaceae.

2.1 INTRODUÇÃO

A Amazônia Brasileira é uma das maiores produtoras de madeiras tropicais do mundo, sendo que a industrialização de madeira está entre as principais atividades econômicas (VERISSIMO; PEREIRA, 2015).

Nesse sentido, dentre as famílias botânicas com mais espécie madeireiras comercializadas no Estado do Pará, destaca-se a família Fabaceae, que inclui 795 gêneros e quase 20000 espécies, estando entre as três maiores famílias de plantas produtoras de madeira (LEWIS et al., 2005). A Fabaceae é a família com maior diversidade e número de espécies na flora brasileira, estando entre as três famílias mais diversas em todos os domínios fitogeográficos do Brasil. Cerca de 50% das espécies são endêmicas do país (FLORA DO BRASIL, 2020), destacando-se, com maior relevância econômica, *Hymenaea courbaril* L., *Hymenolobium petraeum* Ducke e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. que são amplamente comercializadas por apresentar madeira de excelente qualidade, com ótima trabalhabilidade e resistência ao ataque de agentes xilófagos.

No setor madeireiro no Estado do Pará, dentre as espécies da família Fabaceae comercializadas estão: Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), Cumarú (*Dipteryx odorata*), Louro cumarú (*Ormosia* sp.), Fava tamboril (*Enterolobium maximum* Ducke), Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e Timborana (*Pseudopiptadenia suaveolens* (Miq.) J.W. Grimes).

O processo de identificação de madeira através da sua estrutura anatômica é complexo e envolve as etapas de descrição macroscópicas e microscópica. A análise macroscópica do lenho, em geral, são suficientes para identificar uma amostra de madeira à nível de gênero (GASSON, 2011). Porém, a identificação precisa da madeira depende principalmente de suas características microscópicas, visto que os caracteres macroscópicos, apesar de fornecerem informações importantes, podem ser bastantes variáveis (BERNAL et al., 2011).

Apesar de permitir a identificação da maioria das madeiras comerciais conhecidas atualmente no país, a identificação macroscópica se mostra restritiva quando se deseja uma identificação botânica segura em nível específico, sobretudo, com espécies madeireiras pertencentes a grupos botânicos que apresentam maior complexidade e/ou similaridade estrutural. Assim, na identificação microscópica, podem ser devidamente analisados aspectos do lenho, como tipos de pontoações,

tipo de ornamentação das paredes celulares, composição celular dos raios parenquimáticos, dimensões celulares, presença de inclusões inorgânicas (cristais e sílicas), entre outras características importantes não só para a identificação da madeira, mas também para sua correta utilização (BOTOSSO, 2011).

Assim como também é de fundamental importância a criação de banco de dados e armazenamento de amostras de madeiras para que se possa consultar quando houver dúvidas em relação à identificação de espécies de potencial madeireiro (GUMA et al., 2015; MACHADO et al., 2015). Pastore et al. (2011) problematizam a existência de muitas espécies semelhantes visualmente, por exemplo, *Carapa guianensis* Aubl., *Cedrela odorata* L. e *Micropholis melinoniana* Pierre.

Nesse sentido, as técnicas não-destrutivas para discriminação de espécies através de amostras de madeira constituem uma importante ferramenta. Entre elas estão a colorimetria e a espectroscopia de visível, métodos que podem ser aplicados para discriminação ou caracterização de madeiras com base na cor. Vários estudos têm descrito o uso da colorimetria para identificação de espécies, como Vieira et al. (2019), que avaliou algumas espécies de Myrtaceae em uma área remanescente de Mata Atlântica, e Sousa et al. (2019), analisando espécies tropicais da Amazônia.

O sistema CIELAB, proposto pela CIE (Comisión Internacional de L'Eclairage) é o método mais aplicado para definição de cores de materiais, baseado em três parâmetros: luminosidade, matiz e saturação. A luminosidade, representada pela variável L^* , está relacionada à posição no eixo preto-branco; e as variáveis a^* e b^* denotam a posição nos eixos verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente. Com base nos valores de a^* e b^* , são calculadas as métricas de croma (C^*) e ângulo de matiz (h) (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

Do mesmo modo, a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) tem sido utilizada com sucesso como um método não-destrutivo e rápido, com qualidade de análises satisfatórias (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). A espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR), tem sido caracterizada como uma medida quantitativa não destrutiva, baseada em métodos estatísticos e matemáticos com intuito de auxiliar na discriminação e identificação de espécies de potencial madeireiro e prever suas qualidades antes de encaminhá-las à comercialização (TSUCHIKAWA et al. 2003).

Sendo assim, o objetivo deste capítulo foi descrever os caracteres anatômicos macroscópicos e microscópicos de seis amostras de madeiras pertencentes à família

botânica Fabaceae e avaliar o potencial de utilização das técnicas de Colorimetria e Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) para a distinção dessas madeiras comercializadas na Amazônia Brasileira.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma Área de Manejo Florestal Sustentável (AMFS) pertencente a duas comunidades extrativistas, Paraíso e Arimum. Ambas as comunidades se encontram na Reserva Extrativista “Verde Para Sempre” localizada a 01°55'45,4" S e 52°56'10,5" W, com uma área total de 1.289.362,78 hectares no município de Porto de Moz, Estado do Pará. A Paraíso possui um volume autorizado de exploração anual de madeira de 2.198,64 m³ (Autorização 7/2017) e a Arimum tem autorização para extração de 4.740,74 m³ (Autorização 9/2016).

O estudo foi aprovado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Instituto Chico Mendes (ICMBio) sob o número 64485-1, conforme cadastro no Sistema de Informações de Autorização e Biodiversidade (SISBIO). Todas as espécies analisadas estão cadastradas no Sistema Nacional de Gerenciamento do Patrimônio Genético (SisGen) sob o código A96552E.

As espécies deste estudo foram coletadas em dois censos florestais realizados em Unidades de Produção Anual (UPA-2016 e UPA-2017). As árvores foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de cada área de exploração legal entre os dias 23 e 25 de agosto de 2018. O procedimento para as análises baseou-se nas seguintes etapas: 1) seleção da espécie (árvore); 2) corte da árvore e remoção de um disco de madeira com 5 cm de espessura com 10 cm acima do ponto de corte; 3) Posteriormente retirou-se uma faixa central de 5 cm de largura do disco de madeira, no sentido casca medula; 4) estas faixas de madeiras com 5 cm de largura por 5 cm de espessura foram seccionadas em cubos de madeira sólidas com dimensões 2,5x2,5x2,5 cm (comprimento, largura e espessura). Estes cubos foram usados para realização das análises macroscópicas e microscópicas da madeira, leituras no sistema CIEL*a*b e na Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR).

A identificação das espécies ocorreu posteriormente no Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira (LANAQM) da Universidade Federal do Paraná, UFPR. A amostragem dos indivíduos abrangeu toda a variação radial do tronco, não houve a separação entre cerne e alburno. Foram utilizados 101 cubos de madeiras sólidas Quadro 2.1.

QUADRO 2.1- AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAISO E ARIMUM, NO ESTADO DO PARÁ.

Nome vernacular	Nome científico	Comunidade	Árvores	Cubos de madeira sólida
Angelim pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	Paraíso	1	14
Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>	Arimum	1	11
Louro cumarú	<i>Ormosia</i> sp.	Paraíso	1	12
Fava tamboril	<i>Enterolobium maximum</i>	Paraíso	1	13
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Paraíso	1	18
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Arimum	1	8
Timborana	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Paraíso	2	25
Total de amostras			8	101

FONTE: A autora (2022).

2.2.1 Caracterização da estrutura anatômica da madeira

A caracterização da estrutura macroscópica e microscópica do lenho das amostras foi realizada de acordo com as normas da International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1989) e Madeiras comerciais do Brasil (CORADIN et al., 2010). A identificação das amostras de madeira por meio de análises da estrutura anatômica macroscópica foi realizada através da orientação dos corpos de prova nas três direções de corte da madeira: transversal e longitudinal (radial e tangencial). Inicialmente, para padronizar as superfícies e realçar as características anatômicas os cubos de madeira foram polidos com lixa de granulometria de número 80, 600 e 1500. Em seguida, fez-se as análises da estrutura anatômica com uso de lupa de 10x aumento.

Para a captura das imagens macroscópicas foi utilizado um estereomicroscópio, marca Zeiss modelo Stereo Discovery- V12 com Software Axio Vision com uma escala micrométrica acoplada à lente. Em seguida, foi realizada a descrição anatômica, verificando-se as características gerais da madeira, a saber: cor; brilho; odor; resistência ao corte manual; presença de camadas de crescimento; parênquima axial: visibilidade e tipo; raios: visibilidade; vasos: visibilidade, tipo, distribuição e obstrução.

Para as análises microscópicas da madeira foram preparados corpos de prova com dimensões de 2,5 centímetros nas três direções de corte da madeira: transversal,

longitudinal (radial e tangencial). Preparou-se lâminas permanentes com cortes com espessura de 24 μm para as análises e mensuração das seguintes características anatômicas: i) frequência dos raios; ii) altura dos raios; iii) largura dos raios em número de células; iv) frequência dos vasos; v) diâmetro dos vasos. A coloração seguiu o método de tripla coloração, sendo desidratadas em série alcoólica ascendente. Para as medições dos elementos celulares utilizou-se estereomicroscópio, marca Zeiss modelo Stereo Discovery- V12 com Software Axio Vision com uma escala micrométrica acoplada à lente.

O material dissociado foi produzido pelo método de Franklin (1945). As imagens foram obtidas com um estereomicroscópio Zeiss Discovery V12 acoplado a uma câmera e processadas com o software Axio Vision para mensuração das características microscópicas.

2.2.2 Colorimetria - espectroscopia no visível

A avaliação colorimétrica foi realizada com base no sistema CIEL* $a^* b^*$, com espectrofotômetro Konica Minolta CM-5, com o software Spectra Magic NX, utilizando iluminante D65 e ângulo de observação de 10° , operando na faixa espectral de 360 a 740 nm e resolução de 10 nm. Para padronizar as superfícies e eliminar a influência da oxidação, todas as amostras foram polidas com lixa com granulometria progressiva até 1500. Todas as amostras foram mantidas em temperatura de $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. As amostras de madeira permaneceram nessas condições até serem realizadas todas as leituras.

Em seguida, estas foram submetidas a medições aleatórias nas três direções de corte da madeira: (transversal, tangencial e radial). Em cada bloco, realizaram-se 18 leituras (seis em cada seção), totalizando 1.818 (QUADRO 2.2), leituras na região do espectro visível, no intervalo de 360 a 740nm. Foram obtidos os seguintes parâmetros colorimétricos: luminosidade (L^*); coordenada do eixo verde-vermelho (a^*); e coordenada do eixo azul-amarelo (b^*). Com os valores de a^* e b^* foram calculados a saturação (C^*) e o ângulo de tinta (h) de acordo com as equações (Eq. 1) e (Eq. 2), respectivamente.

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

QUADRO 2.2- NÚMERO DE LEITURAS NAS AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE, COLETADA NA COMUNIDADE PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.

Nome vernacular	Nome científico	Comunidade	Cubos de madeira sólida
Angelim pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	Paraíso	14
Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>	Arimum	11
Louro cumarú	<i>Ormosia</i> sp.	Paraíso	12
Fava tamboril	<i>Enterolobium maximum</i>	Paraíso	13
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Paraíso	18
Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Arimum	8
Timborana	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Paraíso	25
Total de amostras			101

FONTE: A autora (2022).

2.2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

De acordo com Hein et al. (2010), a preparação da amostra de madeira influencia nos espectros obtidos pelo NIR, assim, para representar a forma mais comum de transporte de madeira, os espectros NIR foram coletados diretamente das superfícies sólidas dos blocos. Para tal, foi utilizado um espectrômetro Tensor 37 (Bruker), adaptado com uma esfera de integração, operando em reflectância difusa (4000 a 10000 cm⁻¹) com resolução 4 cm⁻¹ e 64 varreduras. Para padronizar as superfícies e eliminar a influência da oxidação, todas as amostras foram polidas com lixa com granulometria progressiva até 1500. Todas as amostras foram mantidas em ambiente climatizado com temperatura de 23°C ± 2°C e umidade relativa de 60% ± 5%. As amostras de madeira permaneceram nessas condições até serem realizadas todas as leituras. Em seguida, estas foram submetidas a medições aleatórias nas três direções de corte da madeira: (transversal, tangencial e radial). Em cada cubo sólido, realizaram-se 18 leituras (seis em cada seção), totalizando 1.818, da mesma forma que na análise de cor (QUADRO 2.2).

2.2.4 Análise estatística

2.2.4.1 Caracterização anatômica da madeira

Os dados quantitativos de características anatômicas microscópicas (altura e largura de raios, frequência de vasos e diâmetro de vasos) obtidos das amostras de madeira das espécies da família Fabaceae foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e teste de Bartlett para avaliação das pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias ($\alpha = 0,05$). Para todas as variáveis a distribuição dos dados amostrais não seguiu a curva de normalidade e, portanto, para garantir as pressuposições da análise de variância foi realizada a transformação Box-Cox e logarítmica das variáveis, porém estas não foram bem-sucedidas. Assim, a abordagem alternativa foi realizar um teste de comparações de médias não paramétrico (de três ou mais grupos). Portanto, foi usado o teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) implementado no pacote “AgroR” (SHIMIZU et al., 2022) para avaliar a hipótese de inexistência de diferenças entre grupos de espécies.

Para verificar a influência do comportamento das características anatômicas para o grupo de espécies foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) com auxílio do pacote FactoMineR (LÊ et al., 2008; KASSAMBARA; MUNDT, 2017), e os principais resultados foram extraídos com uso do pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON, 2020). Um gráfico biplot foi construído para visualizar o relacionamento das amostras na PCA e a contribuição de cada variável para as componentes principais.

2.2.4.2 Colorimetria – espectroscopia no visível

A análise de variância (ANOVA) foi realizada com os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h) em um delineamento inteiramente casualizado em esquema de dois fatores (espécie x seção anatômica). A análise foi feita com o pacote ExpDes.pt. O teste Snedecor F de ANOVA ($\alpha = 0,05$) foi aplicado para verificar a significância da interação dos fatores. Quando foram encontradas interações significativas, foi realizado o desdobramento das interações e aplicado o teste de

Tukey ($\alpha = 0,05$). O objetivo deste procedimento foi analisar o comportamento dos fatores das espécies em cada seção anatômica e vice-versa.

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada para avaliar a influência dos parâmetros colorimétricos no agrupamento das espécies, com o pacote FactoMineR (LÊ et al., 2008), e os resultados principais foram extraídos com o pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON, 2020). Um gráfico biplot foi construído para verificar a relação dos espectros de PCA e a contribuição de cada variável para os componentes principais. As curvas de reflectância de espectros visíveis foram traçadas com o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016). Todas as análises foram realizadas com a linguagem R (versão 3.4.3).

2.2.4.3 Espectroscopia no infravermelho próximo

2.2.4.3.1 Algoritmos de aprendizado de máquina

Neste estudo, foram testadas três técnicas de aprendizado de máquina para a construção de modelos de reconhecimento de espécies: a) *Support Vector Machine* (SVM); b) *Partial Least Squares - Discriminant Analysis* (PLS-DA); e c) *k-Nearest Neighbors* (*k*-NN).

2.2.4.3.2 *Support Vector Machine* - SVM

Neste estudo utilizou-se o algoritmo com função kernel de base radial, cuja implementação está disponível na biblioteca 'kernlab' (Karatzoglou et al., 2004). Esta versão do algoritmo apresenta dois hiperparâmetros de ajustes: *C* (custo de violação de restrições) e *sigma* (parâmetro de kernel de base radial).

2.2.4.3.3 *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* - PLS-DA

Neste estudo, foi utilizado o algoritmo 'pls' implementado no pacote CARET (KUHN et al., 2016) que faz interface com o pacote de mesmo nome (MEVIK et al., 2020) para implementação do Partial Least Squares - Discriminant Analysis. Nesse caso, uma matriz de variáveis dummy é criada com uma coluna para cada classe. Esta matriz de resposta é usada como uma entrada para a função `plsr()` do pacote

'pls' (KUHN, 2008). A função softmax transforma as predições do modelo em valores "semelhantes à probabilidade", e a classe com maior valor é a predita. Esta versão possui um hiperparâmetro de ajuste: $ncomp$ = número de componentes principais.

2.2.4.3.4 *k-nearest neighbors* k-NN

Neste estudo, o algoritmo 'knn' implementado no pacote CARET (Treinamento de Classificação e Regressão) (KUHN et al., 2016) foi aplicado. Esta versão possui um hiperparâmetro de ajuste: k é o número de vizinhos mais próximos. Como padrão, o algoritmo utiliza a métrica euclidiana para o cálculo da distância entre a observação e o peso uniforme para os vizinhos mais próximos.

2.2.4.3.5 Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação

Os modelos preditivos foram construídos com espectros de infravermelho próximo com base na suposição de que espectros de diferentes seções anatômicas de madeira (transversal, radial e tangencial) podem produzir padrões para a discriminação de espécies. Assim, para modelos de aprendizagem, quatro experimentos foram estabelecidos: E1 é o espectro NIR aplicado de todas as seções de madeira ($n = 1.818$); E2 é a aplicação apenas dos espectros NIR da seção transversal de madeira ($n = 606$); E3 é a aplicação apenas de espectros NIR da seção tangencial de madeira ($n = 606$); e E4 é a aplicação apenas de espectros NIR da seção radial de madeira ($n = 606$).

O método de validação cruzada repetida k -fold (validação cruzada 5 vezes, repetido dez vezes) com base na estratificação e bloqueio foi usado para estimar o desempenho dos classificadores. Portanto, cada modelo de aprendizado preditivo foi avaliado em 50 amostras de validação. Para a criação das partições de validação cruzada, foi utilizada a função `cvo_create_folds()` do pacote manyROC (GEGZNA, 2020), especificando o vetor da variável resposta (espécie) como fator de estratificação e a coluna de identificação do bloco (cubos de madeira maciça) como bloqueio fator. Assim, o procedimento foi feito para garantir que os dados do mesmo bloco de uma espécie estivessem exclusivamente no conjunto de treinamento ou

validação, para ter resultados mais realistas nas estimativas de desempenho dos modelos.

O aprendizado dos modelos preditivos foi feito por meio da interface do pacote CARET, um framework disponível em linguagem R para classificação e análise de regressão (KUHN et al., 2016). Na fase de pré-processamento, todos os preditores foram centralizados e escalados. Para cada algoritmo de aprendizado de máquina, uma grade de hiperparâmetros candidatos foi estabelecida. Portanto, a estratégia de pesquisa de grade foi usada para encontrar os hiperparâmetros de ajuste ideais. As variantes do hiperparâmetro para cada algoritmo de aprendizado de máquina são mostradas na (QUADRO 2.3).

QUADRO 2.3- VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.

Algoritmo	Variantes de Hiperparâmetros	Método/Pacote	Autores
Support Vector Machine (SVM)	$C = 2^c(-2, 0, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12)$ $\text{Sigma} = c(0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,05)$	svmRadial/kernlab	Karatzoglou et al. (2004)
Partial Least Squares - Discriminant Analysis (PLS-DA)	ncomp = seq(1:30)	pls/pls	Mevik et al. (2020)
k-Nearest Neighbor (k-NN)	k = seq(2, 25, 1)	knn/caret	Kuhn et al. (2016)

Fonte: A autora (2022).

C = custo de violação de restrições; *sigma* = parâmetro kernel de base radial; k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais.

A matriz de confusão foi calculada para cada amostra de validação. Posteriormente, uma matriz de confusão simples foi obtida adicionando as 50 matrizes determinadas em amostras de validação. Em cada experimento, a matriz de confusão que reúne todas as previsões fora da amostra foi usada para avaliar a confusão entre as espécies da família Fabaceae pelos classificadores mais precisos. As métricas para o desempenho da classificação do modelo foram extraídas usando a função confusão Matrix () do pacote CARET, que produz uma matriz de confusão e muitas métricas usando a abordagem um contra todos. Os modelos selecionados por validação cruzada foram avaliados aplicando-se a exatidão das métricas (Eq. 1), recall (Eq. 2), pontuação F1 (Eq. 3) e precisão (Eq. 4). Onde: Verdadeiro positivo (TP) = número de amostras classificadas corretamente na classe C_i ; Verdadeiro negativo (TN) = número de amostras corretamente classificadas como não pertencentes à classe C_i ; Falso positivo (FP) = número de amostras classificadas incorretamente na

classe C_i ; Falso negativo (FN) = número de amostras classificadas incorretamente como não pertencentes à classe C_i . A seleção do modelo final foi baseada na “regra de tolerância”, que sugere a seleção do modelo preditivo mais simples que está dentro de uma tolerância percentual no modelo empiricamente ótimo na validação cruzada (KUHN et al., 2016). Portanto, no experimento, foi estabelecida uma tolerância de 1,5% para o modelo de precisão (isso é padrão no pacote CARET).

$$Acurácia = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$F1 - score = (1 + \beta^2) \frac{Precisão \cdot Recall}{((\beta^2 \cdot Precisão) + Recall)} \quad (3)$$

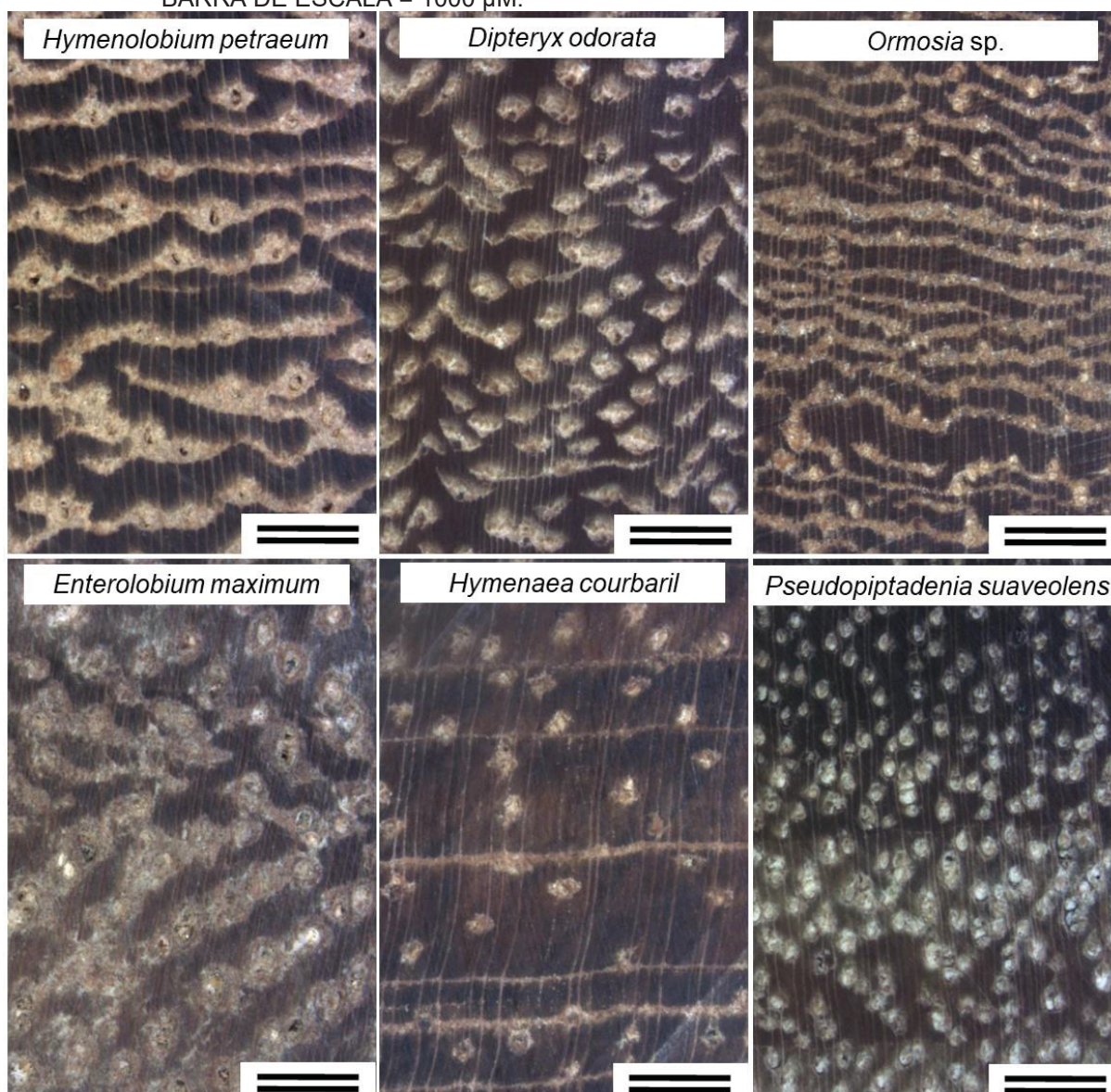
$$Precisão = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização anatômica da madeira

Foram identificados seis gêneros diferentes oriundos de seis amostras de madeira da família Fabaceae (FIGURA 2.1): angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), cumarú (*Dipteryx odorata*), louro cumarú (*Ormosia* sp.), fava tamboril (*Enterolobium maximum*), dois jatobás (*Hymenaea courbaril*) e duas timboranas (*Pseudopiptadenia suaveolens*).

FIGURA 2.1 - IMAGENS MACROSCÓPICA DE AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE. BARRA DE ESCALA = 1000 μ M.



FONTE: A autora (2022).

As amostras de madeira sólida puderam ser separadas em três grupos de acordo com a cor do cerne observado na análise macroscópica da madeira (FIGURA 2.1), sendo eles: amarronzado (*Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx odorata* e *Ormosia* sp.), pardo claro rosado (*Enterolobium maximum*) e marrom avermelhado (*Hymenaea courbaril* e *Pseudopiptadenia suaveolens*).

Na Tabela 2.1 está a estatística descritiva para as características anatômicas de seis espécies da família Fabaceae. Em relação à quantidade de raios (por milímetros), *Dipteryx odorata* e *Enterolobium maximum* apresentaram valores significativamente maiores e estatisticamente iguais entre si, enquanto as madeiras de *Hymenaea courbaril* mostraram as menores quantidades. A altura de raios foi superior na espécie *Hymenolobium petraeum* e *Ormosia* sp., e inferior para *D. odorata*. Por outro lado, *Hymenaea courbaril* e *Hymenolobium petraeum* mostraram maiores larguras de raios, e *Pseudopiptadenia suaveolens* raios menos largos. *P. suaveolens* apresentou maior quantidade de vasos por milímetro quadrado. Em termos de diâmetro de vasos, a espécie *Enterolobium maximum* mostrou a média superior, e *D. odorata* e *Ormosia* sp. os menores valores de diâmetro e estatisticamente iguais entre si.

TABELA 2.1 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS DIMENSÕES DAS CÉLULAS DE MADEIRAS PERTENCENTES À FAMÍLIA FABACEAE, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ, BRASIL.

Nome Científico	Estatística	Raios/mm	Altura raios (µm)	Largura raios (µm)	Vasos/mm ²	Diâmetro vasos (µm)
<i>Ormosia</i> sp.	Min.	3	206,82	25,92	3	73,51
	Média	4,60 cd	346,03 a	25,92 b	4,70 b	111,50 e
	Max.	7	569,12	25,92	8	146,19
	Dp	1,19	85,56	1,01	1,18	20,29
<i>Dipteryx odorata</i>	Min.	6	130,67	11,88	3	54,04
	Média	8,43 a	164,09 e	23,52 bc	4,47 b	115,50 e
	Max.	12	202,09	31,09	7	167,40
	Dp	1,55	18,29	4,36	0,94	26,80
<i>Hymenolobium petraeum</i>	Min.	4	201,01	19,47	1	127,47
	Média	5,67 b	336,61 a	40,42 a	2,17 d	191,77 b
	Max.	7	442,65	66,31	4	262,53
	Dp	0,92	51,35	12,26	0,83	36,34
<i>Enterolobium maximum</i>	Min.	5	128,58	11,88	1	167,39
	Média	7,77 a	236,53 d	21,44 c	2,80 d	225,12 a
	Max.	12	346,82	38,88	4	295,69
	Dp	1,68	59,06	7,19	0,81	34,99
<i>Hymenaea courbaril</i>	Min.	2	163,24	14,04	2	84,3
	Média	4,17 d	303,64 b	46,11 a	3,53 c	147,18 c
	Max.	8	482,28	80,5	7	216,87
	Dp	1,01	70,98	13,78	1,46	26,31
<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Min.	3	151,5	9,96	3	87,47
	Média	5,12 c	271,52 c	17,30 d	6,82 a	136,29 d
	Max.	8	386,00	31,32	11	254,88
	Dp	1,17	56,05	4,37	2,21	34,12

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: letras iguais em cada característica anatômica (coluna) indica que não há diferença entre as espécies baseado no teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$). Min. = mínimo; Max. = máximo; Méd= média; Dp= desvio padrão.

2.3.1.1 Louro cumarú versus Cumarú

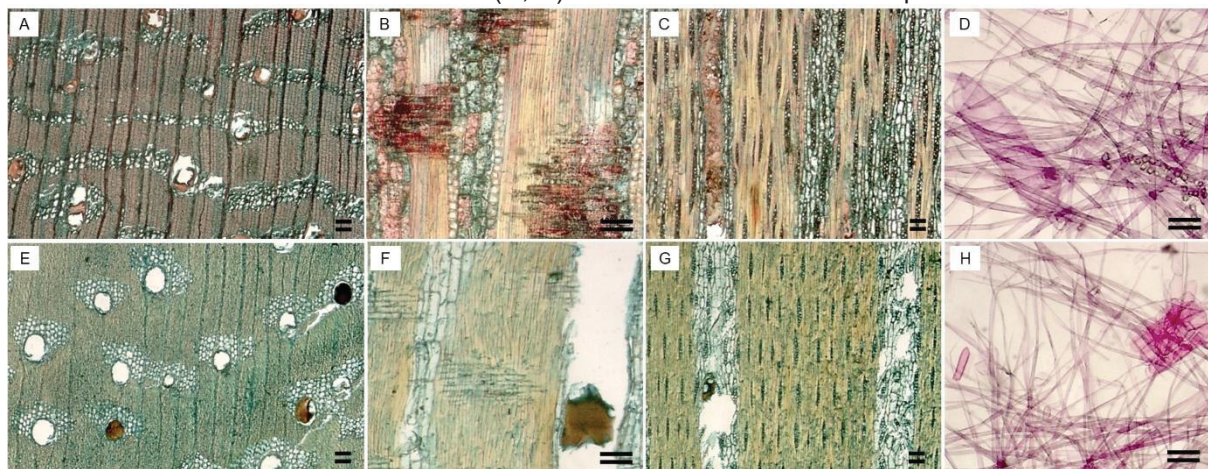
As amostras de madeira de *Ormosia* sp. (louro cumarú) e *Dipteryx odorata* (cumarú) foram semelhantes em quase todos os caracteres macroscópicos da

madeira. No entanto, diferiram parcialmente em relação à textura. *Ormosia* sp. apresentou cerne e alburno indistintos pela cor, e quando distinto, cerne com cor amarronzado; textura média a grossa com aspecto fibroso atenuado; grã irregular; cheiro e gosto indistintos. Do mesmo modo, *D. odorata*, cerne e alburno indistintos pela cor e quando distinto cerne com cor amarronzado; textura grossa com aspecto fibroso atenuado; grã irregular; cheiro e gosto indistintos. Parênquima axial visíveis sob lente; raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos e numerosos; vasos visíveis a olho nú, pequeno a médios, poucos; anéis de crescimento pouco distintas, demarcados por zonas fibrosas.

Os caracteres anatômicos microscópicos de ambas as espécies também apresentaram similaridade. *Ormosia* sp. (FIGURA 2.2 A-D) exibiu anéis de crescimento pouco distintos pelo espessamento da parede das fibras; vasos com porosidade difusa, solitários e múltiplos radiais de 2-3, obstruídos por óleo resina, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; parênquima axial aliforme e confluyente em trechos curtos e longos, formando faixas, raios homogêneos e/ou heterogêneos, com uma fileira marginal de células quadradas, uni a trisseriados, bisseriados em maioria e não estratificados; fibras com paredes grossas e não septadas; cristais prismáticos em série presentes nas células dos parênquimas axiais.

Dipteryx odorata (FIGURA 2.2 E-H) possui anéis de crescimento pouco distintos pelo espessamento da parede das fibras; vasos com porosidade difusa, solitários e múltiplos radiais de 2-3, obstruídos por óleo resina, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; parênquima axial aliforme e confluyente em trechos curtos e longos, formando faixas; raios homogêneos, unisseriados em maioria, bisseriados somente nas regiões de parênquima axial e estratificados; fibras com paredes grossas, não septadas; cristais prismáticos presentes nas células dos parênquimas axiais.

FIGURA 2.2 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Ormosia* sp. - (A-D) E *Dipteryx odorata* (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100µm.



FONTE: A autora (2022).

2.3.1.2 Angelim pedra versus Fava tamboril

Ao analisar as características macroscópicas das amostras de madeira de *Hymenolobium petraeum* (angelim pedra), observou-se que alguns caracteres macroscópicos foram semelhantes aos de *Enterolobium maximum* (fava tamboril). *H. petraeum* apresentou cerne e alburno indistintos pela cor e quando distinto, cerne com cor amarronzado, textura grossa com aspecto fibroso acentuado, grã irregular, cheiro e gosto indistintos. Parênquima axial: visíveis a olho nu; raios: visíveis a olho nú no topo e na face tangencial; vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes, poucos; anéis de crescimento: distintas demarcadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.

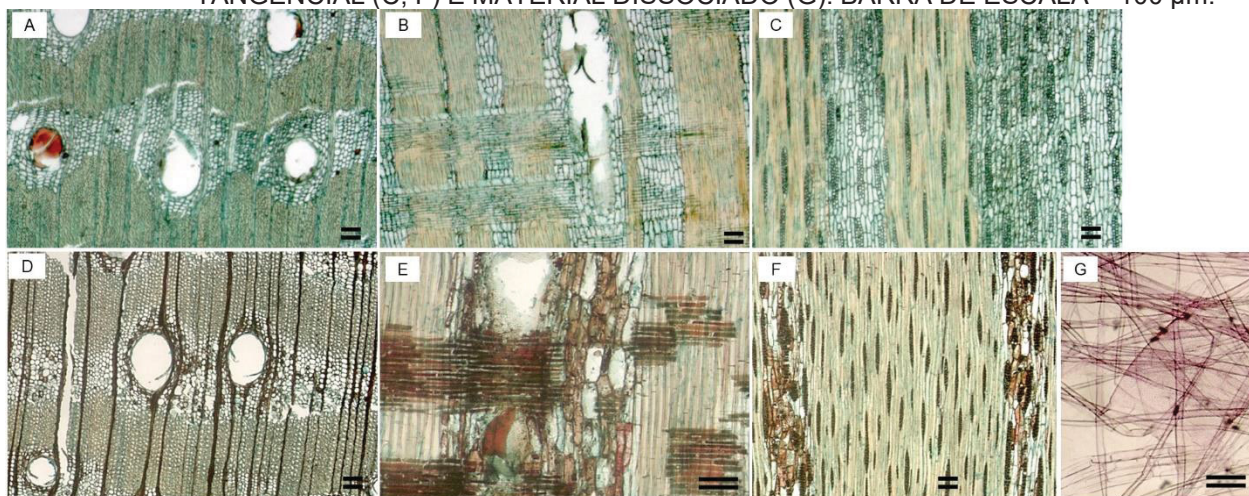
E. maximum exibiu também cerne e alburno indistintos pela cor e quando distinto, cerne com cor pardo-claro a rosado/ amarronzado, textura média a grossa, grã direita a irregular, cheiro e gosto indistintos, superfície radial lustrosa. Parênquima axial: visíveis apenas com lente 10x; raios: visíveis apenas com lente 10x nas duas superfícies; vasos: visíveis a olho nu, grandes, poucos; anéis de crescimento: pouco distinta.

Os caracteres microscópicos de ambas as amostras de madeira apresentaram diferenças distintas entre si. *Hymenolobium petraeum* (FIGURA 2.3 A-C) apresentou anéis de crescimento distintos pelo faixa de parênquima axial; vasos com porosidade difusa, solitários e múltiplos radiais de 2-3, obstruídos por óleo resina, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; parênquima axial aliforme e confluyente com trechos curtos e longos, formando faixas finas e/ou linhas

marginais; raios heterogêneos, com células procumbentes no corpo do raio com 1-2 camadas de células marginais quadradas ou eretas, trisseriados e bisseriados com estratificação irregular na região do parênquima axial; fibras com paredes grossas, não septadas; cristais prismáticos em série presentes nas células dos parênquimas axiais.

Enterolobium maximum (FIGURA 2.3 D-G) possui anéis de crescimento distintos pelo espessamento da parede das fibras; vasos com porosidade difusa, grandes, solitários e múltiplos radiais de 2-3, tiloses presentes, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; parênquima axial vasicêntrico, aliforme losangular e confluyente em trechos curtos, eventualmente formando faixas; raios homogêneos, unisseriados e multisseriados com 1 a 3 células de largura, não estratificados; fibras com paredes médias e septadas.

FIGURA 2.3 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Hymenolobium petraeum* (A-C) E *Enterolobium maximum* (D-G). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, D), SEÇÃO RADIAL (B, E), SEÇÃO TANGENCIAL (C, F) E MATERIAL DISSOCIADO (G). BARRA DE ESCALA = 100 µm.



FONTE: A autora (2022).

2.3.1.3 Jatobá (1210) versus Jatobá (1339)

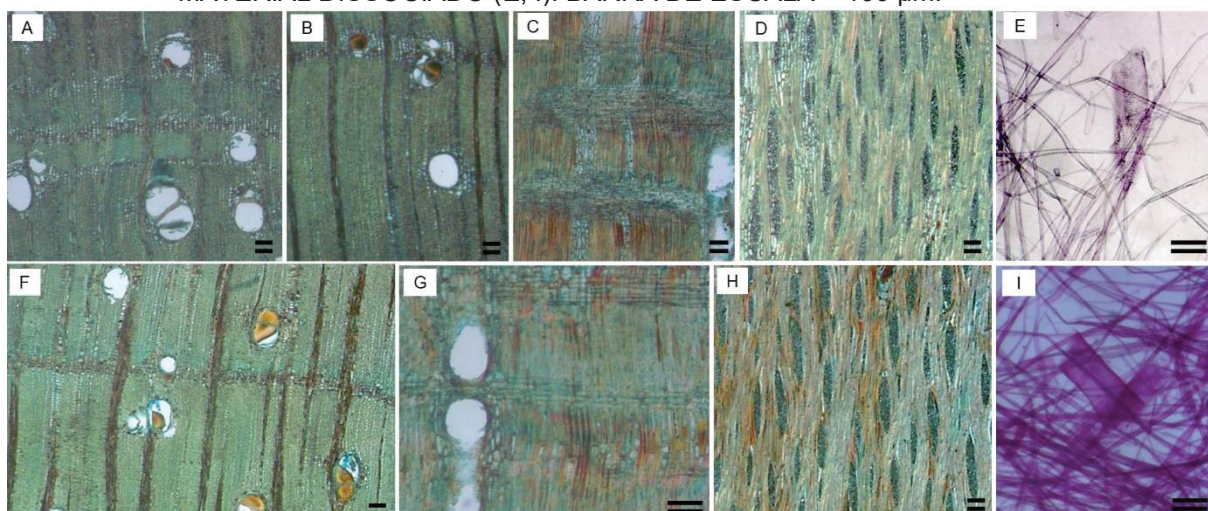
As espécies de *Hymenaea courbaril* apresentaram características macroscópicas iguais, embora sendo de procedências diferentes (TABELA 2.1). Cerne e alburno distintos pela cor, cerne marrom-avermelhado, alburno variando de branco-rosado ao acinzentado. Cheiro e gosto imperceptíveis; grã irregular; textura média a grossa; superfície radial muito lustrosa. Parênquima axial: visíveis a olho nu;

raios: visíveis a olho nu, na superfície transversal e tangencial; vasos: visíveis a olho nu, médios; anéis de crescimento: distintos, individualizados por parênquima marginal.

Da mesma forma, as características microscópicas também apresentaram similaridade, com pequenas variações principalmente em número de células. As duas espécies de procedências diferentes apresentaram anéis de crescimento distintos pelo parênquima marginal; vasos com porosidade difusa, obstruídos por óleo resina, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; raios homogêneos, com células procumbentes marginais diferentes do corpo do raio; não estratificados; fibras com paredes grossas, não septadas.

Hymenaea courbaril -1210 (FIGURA 2.4 A-E) possui vasos solitários e múltiplos radiais de 2-3, eventualmente 4; parênquima axial marginal com 3-10 células de altura, unilateral, aliforme losangular, eventualmente confluyente; raios multisseriados de 2-4; cristais prismáticos presentes nas células do parênquima axial. Por outro lado, *H. courbaril* -1339 (FIGURA 2.4 F-I) apresenta vasos solitários e múltiplos radiais de 2-3; parênquima axial marginal com 3-5 células de altura, unilateral, aliforme losangular, eventualmente confluyente; raios multisseriados de 2-6; cristais prismáticos presentes nas células de parênquima axial e radial.

FIGURA 2.4 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Hymenaea courbaril* 1210 (A-E) E 1339 (F-I). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, B, F), SEÇÃO RADIAL (C, G), SEÇÃO TANGENCIAL (D, H) E MATERIAL DISSOCIADO (E, I). BARRA DE ESCALA = 100 µm.



FONTE: A autora (2022).

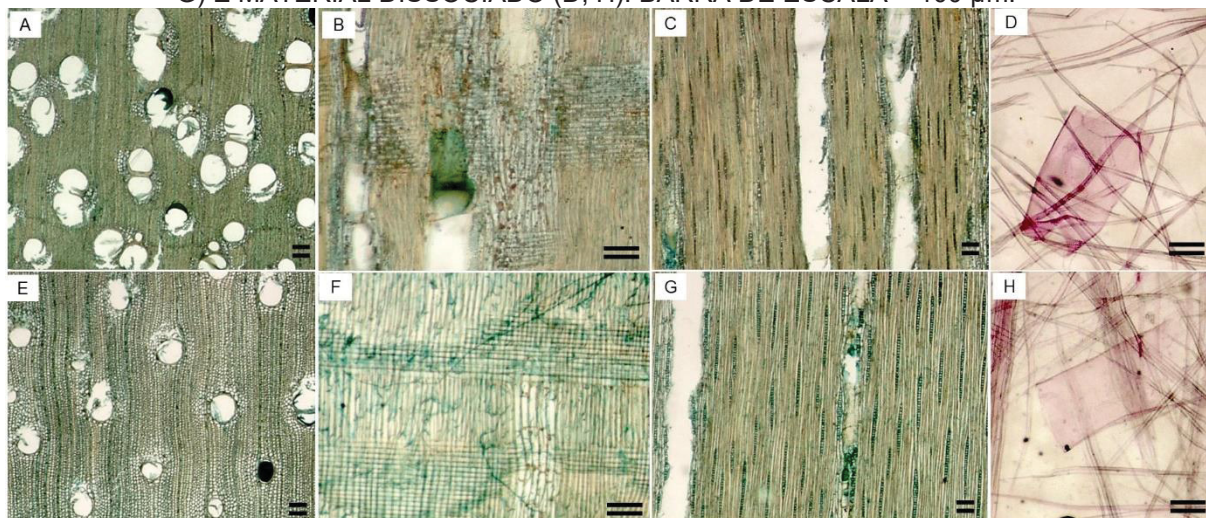
2.3.1.4 Timborana (141) versus Timborana (664)

As características macroscópicas das amostras de madeira de *Pseudopiptadenia suaveolens*-141 e *P. suaveolens*-664, foram semelhantes em quase todos os caracteres macroscópicos. *P. suaveolens*-141, apresentou cerne e alburno distintos pela cor, cerne marrom- avermelhado, alburno variando de marrom-claro a rosado-claro; cheiro e gosto imperceptíveis; grã irregular; textura média. Ao passo que, *P. suaveolens*-664 exibiu cerne e alburno indistintos e quando distinto pela cor, cerne marrom-rosado; cheiro e gosto imperceptíveis; grã irregular; textura média. Anéis de crescimento distintos, individualizados por zonas fibrosas tangenciais escuras. Vasos visíveis a olho nú, médios predominantemente solitários. Parênquima axial visíveis apenas com lente 10x, escasso, vasicêntrico e unilateral. Raios visíveis apenas com lente 10x nas duas superfícies.

As amostras também apresentaram uniformidade nas características microscópicas da madeira. As madeiras apresentam anéis de crescimento distintos pelo espessamento da parede das fibras; vasos com porosidade difusa, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternas; raios homogêneos, não estratificados; fibras com paredes médias a grossas, não septadas; cristais em série presentes nas células de parênquima axial e radial.

Pseudopiptadenia suaveolens-141 (FIGURA 2.5 A-D) possui vasos solitários e múltiplos radiais de 2-3 e 7 com pouca frequência, obstruídos por tilos; parênquima axial escasso, vasicêntrico/unilateral, aliforme losangular de aletas curtas, eventualmente confluyente; raios unisseriados em maioria, trisseriados e bisseriados presentes; *P. suaveolens*-664 (FIGURA 2.5 E-H) apresenta vasos solitários e múltiplos radiais de 2-3; parênquima axial escasso, vasicêntrico/unilateral, aliforme losangular, eventualmente confluyente; raios unisseriados em maioria, bisseriados presentes.

FIGURA 2.5 - IMAGENS MICROSCÓPICAS DE *Pseudopiptadenia suaveolens* - 141 (A-D) E - 664 (E-H). SEÇÃO TRANSVERSAL (A, E), SEÇÃO RADIAL (B, F), SEÇÃO TANGENCIAL (C, G) E MATERIAL DISSOCIADO (D, H). BARRA DE ESCALA = 100 μ m.



FONTE: A autora (2022).

Todas as amostras de madeiras analisadas apresentaram porosidade difusa, placa perfuração simples e pontoações intervasculares alternas, o que está de acordo com a literatura. As madeiras das espécies pertencentes a família Fabaceae em geral exibem vasos com porosidade difusa, placa de perfuração simples, parênquima axial paratraqueal, raios homogêneos e/ou heterogêneos e fibras moderadamente abundantes (BAAS et al., 2000; WHEELER et al., 2007; PAULA; ALVES, 2007). Nesse sentido, Hoadley (1990) ressalta que, as madeiras de espécies tropicais são muito semelhantes no que tange às características anatômicas macroscópicas e microscópicas. Dentre os caracteres mais comuns estão, as semelhanças de parênquima axial paratraqueal, porosidade difusa e textura média a grossa.

Neste estudo observou-se a ocorrência de anéis de crescimento distintos, para as espécies de *Enterolobium maximum*, *Hymenaea courbaril* e *Pseudopiptadenia suaveolens*, e pouco distintos ou indistintos para *Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx odorata* e *Ormosia* sp. Em relação a isso, Burger e Richter (1991) relatam que, em muitas espécies tropicais os anéis de crescimento correspondem a períodos de chuva e seca. Alves e Angyalossy-Alfonso (2000) afirmam que, este parâmetro não deve ser usado como critério de separação entre espécies, uma vez que sofre bastante influência do ambiente. Callado et al. (2013) ratificaram a assertiva de Alves e Angyalossy-Alfonso (2000), ao afirmarem que a sazonalidade é um fator que tem uma influência direta no desenvolvimento das espécies e consequentemente

na marcação dos anéis de crescimento, principalmente no que tange, as espécies tropicais, nas quais, as estações do ano não são bem definidas.

Dentre as seis amostras de madeira da família Fabaceae, somente a espécie *E. maximum* (fava tamboril) apresentou fibras do tipo septadas. De acordo com Wheeler et al. (2007), espécies com fibras septadas são mais comuns em regiões tropicais, principalmente no Hemisfério Sul do que no Hemisfério Norte. Alves e Angyalossy-Alfonso (2002) pesquisando várias espécies arbóreas brasileiras no total de 491, relataram que 56% das amostras de madeiras com fibras septadas eram provenientes das regiões Norte e Nordeste do Brasil.

A maioria das espécies da família Fabaceae neste estudo apresentou parênquima axial paratraqueal, aliforme confluyente, losangular e/ou marginal e unilateral. Espécies de latitudes tropicais são caracterizadas por apresentar maior abundância de parênquima axial paratraqueal, comparada com espécies de clima temperado que em geral, apresentam parênquima do tipo escasso. No entanto, há dificuldade em avaliar as vantagens ou desvantagens funcionais de diferentes padrões de distribuição do parênquima axial em vários ecossistemas (BAAS, 1982).

2.3.2 Análise de Componente Principal

Para verificar a influência de cada característica anatômica na discriminação das espécies foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA). Na (FIGURA 2.6) é apresentado o gráfico biplot e barras com contribuições das variáveis em cada componente principal. O número de componentes a reter é dois, pois apresentaram autovalores (λ_i) maiores do que 1. As duas primeiras dimensões guardaram uma significativa percentagem (65%) da variância total dos dados originais. A primeira componente principal (PC-1) e a segunda componente principal (PC-2) explicaram, respectivamente, 35,2% e 29,8% da variabilidade total. Portanto, a inferência sobre padrões aparentes a partir das duas primeiras componentes principais é considerada confiável, sendo as demais dimensões menos informativas.

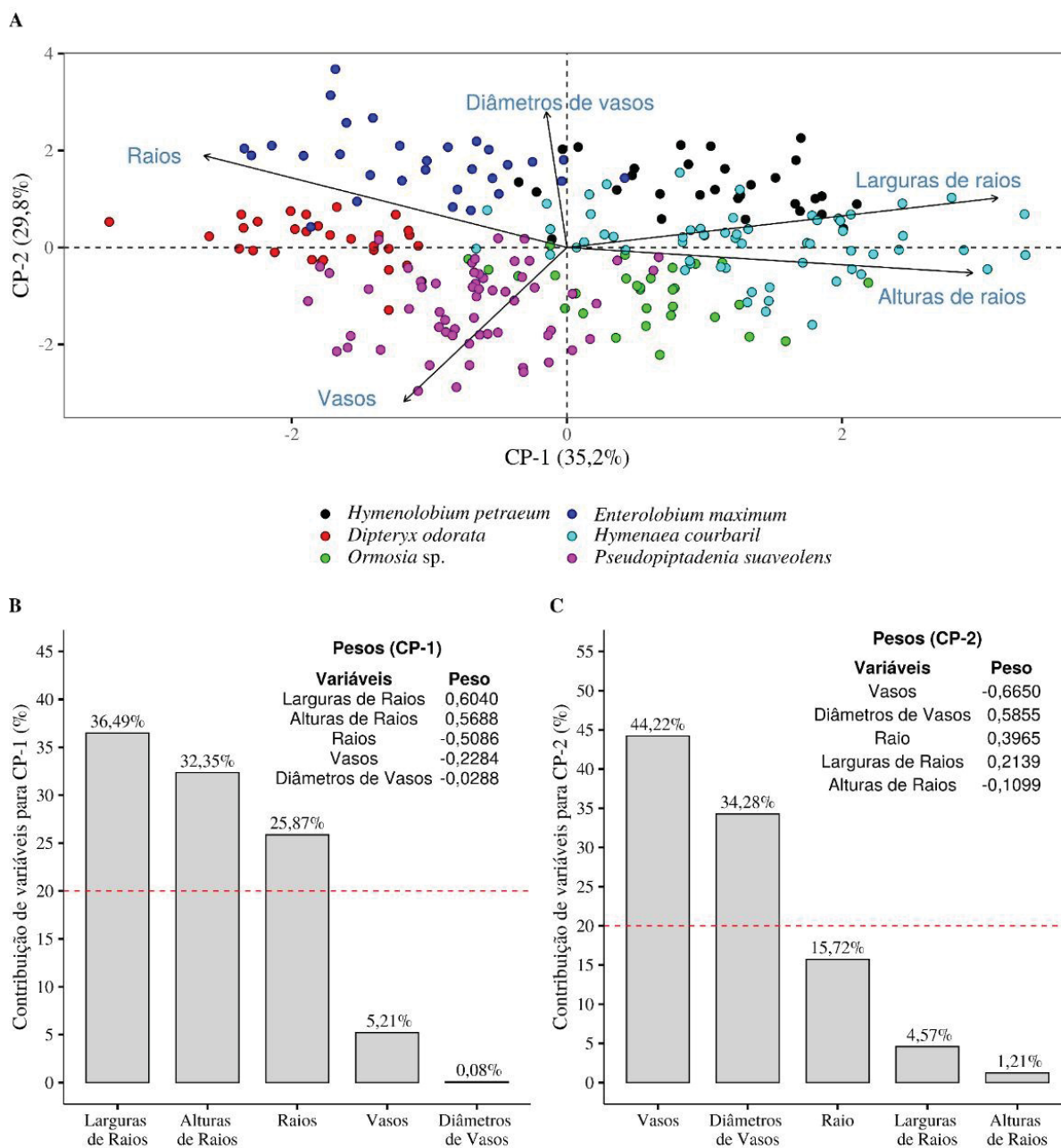
Em geral, as características relacionadas aos raios mostraram maior influência na PC-1, enquanto as características de vasos apresentaram maior influência na PC-2. Assim, os parâmetros que tiveram maior influência na PC-1 foram largura (36,49%) e altura (32,35%) de raios e frequência de raios (25,87%), e na PC-2 foram a frequência de vasos por milímetro quadrado (44,22%) e diâmetro dos vasos

(34,28%). Tanto para PC-1 quanto para PC-2 o parâmetro com maior influência foi um parâmetro derivado dos demais fatores.

Por meio do biplot (FIGURA 2.6A) é possível compreender como as amostras de madeira se relacionam em função das características anatômicas. Em geral, *Dipteryx odorata* e *Hymenaea courbaril* mostraram tendência de separação em relação à frequência de raios. *Enterolobium maximum* e *Pseudopiptadenia suaveolens* apresentaram contraposição para a frequência de vasos por mm².

As amostras de madeira de *Ormosia* sp. foram caracterizadas por altos valores para as variáveis altura e largura de raios, e baixos valores, sobretudo, para quantidade de vasos por mm². Em contraposição, as amostras de *D. odorata* mostraram tendência de compartilhar altos valores para frequência de raios, e baixos para larguras de raios. As amostras de *P. suaveolens* compartilharam altos valores para quantidade de vasos por mm² e baixos para largura de raios. Esta característica mostrou bom potencial de distinção da espécie em relação às demais espécies.

FIGURA 2.6 - A) GRÁFICO BIPLLOT DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS DA MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE; B) E C) CONTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS VARIÁVEIS E PESOS PARA CADA COMPONENTE.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: raio = raios por milímetro; altura do raio (μm); largura do raio (μm); vasos = vasos por milímetro quadrado; diâmetro do vaso (μm).

2.3.3 Colorimetria – espectroscopia no visível

2.3.3.1 Análises de Dois Fatores

O teste Snedecor F de ANOVA ($\alpha = 0,05$) indicou que as interações entre espécies e seções anatômicas foram altamente significativas para todos os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h), demonstrando que os fatores não agem independentemente, ou seja, pelo menos um nível do fator “espécie” tem comportamento diferente em um nível do fator “seção anatômica” e vice-versa. Os detalhes das interações “espécie versus seção anatômica” para cada parâmetro colorimétrico são relatados no Quadro 2.4.

A cor da madeira é influenciada por uma grande variedade de fatores, como degradação natural e tratamento térmico (CADEMARTORI et al., 2013), idade da árvore, composição química, origem da amostra, fatores genéticos (SILVA et al., 2017) e densidade da madeira (SOUZA et al., 2019).

As espécies da família Fabaceae avaliadas neste estudo expressaram uma quantidade substancial de variação nos parâmetros colorimétricos (TABELA 2.5). Com base no parâmetro L^* , Camargos e González (2001) sugeriram que a classificação da madeira fosse separada em duas categorias: 1) espécies de madeira escura, com luminosidade menor ou igual a 56; e 2) madeira clara, superior a 56. Com base nessa abordagem, apenas *Pseudopiptadenia suaveolens* ($L^* = 58,88$) e *Ormosia* sp. ($L^* = 56,34$) podem ser consideradas claras, enquanto as demais espécies são escuras.

Nos Quadros 2.4 e 2.5 estão os principais resultados estatísticos da análise de desdobramento “espécies dentro de cada nível de seção anatômica da madeira” e “seção anatômica da madeira dentro de cada nível de espécie”.

QUADRO 2.4- RESULTADOS DO DESDOBRAMENTO DA ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE ESPÉCIES E SEÇÃO ANATÔMICA DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.

Seções anatômicas	Espécies					
	<i>Hymenolobium petraeum</i>	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Ormosia</i> sp.	<i>Enterolobium maximum.</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>
Parâmetro L*						
R	52,62cdA (4,49)	54,43cA (4,82)	58,20bA (4,59)	53,39cdA (3,27)	51,28dA (8,43)	63,43aA (5,06)
T	48,29cdB (4,09)	47,58dB (4,42)	56,28bAB (5,01)	49,61cdB (2,69)	50,72cA (7,30)	62,68aA (6,18)
X	44,12dC (3,43)	39,92eC (4,17)	54,57aB (5,38)	47,91cB (2,47)	42,31deB (7,64)	50,54bB (6,51)
Média	48,34	47,31	56,34	50,30	48,10	58,88
Parâmetro a*						
R	14,24aB (1,13)	11,14dB (1,44)	11,69cdA (2,72)	11,97cdA (1,19)	12,65bcA (2,87)	13,28abA (2,51)
T	15,73aA (1,11)	13,24bA (1,41)	12,44bcA (3,03)	12,10cA (1,09)	12,87bcA (2,65)	13,42bB (2,80)
X	11,82bC (0,97)	10,16cdC (0,99)	9,28dB (2,46)	10,51cB (0,94)	9,93cdB (2,04)	13,31aA (3,60)
Média	13,93	11,51	11,12	11,53	11,82	13,34
Parâmetro b*						
R	22,30bA (1,95)	19,07dA (1,90)	18,75dA (5,10)	20,39cA (1,18)	20,45cA (2,72)	26,10aA (1,56)
T	21,68bA (2,58)	17,79dB (2,54)	19,07cA (5,36)	18,77cdB (0,96)	20,54bA (2,20)	25,78aA (1,46)
X	16,34cB (2,20)	13,04eC (2,63)	14,98dB (5,47)	17,57bC (1,15)	14,72dB (4,40)	20,05aB (1,54)
Média	20,11	16,63	17,58	18,91	18,57	23,97
Parâmetro C*						
R	26,50bA (1,61)	22,16dA (1,47)	22,11dA (5,72)	23,65cA (1,47)	24,20cA (2,90)	29,35aA (2,19)
T	26,84bA (2,27)	22,25dA (2,30)	22,79dA (6,10)	22,34dB (1,32)	24,35cA (2,53)	29,15aA (2,15)
X	20,2bB (2,10)	16,59cB (2,45)	17,66cB (5,88)	20,49bC (1,29)	17,89cB (4,34)	24,28aB (2,16)
Média	24,51	20,33	20,83	22,16	22,15	27,60
Parâmetro h						
R	57,32cA (3,43)	59,57bA (4,87)	57,57bcA (2,53)	59,62bA (1,93)	58,40bcA (6,80)	63,20aA (3,91)
T	53,84cB (3,46)	53,06cB (4,64)	56,39bB (2,40)	57,23bB (1,58)	58,14bA (5,84)	62,70aA (4,56)
X	53,89cB (3,35)	51,53dB (4,87)	56,85bB (4,50)	59,11aAB (2,03)	54,79bcB (7,73)	56,87bB (7,80)
Média	55,02	54,72	56,94	58,66	57,11	60,92

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A tabela mostra os valores médios e respectivos desvios padrão (entre parênteses). Onde: As letras minúsculas comparam os parâmetros colorimétricos médios em cada linha, entre as espécies e para cada seção anatômica. As letras maiúsculas comparam os parâmetros colorimétricos médios em colunas, entre as seções anatômicas de cada espécie. Média = média de cada parâmetro colorimétrico. Teste de Tukey em $\alpha = 0,05$. R = radial, T = tangencial, X = transversal, L* = luminosidade; a* = coordenada cromática verde-vermelha, b* = coordenada cromática azul-amarela, C* = croma ou saturação, h = ângulo de matiz.

QUADRO 2.5- INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PRINCIPAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO “ESPÉCIES DENTRO DE CADA NÍVEL DE SEÇÃO ANATÔMICA DA MADEIRA”.

Parâmetros Colorimétricos	Análise do desdobramento
L*	a) Nas seções anatômicas radial e tangencial, a espécie <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentou média significativamente maior em comparação com as demais espécies; b) Na seção anatômica radial, as menores médias estatisticamente semelhantes foram apresentadas pelas espécies <i>Hymenaea courbaril</i>, <i>Enterolobium maximum</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i>; c) Na seção anatômica tangencial as menores médias apresentadas são das espécies <i>Dipteryx odorata</i>, <i>E. maximum</i> e <i>H. petraeum</i>; e d) Na seção anatômica transversal a espécie que apresentou maior média foi <i>Ormosia</i> sp., e as espécies <i>H. courbaril</i> e <i>D. odorata</i> mostraram as menores médias
a*	a) Na seção anatômica radial as espécies <i>Hymenolobium petraeum</i> e <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentaram médias estatisticamente maiores, as menores médias foram apresentadas pelas espécies <i>Dipteryx odorata</i>, <i>Ormosia</i> sp. e <i>Enterolobium maximum</i>; b) Na seção anatômica tangencial, a espécie <i>Hymenolobium petraeum</i> apresentou média estatisticamente maior que as demais espécies. As espécies <i>E. maximum</i>, <i>Hymenaea courbaril</i> e <i>Ormosia</i> sp. apresentaram as menores médias; c) Na seção anatômica transversal, a espécie <i>P. suaveolens</i> apresentou média estatisticamente maior que as demais espécies. As espécies <i>Ormosia</i> sp., <i>D. odorata</i> e <i>Hymenaea courbaril</i> apresentaram as menores médias.
b*	a) A espécie <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentou média estatisticamente maior para todas as seções da madeira e <i>Dipteryx odorata</i> as menores médias. b) Na seção anatômica radial, as espécies <i>D. odorata</i> e <i>Ormosia</i> sp. apresentaram médias estatisticamente menores e iguais entre si; c) Na seção anatômica tangencial, as espécies <i>D. odorata</i> e <i>Enterolobium maximum</i> apresentaram médias estatisticamente menores e iguais entre si; d) Na seção anatômica transversal, a espécie <i>D. odorata</i> apresentou a menor média.
c*	a) A espécie <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentou média estatisticamente maior para todas as seções da madeira; b) Na seção anatômica radial, as espécies <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Ormosia</i> sp. apresentaram as menores médias; c) Na seção anatômica tangencial, as espécies <i>Ormosia</i> sp., <i>Enterolobium maximum</i> e <i>D. odorata</i> apresentaram as menores médias; d) Na seção anatômica transversal, as espécies <i>Hymenaea courbaril</i>, <i>Ormosia</i> sp. e <i>D. odorata</i> apresentaram as menores médias.
h	a) Na seção anatômica radial e tangencial a espécie <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentou média estatisticamente maior que as demais; b) As espécies <i>Hymenolobium petraeum</i>, <i>Hymenaea courbaril</i> e <i>Ormosia</i> sp. apresentam médias estatisticamente semelhantes e menores para a seção radial; c) Na seção anatômica tangencial, as espécies <i>Hymenolobium petraeum</i> e <i>Dipteryx odorata</i> apresentaram médias estatisticamente menores; d) Na seção anatômica transversal, a espécie <i>D. odorata</i> apresentou a menor média.

FONTE: A autora (2022).

QUADRO 2.6- INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PRINCIPAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESDOBRAMENTO “SEÇÃO ANATÔMICA DA MADEIRA DENTRO DE CADA NÍVEL DE ESPÉCIE”.

Parâmetros Colorimétricos	Análise do desdobramento
L*	a) As médias das espécies <i>Dipteryx odorata</i> , <i>Enterolobium maximum</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i> foram significativamente maiores na seção radial; b) As médias das espécies <i>Hymenaea courbaril</i> , <i>Ormosia</i> sp. e <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> foram significativamente menores na seção transversal.
a*	a) As médias das espécies <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i> foram significativamente maiores na seção tangencial; b) As médias das espécies <i>Enterolobium maximum</i> , <i>Hymenaea courbaril</i> e <i>Ormosia</i> sp. foram significativamente menores na seção transversal. c) <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> não apresentou diferença estatística entre os níveis de seção anatômica.
b*	a) As espécies <i>Dipteryx odorata</i> , <i>Enterolobium maximum</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i> apresentaram médias significativamente maiores na seção radial; b) Na seção anatômica transversal foram encontradas as menores médias para <i>Hymenaea courbaril</i> , <i>Ormosia</i> sp. e <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> .
C*	a) A média da espécie <i>Enterolobium maximum</i> foi significativamente maior na seção radial; b) <i>Dipteryx odorata</i> , <i>Hymenaea courbaril</i> , <i>Hymenolobium petraeum</i> , <i>Ormosia</i> sp. e <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> apresentaram médias menores na seção transversal.
h	a) As médias das espécies <i>Dipteryx odorata</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i> foram significativamente maiores na seção radial; b) <i>Enterolobium maximum</i> , <i>Hymenaea courbaril</i> e <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> possuem médias menores na seção transversal; c) <i>Ormosia</i> sp. não apresentou diferença estatística entre os níveis de seção anatômica da madeira.

FONTE: A autora (2022).

Em geral, os cortes radiais apresentam maior luminosidade que pode ser atribuída às características anatômicas, visto que essa superfície revela grande exposição de parênquima (SILVA et al., 2015). Neste estudo, essa característica foi observada para *Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx odorata*, *Ormosia* sp. e *Enterolobium maximum*.

Houve pouca variação na cor entre as seções anatômicas em todas as espécies de Fabaceae estudadas em comparação com a tabela de cores de madeira publicada por Camargos e Gonzalez (2001). *Hymenolobium petraeum* é classificado como marrom (seção transversal) a marrom avermelhado (seções radiais e tangenciais), *Dipteryx odorata* como claro (seções radiais e tangenciais) ou marrom escuro (seções transversal e tangencial), *Ormosia* sp. como oliva (seção transversal) a marrom claro (seções radiais e tangenciais), *Enterolobium maximum* como marrom claro, *Hymenaea courbaril* como marrom escuro (seção transversal) a marrom

avermelhado (seções radial e tangencial), e *Pseudopiptadenia suaveolens* como rosa (seções radial e tangencial a marrom claro ou marrom avermelhado (seção transversal)).

Os valores de cor obtidos neste estudo para amostras de *Hymenolobium petraeum* diferiram em todos os parâmetros das seções tangenciais daqueles relatados por Silva et al. (2017), que descreveu uma madeira de cor mais clara, bem como os dados relatados por Melo et al. (2019) nas seções radial e tangencial, principalmente para L^* , que também indicava madeira mais clara. Para a coordenada cromática a^* , os valores foram semelhantes aos obtidos por Melo et al. (2019). Comparando *H. petraeum* com outras espécies do grupo “angelim”, *H. modestum* Ducke apresentou maiores valores de L^* , coordenada cromática b^* , C^* e h (SOUSA et al. 2019) e *Dinizia excelsa* Ducke apresentou valores semelhantes para L^* e coordenada cromática a^* , nas seções radial e tangencial (RIBEIRO et al., 2018).

Os valores médios dos parâmetros colorimétricos de *Dipteryx odorata* obtidos neste estudo foram semelhantes aos descritos por Nishino et al. (1998) em seções radiais e tangenciais para L^* e coordenada cromática a^* , e diferentes dos relatados por Silva et al. (2017), Ribeiro et al. (2018), Melo et al. (2019) e Sousa et al. (2019), todos os quais descreveram maior claridade (L^*) e menor a^* .

Os valores médios para *Ormosia* sp. encontrados neste estudo foram comparáveis aos dos cortes radiais em L^* , coordenada cromática a^* , valores de C^* e h , e dos cortes tangenciais em todos os parâmetros de cor, com os obtidos por Nishino et al. (1998). Da mesma forma, os parâmetros colorimétricos obtidos para *Enterolobium maximum* no presente estudo são equivalentes aos de *E. oldemannii* Barneby et Grimes e *E. schomburgkii* Benth. descrito por Nishino et al. (1998), principalmente L^* e as coordenadas cromáticas a^* e b^* .

Os valores obtidos para *Hymenaea courbaril* foram semelhantes aos relatados por Nishino et al. (1998) nas seções radial (L^* , b^* , C^* , h) e tangencial (b , h), bem como todos os parâmetros colorimétricos descritos por Silva et al. (2017) e valores para L^* , coordenada cromática a^* e h em seções radiais e tangenciais de madeira do estado de Mato Grosso avaliados por Ribeiro et al. (2018). A claridade do *H. courbaril* neste estudo foi inferior à descrita por Melo et al. (2019) em madeira de Mato Grosso e Sousa et al. (2019) em madeira comercializada na região sudeste do Pará. A coordenada cromática a^* foi maior, a coordenada cromática b^* , C^* e h foram menores do que o relatado por Sousa et al. (2019) em seções radiais e tangenciais. Mesmo na

avaliação de indivíduos pertencentes à mesma espécie, alterações nos parâmetros colorimétricos são comuns, devido ao crescimento da árvore em diferentes locais e solos (NELSON et al., 1969) e a posição em que as amostras foram retiradas do tronco (VIEIRA et al., 2019).

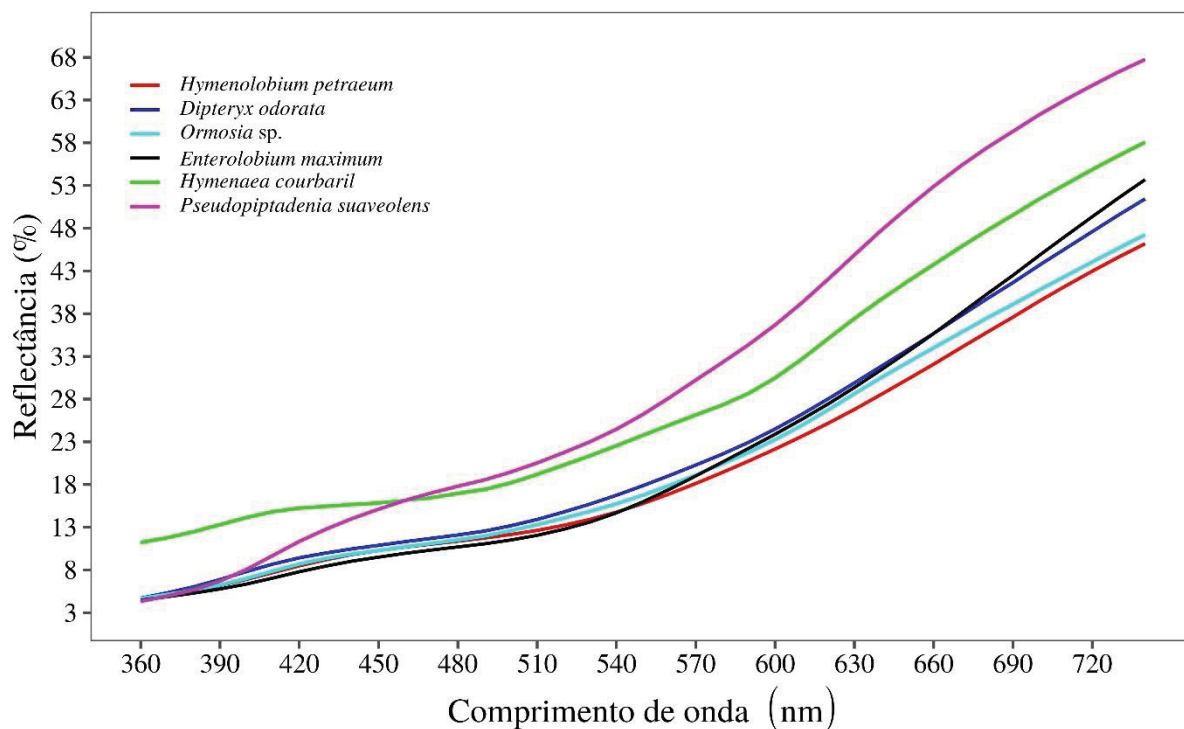
Os resultados para *Pseudopiptadenia suaveolens* neste estudo foram semelhantes aos descritos por Nishino et al. (1998) apenas na coordenada cromática a^* nas seções radiais e C^* nas seções tangenciais. Da mesma forma, os valores médios de *P. psilostachya* (DC.) GP Lewis & MP Lima nas seções radial (todos os parâmetros colorimétricos) e tangencial (a^* , b^* , C^*) encontrados por esses autores foram comparáveis aos obtidos para *P. suaveolens*.

2.3.3.2 Espectro de reflectância

Em termos gerais, *Pseudopiptadenia suaveolens* apresentou uma curva espectral média com maior perfil de inclinação e maior taxa de reflectância na faixa de 470 a 720 nm. Nesse mesmo intervalo, *Ormosia* sp. também teve uma alta reflectância, mas menor do que *P. suaveolens*. As outras quatro espécies apresentaram curvas espectrais com padrões semelhantes, dificultando a distinção das informações espectrais (FIGURA 2.7).

Em relação aos espectros de reflectância (FIGURA 2.7), todas as espécies de madeira tiveram fraca influência das tonalidades vermelho e amarelo, e algumas delas entre verde e vermelho. Amostras de *P. suaveolens* e *Ormosia* sp. tiveram maior reflectância na faixa de 450-720nm, com forte influência do vermelho. Comportamento semelhante foi observado por Vieira et al. (2019) em três espécies remanescente da Mata Atlântica, *Campomanesia xanthocarpa* Berg, *Myrcia retorta* Cambess. e *Plinia peruviana* (Poir.) Govaerts, também com influências de vermelho.

FIGURA 2.7 - ESPECTROS MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA NO VISÍVEL DE AMOSTRAS DE MADEIRA DA FAMÍLIA FABACEAE, COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.



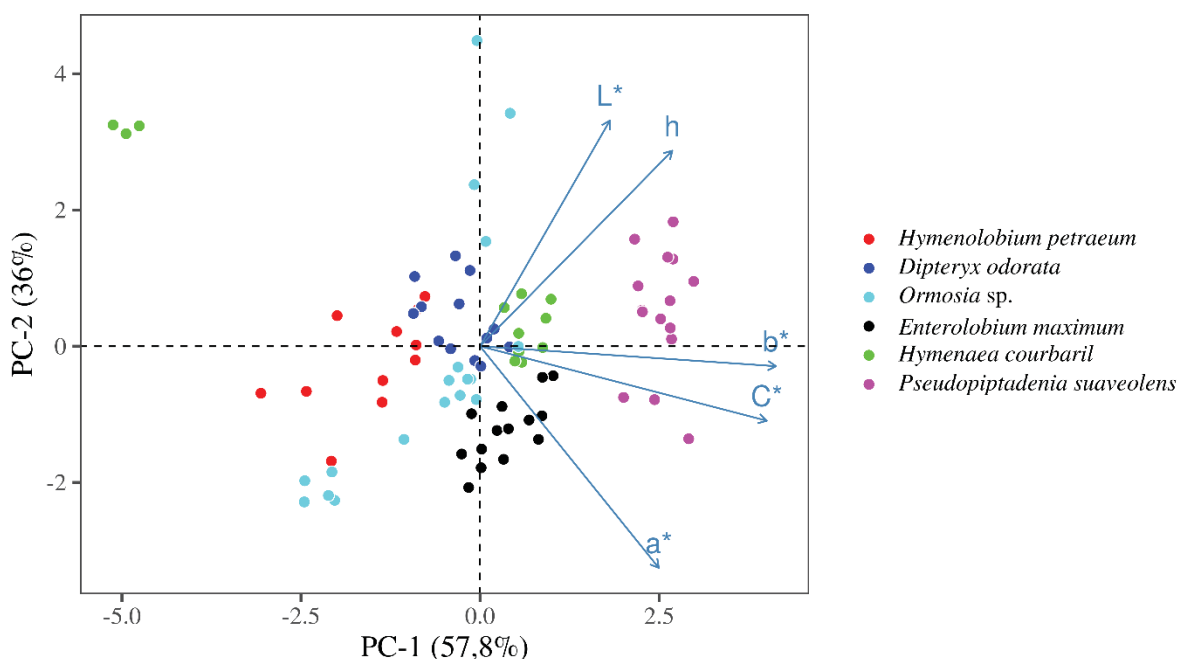
FONTE: A autora (2022).

2.3.3.3 Análise do componente principal

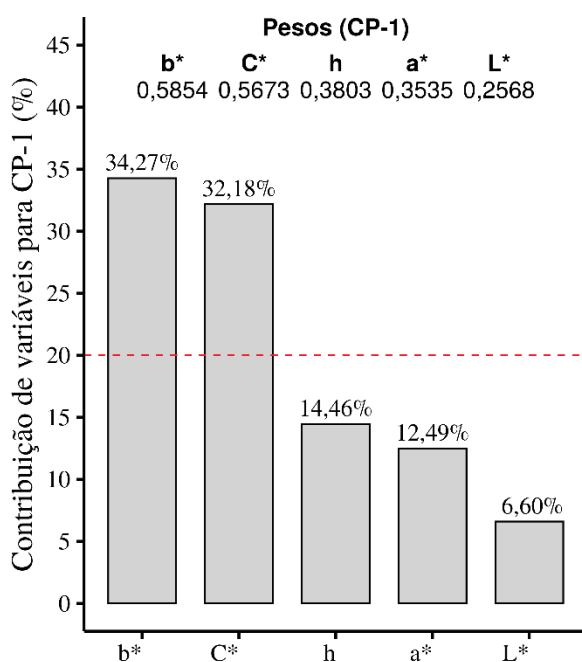
Os dois primeiros componentes principais do PCA descreveram 92,90% da variância total dos dados brutos (FIGURA 2.8). Portanto, as espécies que estão visualmente próximas umas das outras no biplot representam observações com semelhanças nos parâmetros colorimétricos (FIGURA 2.8A). As diferenças nos dados de cor entre algumas espécies foram baixas, de modo que os grupos de amostra apresentaram tendências próximas uns dos outros, mas pequena variação foi verificada pelo PCA e pode ser usada para indicar a distinção de algumas espécies.

FIGURA 2.8 - GRÁFICO BIPLLOT E CONTRIBUIÇÃO (EM PORCENTAGEM) E CARGAS (B, C) DOS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS PARA CADA COMPONENTE PRINCIPAL.

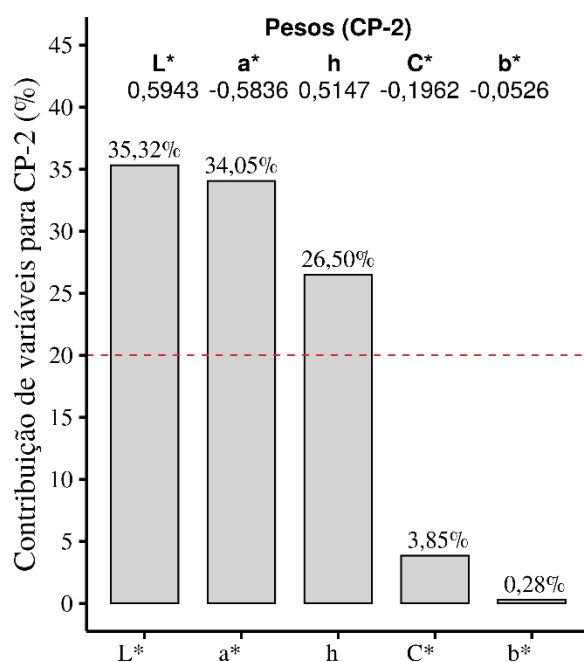
(A)



(B)



(C)



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Linha pontilhada vermelha: indica a quantidade de variação que cada parâmetro contribuiria, se todos apresentassem a mesma proporção de contribuição no PC.

Em geral, *Hymenaea courbaril*, *Dipteryx odorata* e *Enterolobium maximum* apresentaram valores baixos, principalmente L* e h. *Pseudopiptadenia suaveolens* apresentou valores moderados para os parâmetros b*, C* e h. Em contraste, os

parâmetros L^* , b^* , C^* e h foram baixos para *Hymenolobium petraeum* e *Ormosia* sp. A espécie *P. suaveolens* apresentou parâmetros b^* , C^* e h relativamente elevados, o que permitiu melhor diferenciação em relação às demais espécies.

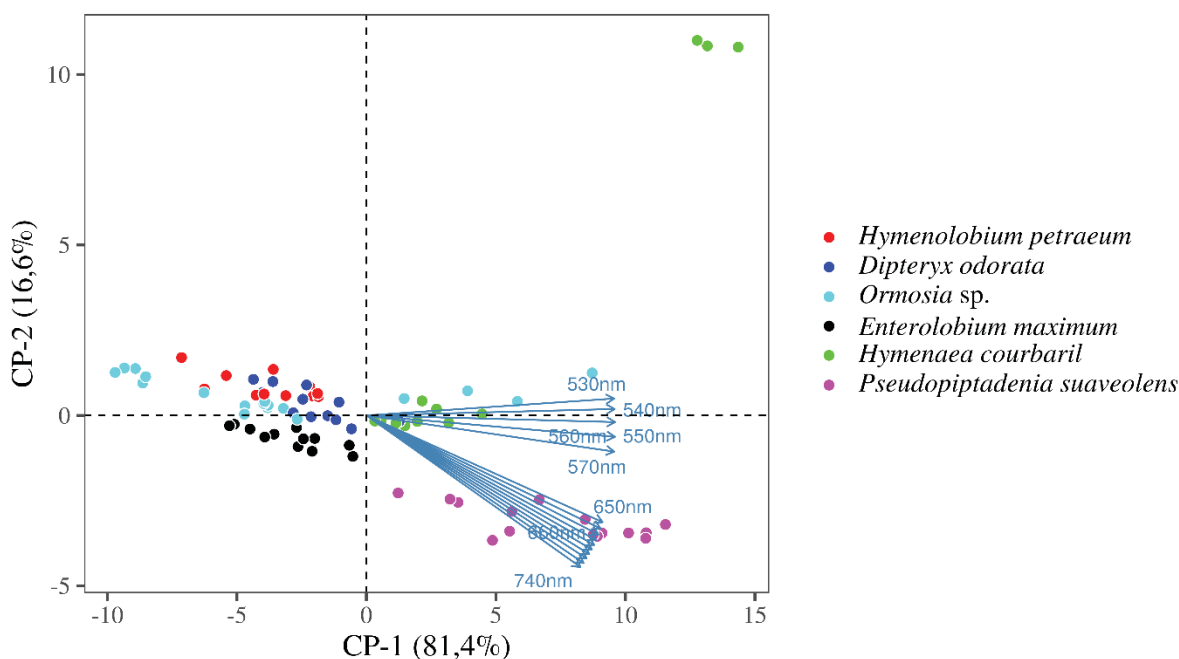
De maneira geral, por meio dos resultados da PCA (FIGURA 2.8) é possível visualizar o agrupamento de amostras de uma mesma espécie, ou seja, com padrão de cor semelhante. Os resultados deste estudo revelam a importância da aplicação dos dados C^* e h (calculados com base em a^* e b^*) para a caracterização das espécies. Um estudo adicional mostrou que em quatro espécies de *Myrtaceae*, o valor b^* foi mais importante para a diferenciação (VIEIRA et al. 2019). Os resultados deste estudo revelaram que o padrão colorimétrico obtido por PCA pode ser útil para o reconhecimento de espécies de madeira a partir de informações produzidas pelo método CIELAB.

O biplot para o PCA construído usando espectros de reflectância pode ser visto na Figura 2.9. Para fazer inferências, dois componentes principais foram aplicados porque eles tinham valores próprios (λ_i) maiores que um. O PC-1 representou 81% e o PC-2 16,5% da variação total dos dados padronizados, fazendo com que o percentual acumulado da variância explicada pelos dois primeiros componentes principais fosse 97,5%. Amostras de *Dipteryx odorata*, *Enterolobium maximum*, *Hymenolobium petraeum* e *Hymenaea courbaril* estavam espacialmente mais próximas e tinham valores de espectros de reflectância igualmente baixos na faixa de 540 a 670 nm. As amostras de *P. suaveolens* foram melhores separadas em relação às outras espécies, e *Ormosia* sp. exibiu uma ligeira tendência de distinção. Para as outras espécies, os espectros colorimétricos mostraram fortes semelhanças.

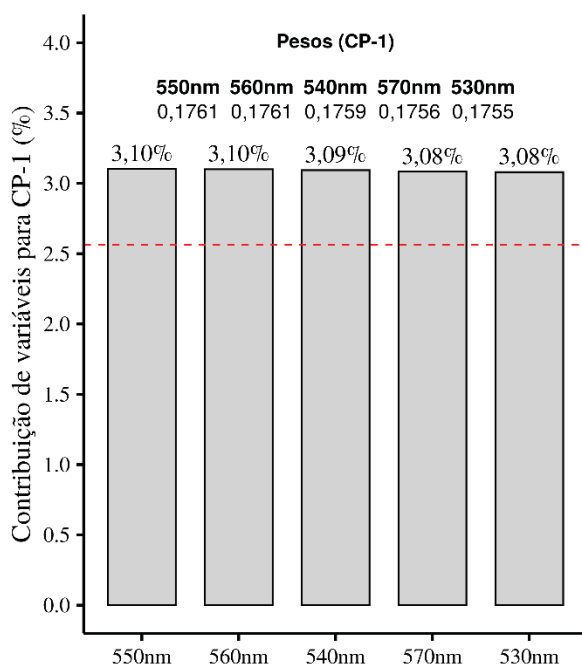
Porém, a análise de PCA de espectros brutos do visível mostrou que as amostras de *Pseudopiptadenia suaveolens* foram facilmente distinguíveis, sendo caracterizadas por apresentarem valores elevados para espectros localizados na faixa de 650 nm a 740 nm. Nas Figuras 2.9 B e C estão as contribuições (em porcentagem) e os carregamentos dos cinco espectros que mais colaboram nos dois primeiros PCs. Os espectros de 530 nm a 570 nm apresentaram maior contribuição para a variância explicada pelo PC-1, enquanto os espectros de 360 nm a 400 nm apresentaram maiores pesos no PC-2.

FIGURA 2.9 - GRÁFICO BIPLLOT (A) E CONTRIBUIÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA PARA OS DOIS PRIMEIROS COMPONENTES PRINCIPAIS (B, C) NO PCA DE ESPECTROS VISÍVEIS.

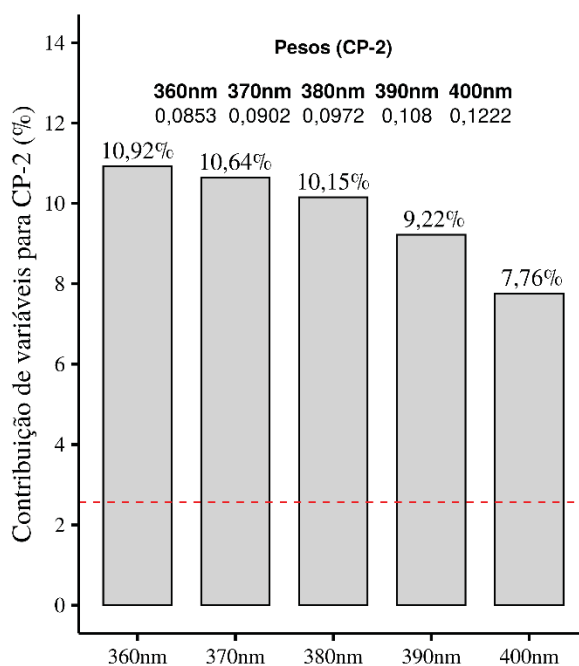
(A)



(B)



(C)



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Linha pontilhada vermelha: indica a quantidade de variação que cada parâmetro contribuiria, se todos apresentassem a mesma proporção de contribuição no PC.

2.3.4 Espectroscopia no infravermelho próximo

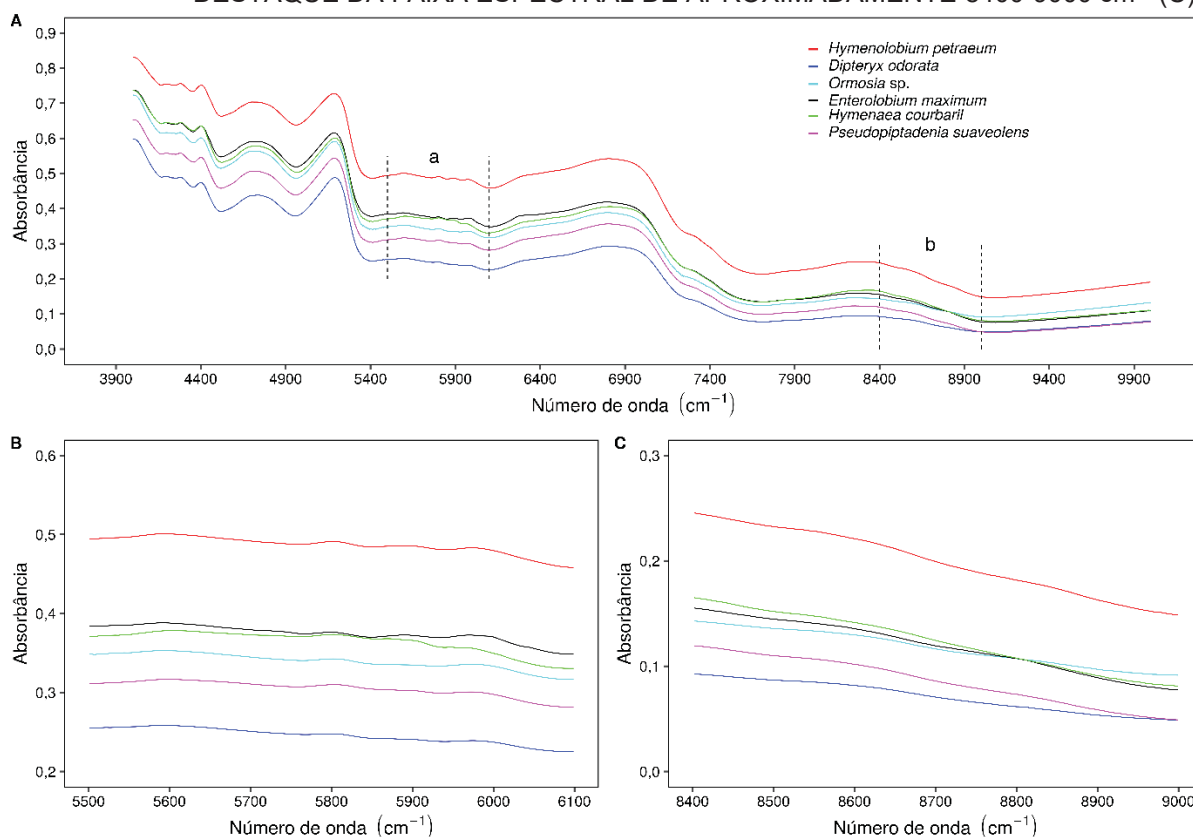
2.3.4.1 Análises dos espectros médios

Na Figura 2.10 estão os espectros médios do NIR de todas as seções de corte da madeira (faixa espectral de 4000 a 10000 cm^{-1}) para as amostras da família Fabaceae. As curvas espectrais das seis espécies florestais foram similares, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. Soares et al (2017) estudando seis espécies nativas da Amazônia Brasileira, a saber: *Carapa guianensis* Aubl., *Cedrela odorata* L., *Erismia uncinatum* Warm., *Micropholis melinoniana* Pierre, *Hymenaea courbaril* e *Swietenia macrophylla* King., também observaram um alto grau de similaridade entre as amostras, indicando a necessidade da utilização de técnicas quimiométricas para melhor discriminação das espécies.

De maneira geral, para as amostras analisadas, as bandas em que se observaram maiores diferenças foram as 5500 a 6100 cm^{-1} (FIGURA 2.10A), 8400 a 9000 cm^{-1} (FIGURA 2.10B). No intervalo compreendido entre 5500 a 6100 cm^{-1} , a *Ormosia* sp. (louro cumarú) diferenciou-se das demais. Schwanninger et al. (2011), expõem que essa região (5500 a 6100 cm^{-1}) é composta por celulose, hemicelulose, extrativos e lignina, predominando os componentes lignina e celulose.

Nas bandas de 8400 a 9000 cm^{-1} , constatou-se uma similaridade no padrão espectral entre as espécies de *Enterolobium maximum* e *Hymenaea courbaril* (fava tamboril e jatobá), porém com comportamento diferenciado em relação às demais. Corroborando com este comportamento, Muñiz et al. (2016) ao analisarem algumas espécies da família Fabaceae comercializadas como “angelim” também encontraram diferenças entre as amostras nos números de onda compreendidos entre 8099 a 8749 cm^{-1} . Destaca-se ainda que essa região é composta principalmente por celulose, lignina e hemicelulose (SCHWANNINGER et al. 2011).

FIGURA 2.10 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE TODAS AS SEÇÕES DE CORTE DA MADEIRA (A); DESTAQUE DA FAIXA ESPECTRAL DE APROXIMADAMENTE 5500-6100 cm^{-1} (B); DESTAQUE DA FAIXA ESPECTRAL DE APROXIMADAMENTE 8400-9000 cm^{-1} (C).



FONTE: A autora (2022).

2.3.4.2 Desempenho do classificador

Na Tabela 2.2 estão os melhores classificadores encontrados por meio de validação cruzada repetida (5-folds, repetida 10 vezes) em cada experimento. O algoritmo PLS-DA foi mais eficaz em aprender padrões contidos nos espectros NIR e, portanto, mostrou maior acurácia na distinção de espécies. O desempenho médio dos modelos aprendidos usando PLS-DA foi superior a 98%, em todos os experimentos, usando de 10 a 12 componentes principais.

Em geral, os classificadores PLS-DA mostraram coeficiente de variação inferior a 3% para as métricas acurácia e F1-Score, indicativo da boa estabilidade e da capacidade de generalização dos modelos aprendidos. Além disso, a acurácia (0,28%) e o F1-Score (0,23%) do classificador PLS-DA aumentaram quando usados apenas dados de espectros NIR da seção tangencial ($n_{\text{comp}} = 11$), em comparação ao modelo construído com espectros NIR de todas as seções da madeira. Tendência similar foi encontrada por Santos et al. (2021) ao empregarem o mesmo algoritmo

para discriminar espécies de “Louros”, oriundas da Amazônia brasileira, a partir de dados de espectros NIR. Resultados promissores para seção tangencial da madeira também foram encontrados por Yang et al. (2012). Os algoritmos SVM e *k*-NN mostraram melhor desempenho usando dados NIR da seção transversal.

TABELA 2.2 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES E HIPERPARÂMETROS DE AJUSTE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.

Experimento	Estatística	10x5-folds Cross-Validation							
		SVM ^a			PLS-DA		<i>k</i> -NN		
		HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia
E1	Média		82,41	82,38		98,59	98,38		82,84
	DP	C = 2048	3,12	3,14	ncomp = 12	1,11	1,32	k = 2	2,48
	Mín.	Sigma = 0,1	75,93	76,34		95,91	94,85		77,25
	Máx.		88,64	89,05		100	100		88,61
E2	Média		93,99	93,43		98,38	98,33		89,68
	DP	C = 512	3,08	3,30	ncomp = 10	1,73	1,70	k = 2	3,77
	Mín.	Sigma = 0,01	87,12	86,08		91,67	92,35		78,33
	Máx.		99,21	99,27		100	100		95,37
E3	Média		88,37	88,44		98,87	98,61		80,70
	DP	C = 512	3,77	3,89	ncomp = 11	1,15	1,45	k = 2	3,92
	Mín.	Sigma = 0,01	78,07	79,50		95,61	94,62		72,81
	Máx.		95,46	95,76		100	100		87,89
E4	Média		90,62	90,99		98,56	98,48		82,38
	DP	C = 512	3,31	2,99	ncomp = 11	2,17	2,18	k = 2	4,17
	Mín.	Sigma = 0,01	79,55	82,24		92,06	91,69		70,83
	Máx.		95,61	95,11		100	100		90,00

FONTE: A autora (2022).

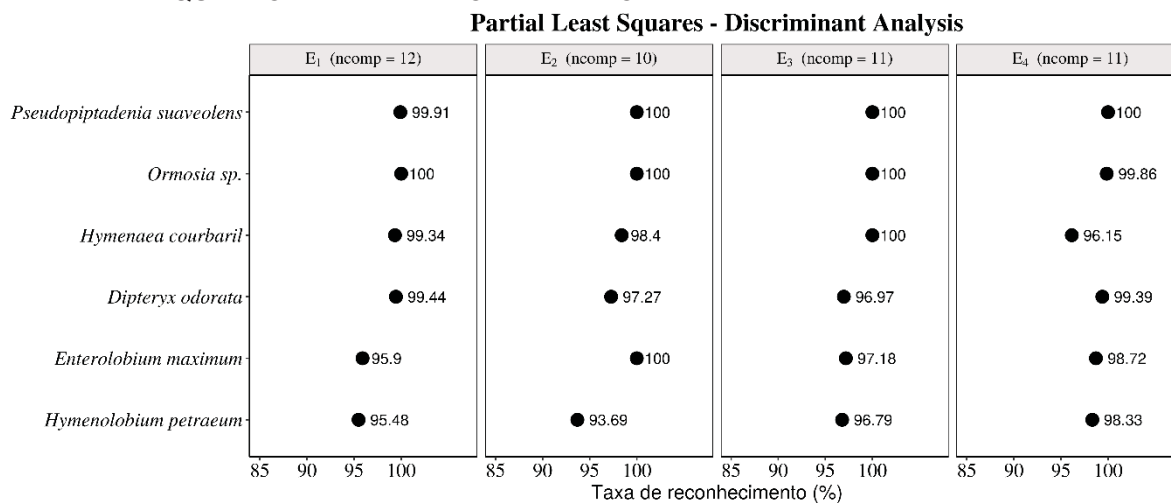
Em que: SVM = *Support Vector Machine*; PLS-DA = *Partial Least Squares Discriminant Analysis*; *k*-NN = *k-Nearest Neighbors*; HAO = Hiperparâmetro de Ajuste Ótimo; ^akernel radial. DP = desvio padrão na reamostragem. Todas as medidas estão expressas em porcentagem. E₁: classificador treinado com espectros NIR de todas as seções; E₂: classificador treinado com espectros NIR de seções transversais; E₃: classificador treinado com espectros NIR de seções tangenciais; E₄: classificador treinado com espectros NIR de seções radiais. C = custo de violação de restrições; sigma = parâmetro kernel de base radial; k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais.

O uso da tecnologia de infravermelho próximo em atividades de discriminação de espécies tem sido abordado por outros estudos (por exemplo, BRAGA et al., 2011; ESPINOZA et al., 2012; LUAN et al., 2013, YANG et al., 2015; LAZARESCU et al., 2017; RAMALHO et al., 2018, SNEL et al., 2018; PACE et al. 2019) e, em alguns casos, a sua integração com diversas técnicas de aprendizado de máquina, como *Support Vector Machine*, *Partial Least Squares Discriminant Analysis* e *k-Nearest Neighbors* (SANTOS et al., 2021).

Em particular, a integração de dados NIR e PLS-DA merece atenção, pois comumente são alcançados modelos altamente acurados. Yang et al. (2012) reportaram 100% de acurácia para discriminar *Cunninghamia lanceolata* (coníferas) e *Eucalyptus pellita* (folhosas), usando modelos PLS-DA construídos a partir de dados da faixa espectral completa (780 a 2500 nm) da seção tangencial da madeira. Yang et al. (2015) investigaram a integração de NIR e PLS-DA em duas situações: i) discriminar amostras de madeiras de três espécies (*Promelia* sp., *Instia* sp. e *Couratari* sp.); e ii) discriminar amostras de madeira oriundas de cinco regiões diferentes, para cada espécie. Na primeira situação, os autores alcançaram 100% de acurácia usando espectros NIR da seção transversal da madeira. Na segunda, apenas *Couratari* sp. não mostrou confusão na identificação do local de origem das amostras de madeira. Bergo et al. (2016) encontraram acurácia superior a 96%, para discriminar madeiras de *Swietenia macrophylla* de outras espécies com características semelhantes (*Carapa guianensis*, *Cedrela odorata* e *Micropholis melinoniana*), usando um modelo PLS-DA construído a partir de espectros NIR.

A métrica Recall (taxa de verdadeiros positivos por espécie) nas amostras de retenção da validação cruzada repetida está na (FIGURA 2.11). Quando considerados espectros NIR de seções individuais (transversal, tangencial ou radial), *Pseudopiptadenia suaveolens*, *Ormosia* sp., *Hymenaea courbaril* e *Enterolobium maximum* alcançaram taxa de reconhecimento de 100%. *Dipteryx odorata* e *Hymenolobium petraeum* apresentaram melhor discriminação quando usados espectros NIR da seção radial. Portanto, ao contrário do esperado, ajustar modelos PLS-DA usando dados de espectros NIR de todas as seções da madeira não melhorou o desempenho dos classificadores.

FIGURA 2.11 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.



Fonte: A Autora (2022)

E₁: classificador treinado com espectros NIR de todas as seções; E₂: classificador treinado com espectros NIR de seções transversais; E₃: classificador treinado com espectros NIR de seções tangenciais; E₄: classificador treinado com espectros NIR de seções radiais. ncomp = número de componentes principais.

2.3.4.3 Classificação incorreta

Na Figura 2.12 estão as Matrizes de Confusão (MC) para os classificadores PLS-DA mais acurados, em cada experimento. Cada MC reúne as predições nas amostras de retenção da validação cruzada repetida. Como já mencionado, o classificador PLS-DA construído usando somente espectros NIR da seção tangencial (E₃) da madeira mostrou menor confusão entre espécies. Por exemplo, *Enterolobium maximum* foi somente confundido com *Hymenaea courbaril*, e *Dipteryx odorata* e *Hymenolobium petraeum* apresentaram confusão entre suas amostras de madeira. Isto é, em algumas ocasiões *D. odorata* foi incorretamente classificada como *H. petraeum*, e em outras ocorreu a situação contrária. Esta confusão também ocorreu para os modelos PLS-DA dos experimentos E₂ (transversal) e E₄ (radial), porém em menor quantidade.

A confusão entre *Enterolobium maximum* e *Hymenaea courbaril* foi menor quando o classificador PLS-DA foi construído usando somente espectros NIR da seção radial (E₄). Portanto, os espectros desta seção foram mais informativos para discriminar estas espécies. Por outro lado, o classificador PLS-DA para a seção radial mostrou alta confusão entre *H. courbaril* e *Dipteryx odorata*. Enquanto, usando espectros da seção transversal o modelo apresentou alta confusão entre

Hymenolobium petraeum e *Pseudopiptadenia suaveolens*. De fato, em algumas situações, a taxa de reconhecimento diminuiu, a exemplo de *E. maximum*. Soares et al. (2017) estudaram a integração de um espectrômetro NIR portátil e PLS-DA na discriminação de seis madeira amazônicas, dentre as quais *H. courbaril*, cujo melhor classificador (treinado usando espectros de todas as seções da madeira) alcançou sensibilidade (ou Recall) de 100%. Porém, é importante destacar a ausência da espécie *E. maximum* no estudo de Soares et al. (2017).

FIGURA 2.12 - MATRIZ DE CONFUSÃO REUNINDO TODAS AS PREDIÇÕES FORA DA AMOSTRA EM VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.

Referência	E ₁ (ncomp = 12)						E ₂ (ncomp = 10)						
	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>			4		4496					1500		
	<i>Ormosia sp.</i>					2160				720			
	<i>Hymenolobium petraeum</i>	90	5		2406		19	2		787	51		
	<i>Hymenaea courbaril</i>	3	11	4649	9	7	1		18	1535	7		
	<i>Enterolobium maximum</i>		2244	92			4		780				
	<i>Dipteryx odorata</i>	1969			11			642		18			
Referência	E ₃ (ncomp = 11)						E ₄ (ncomp = 11)						
	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>					1500					1500		
	<i>Ormosia sp.</i>					720			1	719			
	<i>Hymenolobium petraeum</i>	16			813		11	10		826	4		
	<i>Hymenaea courbaril</i>			1560				60		1500			
	<i>Enterolobium maximum</i>		758	22					770	1	9		
	<i>Dipteryx odorata</i>	640			20			656		4			
Predito						Predito							
	<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Enterolobium maximum</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>	<i>Hymenolobium petraeum</i>	<i>Ormosia sp.</i>	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>		<i>Dipteryx odorata</i>	<i>Enterolobium maximum</i>	<i>Hymenaea courbaril</i>	<i>Hymenolobium petraeum</i>	<i>Ormosia sp.</i>	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>

A espécie *Ormosia* sp., como já mencionado, mostrou comportamento espectral médio distinto na faixa de 5500 a 6100 cm^{-1} (Ver FIGURA 2.10A). É provável que a informação contida nessa faixa espectral tenha contribuído fortemente para a discriminação da espécie em relação às demais. Por outro lado, *Enterolobium maximum* e *Hymenaea courbaril* mostraram curva espectral média similar em toda faixa espectral. Isso pode explicar, pelo menos em parte, a confusão entre estas espécies observadas para os classificadores PLS-DA construídos com dados de todas as seções (E_1) e espectros individuais das seções transversal (E_2) ou tangencial (E_3).

Outro fator que deve ser considerado é a estrutura anatômica das madeiras estudadas. Sabe-se que a técnica NIR apresenta o resultado da análise química do material, contudo, essa composição é influenciada diretamente pelos constituintes anatômicos da madeira, uma vez que, diferentes componentes estruturais apresentam funções diversas para o indivíduo, resultando também em constituições químicas distintas. Sendo assim, é importante ressaltar que no geral, as características anatômicas das madeiras das espécies analisadas apresentam alto grau de similaridade. De acordo com a literatura e com a observação das características gerais das madeiras, todas as amostras podem apresentar: anéis de crescimento indistintos ou ausente, porosidade difusa, gomas e outros depósitos em vasos do cerne, parênquima axial aliforme, cristais prismáticos em células do parênquima axial, entre outras semelhanças (ROQUE et al., 2007; BRANDES et al., 2020; BERTI; ABBATE, 1992; MILLER, 2007; SOSEF et al., 1998; DETIENNE; JACQUET, 1983).

Ao avaliar a matriz de confusão (FIGURA 2.12) do classificador treinado com espectros NIR de todas as seções (E_1) percebe-se uma confusão gerada para a identificação da madeira de *Hymenolobium petraeum*, sendo classificada como *D. odorata*. Essa confusão pode ter sido gerada dentre outros motivos, pela distribuição exclusivamente estratificada dos raios, pois essa característica não é observada nas outras quatro espécies analisadas (ROQUE et al., 2007; BRANDES et al., 2020).

Ainda para a matriz de confusão do classificador E_1 , observou-se a confusão na classificação da espécie *E. maximum* que foi erroneamente identificada como *H. courbaril*. Neste caso, a característica comum que possivelmente diferencia essas espécies das demais é a baixa frequência de raios, sendo observados inclusive valores médios menores ou iguais a 4 raios por milímetro linear (BERTI; ABBATE, 1992; MILLER, 2007).

Salienta-se ainda, que quando são considerados os valores obtidos para as análises realizadas com as seções individualmente, resultando nos classificadores E_2 , E_3 e E_4 , não foram observadas características anatômicas significativas que possam justificar as confusões entre as outras espécies. Contudo, os comportamentos observados para a E_1 que foram descritos anteriormente repetem-se em algumas análises das seções transversal, radial e tangencial.

2.4 CONCLUSÕES

As madeiras das espécies estudadas, de um modo geral, apresentaram homogeneidade estrutural do xilema secundário. Apesar das diferenças quantitativas observadas entre as espécies, é possível separá-las microscopicamente através dos tipos de raios, parênquima axial, fibras e/ ou tiloses, óleo resina e cristais em série nas células dos parênquimas axiais e/ou radiais.

Raio do tipo heterogêneo ocorreu em *Hymenolobium petraeum*, pode separar *Dipteryx odorata*, *Hymenaea courbaril*, *Enterolobium maximum*, *Pseudopiptadenia suaveolens* e *Ormosia* sp. que apresentaram raios dos tipos homogêneos.

Hymenaea courbaril apresentou parênquima axial do tipo marginal, se distinguindo das demais que apresentaram parênquima axial do tipo aliforme confluyente losangular e/ou unilateral vasicêntrico.

Enterolobium maximum separou-se das demais por ser única amostra de madeira que apresentou fibras do tipo septadas em relação às demais que exibiram fibras não septadas.

Os parâmetros colorimétricos L^* , b^* e C^* tiveram mais influência na caracterização da cor da maioria das amostras de madeira. Quase todas as espécies apresentaram diferença estatística na cor entre os cortes anatômicos (transversal, tangencial e radial), com maiores valores para os cortes radiais, influenciados pela coloração avermelhada, definida pela coordenada a^* , e amarelada, definida pela coordenada b^* .

A análise de componentes principais mostrou evidências de compartilhamento de padrões de cores para algumas amostras, pertencentes à família Fabaceae. A técnica colorimétrica apresentou potencial para caracterizar amostras de madeira da família Fabaceae, apresentando maior eficiência para determinadas espécies dependendo da seção anatômica e parâmetro colorimétrico considerado. Portanto, a técnica pode servir como ferramenta de apoio para melhor discriminação desse grupo, contribuindo para a redução dos danos ecológicos e socioeconômicos.

A Espectroscopia no Infravermelho Próximo apresentou potencial para a discriminação das amostras de madeiras da família Fabaceae. As curvas espectrais das seis amostras de madeira da família Fabaceae foram similares, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas.

O classificador PLS-DA, quando considerados os espectros NIR das seções individuais (transversal, tangencial ou radial), apresentou acurácia de reconhecimento de 100% para as espécies, *Pseudopiptadenia suaveolens*, *Ormosia* sp., *Hymenaea courbaril* e *Enterolobium maximum*. Em destaque para a seção tangencial que apresentou uma acurácia de (98,87%) e o F1-Score (98,61%) do classificador PLS-DA, em comparação ao modelo construído com espectros NIR de todas as seções da madeira.

As Matrizes de Confusão (MC) para os classificadores PLS-DA construído somente com os espectros NIR da seção tangencial da madeira mostrou menor confusão entre espécies. Sendo assim, ajustar modelos PLS-DA utilizando os espectros NIR de todas as seções da madeira (transversal, tangencial e radial) não melhorou o desempenho dos classificadores.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. **IAWA Journal**, v.21, n.1, p. 3-30, 2000.
- ALVES, E. S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 2. Axial parenchyma, rays and fibres. **IAWA Journal**, v.23, n.4, p.391-418, 2002.
- BAAS, P. Systematic, phylogenetic, and ecological wood anatomy - history and perspectives. In New perspectives in wood anatomy. **Springer Science**, v.1, p.23-58, 1982.
- BAAS, P.; WHELLER, E.; CHASE, E. M. Dicotyledonous wood anatomy and the APG system of angiosperm classification. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v.131, p.3-17, 2000.
- BERGO, M. C.; PASTORE, T. C.; CORADIN, V. T.; WIEDENHOEFT, A. C.; BRAGA, J. W. NIRS identification of *Swietenia macrophylla* is robust across specimens from 27 countries. **IAWA Journal**, v.37, n. 3, p.420-430, 2016.
- BERNAL, R.A.; CORADIN, V.; CAMARGOS, J.; COSTA, C.; PISSARRA, J. Wood anatomy of Lecythidaceae species called tauari. **IAWA Journal**, v.32, n.1, p.97-112, 2011.
- BERTI, R. N.; ABBATE M. L. E. **Legnami tropicali importati in Italia: anatomia e identificazione**. Vol. II. America Latina. CNR, Firenze.1992. 406p.
- BOTOSSO, P.C. **Identificação Macroscópica de Madeiras**: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Embrapa Florestas, Colombo, 2011. 65p
- BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M.; CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; DA SILVA, A. R. The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla* (Cites Appendix II). **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 285-296, 2011.
- BRANDES, A. F. N.; NOVELLO, B. Q.; LEMOS, D. N.; NASCIMENTO, L. B.; ALBUQUERQUE, R. P.; TAMAIO, N.; BARROS, C. F. Wood anatomy of endangered Brazilian species. **IAWA Journal**, v.41, n.4, 510-576, 2020.
- BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.
- CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v.15, n.1, p.57-64, 2013.
- CALLADO, C. H.; ROIG, F. A.; TOMAZELLO-FILHO, M.; BARROS, C. F. Cambial growth periodicity studies of South American woody species – a review. **IAWA Journal**, v. 34, n. 3, p. 213-230, 2013.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n.51, p.30-41, 2001.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A.; PASTORE, T.C.M.; CHRISTO, A.G. **Madeiras Comerciais do Brasil**: Chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 2010.

DETENNE, P.; JACQUET, P. 1983. **Atlas d'identification des bois de l'amazone et des régions voisines**. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne, 640.

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**, v.20, n.4, p.437-447, 2012.

FLORA DO BRASIL. **Fabaceae in Flora do Brasil 2020 em construção**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB115>>. Acesso em 6 dez. 2021.

FRANKLIN, G.L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature, London**, v.155, n.3924, p.51-51, 1945.

GASSON, P. How precise can wood identification be? Wood anatomy's role in support of the legal timber trade, Especially CITES. **IAWA Journal**, v.32, n.2, p.137–154, 2011.

GEGZNA, V. **ManyROC: tools for ROC analysis**. Disponível em: <<https://github.com/gegn/manyROC>>. Acesso em 12 nov.2020.

GUMA, R.; BALDIN, T.; DENARI, L.; HASELEIN, C. R.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de *Tetrorchidium rubrivenium* Poepp. & End. (Euphorbiaceae), **Balduinia**, n. 47, p. 12-18, 2015.

HEIN, P.R.G.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* ST Blake wood. **Holzforschung**, v.64, n.1, 45-54, 2010.

HOADLEY, R. B. **Identifying wood: accurate results with simple tools**. Taunton Press. 1990. 248p.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features of hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.219-332, 1989.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra**: extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.5. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>>. Acesso em 10 jan. 2017.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v.28, n.5, p.1–26, 2008.

KUHN, M. Contributions from Jed Wing, Steve Weston, Andre Williams, Chris Keefer, Allan Engelhardt, Tony Cooper, Zachary Mayer, Brenton Kenkel, the R Core Team, Michael Benesty, Reynald Lescarbeau, Andrew Ziem, Luca Scrucca, Yuan Tang, Can Candan and Tyler Hunt. 2016. caret: **Classification and Regression Training. R package version 6.0-73**. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=caret>. Acesso em 3 de nov.2019.

LAZARESCU, C.; HART, F.; PIROUZ, Z.; PANAGIOTIDIS, K.; MANSFIELD, S.D.; BARRETT, J.D.; AVRAMIDIS, S. Wood species identification by near-infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v.8, n.1, p.32-35, 2017.

LE, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR R: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.

LEWIS, G. P.; SCHRIRE, B.; MACKINDER, B.; LOCK, M. (Eds.). **Legumes of the World**. Royal Botanic Gardens Kew. 2005. Disponível em: <https://play.google.com/store/books/details?id=iC9FAQAIAAJ>. Acesso em 05 maio. 2022.

KARATZOGLOU, A.; SMOLA, A.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. kernlab—an S4 package for kernel methods in R. **Journal of Statistical Software**, v.11, n.9, p.1–20, 2004.

LUAN, Q. F.; LI, Y. J.; JIANG, J. M.; YUE, H. F.; DIAO, S. F. Discrimination of *Pinus taeda* x *P. caribaea* var. *hondurensis* between its allele-species and hybrids using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.21, n.3, p.203-211, 2013.

MACHADO, P. F. S.; MARCHIORI, J. N. C.; SIEGLOCH, A. M. Anatomia da madeira de *Enterolobium glaziovii* (Benth.) Mesquita. **Balduinia**, n.50, p.11-15, 2015.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; DE CASTRO, V. G.; DE SOUZA, M. J. C.; DE MEDEIROS, D. T. Grouping of commercial tropical timber using wood color. **Revista de Ciências Agrárias**, v.62, p.1-6, 2019.

MEVIK, B. H.; WEHRENS, R.; LILAND, K. H. pls: **Partial Least Squares and Principal Component Regression**. R package version 2.7-3, 2020.

MILLER, R. B. Fluorescent woods of the world. IN: J.H. Flynn, Jr. (ed.), **A Guide to the More Useful Woods of the World**. Forest Products Society, Madison, WI. 2007. 305p.

MUÑIZ, G.I.B.; CARNEIRO, M.E.; BATISTA, R.; RODRIGUES, F.; SCHARDOSIN, F.Z.; NISGOSKI, S. Wood and charcoal identification of five species from the

miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v.18, n.3, p.505-522, 2016.

NELSON, N.D.; MAEGLIN, R.R.; WAHLGREN, H.E. Relationship of black walnut wood color to soil properties and site. **Wood and Fiber Science**, v.1, n.1, p.29-37, 1969.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; CHANSON, B.; DETIENNE, P.; GRIL, J.; THIBAUT, B. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. **Journal of Wood Science**, v.44, n.1, p.3-8, 1998.

PACE, J.H.C.; LATORRACA, J.V.F.; HEIN, P.R.G.; CARVALHO, A.M.; CASTRO, J.P.; SILVA, C.E.S. Wood species identification from Atlantic Forest by near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, v.28, n.3, p.3-15, 2019.

PASTORE, T.C.; BRAGA, J.W.B.; CORADIN, V.T.R.; MAGALHÃES, W.L.E.; OKINO, E.Y.A.; CAMARGO, J.A.A.; MUÑIZ, G.I.B.; BRESSAN, O.A.; DAVRIEUX, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: Discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixa. **Holzforschung**, v.65, n.1, p.73-80, 2011.

PAULA, J.E.; ALVES, J.L.H. **Madeiras Nativas do Brasil: Anatomia; Dendrologia; Produção; Uso**. Porto Alegre, (ed) Cinco continentes. 2007. 438p.

RAMALHO, F.M.; ANDRADE, J.M.; HEIN, P.R. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, v.27, n.2, p.4, 2018.

RIBEIRO, E.S.; GONÇALEZ, J.C.; LIMA, C.M.; RODRIGUES, E.C.C.; PAULA, M.H.; MESQUITA, R.R.S.; QUEIROZ, F.L.C.; LESSES, O.M.G. Colorimetry and anatomical characterization of commercial wood species from the Brazilian Amazon. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v.12, n.2, p.15-23, 2018.

ROQUE, R.M.; CORTÉS, M. G.; MORENO, J. R. Clave de identificación macroscópica para 22 especies maderables de Bolivia. **Revista Forestal Venezolana**, v.51, n.2, p.179-193, 2007.

SANTOS, J.X.; VIEIRA, H.C.; SOUZA, D.V.; MENEZES, M.C.; MUNIZ, G.I.B.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Discrimination of “Louros” wood from the Brazilian Amazon by near-infrared spectroscopy and machine learning techniques. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.79, p.989-998, 2021.

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

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONCALVES, L. S. A. **AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences**. R package version 1.2.7. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>>. Acesso em 10 mar. 2022.

SILVA, E.S.; STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; CALEGARI, L.; PARIZ, E. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ciência da Madeira**, v.6, n.1, p.31-37, 2015.

SILVA, R.A.F.; SETTER, C.; MAZETTE, S.S.; DE MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M. Colorimetry of wood from thirty tropical species. **Revista Ciência da Madeira**, v.8, n.1, p.36-41, 2017.

SNEL, F. A.; BRAGA, J.W.; DA SILVA, D.; WIEDENHOEFT, A.C.; COSTA, A.; SOARES, R.; CORADIN, V. T. R.; PASTORE, T.C. Potential field-deployable NIRS identification of seven *Dalbergia* species listed by CITES. **Wood Science and Technology**, v.52, n.5, p.1411-1427, 2018.

SOARES, L.F.; SILVA, D.C.D.; BERGO, M.C.; CORADIN, V.T.; BRAGA, J.W.; PASTORE, T.C. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. **Química Nova**, v.40, p.418-426, 2017.

SOSEF, M.S.M.; HONG, L.T.; PRAWIROHATMODJO, S. (eds.). **Plant Resources of South-East Asia. No. 5 (3). Timber trees: Lesser-known timbers**. Backhuys Publishers, Leiden. 1998. 859p.

SOUSA, W.C.S.; BARBOSA, L.J.; SOARES, A.A.V.; GOULART, S.L.; PROTÁSIO T.P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v.25, n.4, p.451-462, 2019.

THULEAU, S.; HUSSON, F. **FactoInvestigate: Automatic Description of Factorial Analysis**. R package version 1.6. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=FactoInvestigate>>. Acesso em 12 nov, 2020.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. 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.

TSUCHIKAWA, S.; INOUE, K.; NOMA, J.; HAYASHI, K. Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination. **Journal of Wood Science**, v.49, n.1, p.29-35, 2003.

VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. Produção na Amazônia florestal: características, desafios e oportunidades. **Parcerias Estratégicas**, v.19, n.38, p.13-44, 2015.

VIEIRA, H.C; DA SILVA, E.L; DOS SANTOS, J.X; DE MUÑIZ, G.I.B; MORRONE, S.R; NISGOSKI, S. Wood colorimetry of native species of Myrtaceae from an Araucaria forest. **Revista Floresta**, v.49, n.2, p.353-362, 2019.

WHEELER, E. A.; BAAS, P; RODGERS, S. Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the insidewood database. **IAWA Journal**, v.28, n.3, p.229-258, 2007.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. 319p.

YANG, Z.; LV, B.; FU, Y.J. The Relationship between near Infrared Spectroscopy and Surface Color of eight Rosewoods. **In Advanced Materials Research**, v.479, p.1772-1776, 2012.

YANG, Z.; LIU, Y.; PANG, X.; LI, K. Preliminary investigation into the identification of wood species from different locations by near infrared spectroscopy. **BioResources**, v.10, n.4, p.8505-8517, 2015.

CAPÍTULO 3

ESPECTROSCOPIA VIS/NIR NA DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS DAS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi comparar o comportamento das características colorimétricas e dos espectros visíveis e no infravermelho próximo de dezesseis amostras de madeira sólida pertencentes a três diferentes famílias botânicas: Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae, todas oriundas da Reserva Extrativista Verde para Sempre, no Estado do Pará. Para as análises colorimétricas e do espectro no infravermelho próximo, as leituras nas amostras foram obtidas de forma aleatória nas três direções de corte da madeira (transversal, tangencial e radial). Avaliou-se visualmente o comportamento espectral das amostras de madeira na região do visível e da região do infravermelho próximo. Nas análises estatísticas foram realizadas as comparações das médias dos parâmetros colorimétricos da madeira das espécies e das famílias utilizando o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Além disso, utilizou-se também a análise discriminante *k*-NN para verificar acurácia na discriminação dos materiais analisados entre as espécies e as famílias. Como resultados, nos espectros colorimétricos apenas a Família Fabaceae diferenciou-se das demais, para as espécies houve a separação parcial dos espectros médios do parâmetro L^* de *Euplassa* sp., e *Roupala* sp., (Proteaceae), enquadraram-se como madeiras claras. De modo similar, as espécies *Pseudopiptadenia suaveolens* (Fabaceae) e LR-*Ocotea* sp., (Lauraceae), também foram classificadas como madeiras claras, no entanto, apenas nos planos de corte radial e tangencial. Para os parâmetros colorimétricos, a coordenada cromática a^* e C^* apresentaram menor potencial de distinção entre as Famílias e os parâmetros L^* , b^* e h apresentaram maior potencial de distinção entre as espécies. Considerando a espectroscopia no infravermelho próximo para as famílias, houve uma tendência de separação apenas da família Lauraceae; para as espécies, os espectros foram semelhantes entre si. Assim, pode-se concluir, que no geral, as técnicas apresentaram potencial de separação para a distinção das espécies e das famílias, contudo, são necessárias novas pesquisas que objetivem determinar uma análise estatística que seja capaz de apresentar resultados satisfatórios para todas as famílias.

Palavras-chave: Madeira sólida. Fabaceae. Lauraceae. Proteaceae.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to compare the behavior of colorimetric characteristics and visible and near-infrared spectra of sixteen solid wood samples belonging to three different botanical families: Fabaceae, Lauraceae and Proteaceae, all from the Verde para Sempre Extractive Reserve, in the state of Pará. For the colorimetric and near-infrared spectrum analyses, the data on the samples were obtained randomly in the three directions of wood cutting (transverse, tangential and radial). The spectral behavior of wood samples in the visible and near infrared regions was visually evaluated. In the statistical analysis, comparisons of the averages of the colorimetric parameters of the wood species and families were carried out using the Tukey test ($\alpha = 0.05$). In addition, the k-NN discriminant analysis was also used to verify accuracy in the discrimination of the analyzed materials between species and families. As a result, in the colorimetric spectra, only the Fabaceae Family differed from the others, for the species there was a partial separation of the average spectra of the L^* parameter of *Euplassa* sp., and *Roupala* sp., (Proteaceae), classified as light woods. Similarly, the species *Pseudopiptadenia suaveolens* (Fabaceae) and *LR-Ocotea* sp. (Lauraceae) were also classified as light woods, however, only in the radial and tangential cut planes. For the colorimetric parameters, the chromatic coordinates a^* and C^* showed the lowest potential for distinguishing between the Families and the parameters L^* , b^* and h presented the highest potential for distinguishing between the species. Considering the near infrared spectroscopy for the families, there was a tendency to separate only the family Lauraceae; for the species, the spectra were similar to each other. Thus, it can be concluded that, in general, the techniques presented separation potential for the distinction of species and families, however, further research is needed to determine a statistical analysis capable of presenting satisfactory results for all families.

Keywords: Solid wood. Fabaceae. Lauraceae. Proteaceae.

3.1 INTRODUÇÃO

A exploração das áreas florestais causada pela colheita de madeira, muitas vezes sem manejo adequado provoca danos e alterações biofísicas e como resultado diminui o crescimento das árvores (VIDAL et al., 2002).

Atualmente, há diversas instituições nacionais e internacionais empenhadas em combater a exportação ilegal de madeiras, tal esforço tem por finalidade proibir e/ou desmotivar a exploração seletiva de espécies florestais com potencial madeireiro (SOARES et al., 2017).

Dentre estas técnicas enquadram-se a colorimetria-espectroscopia no visível (VIS) e a espectroscopia do infravermelho próximo (NIR). A técnica colorimétrica vem sendo utilizada para distinção de madeira em diversos estudos, como por exemplo, Vieira et al. (2019) estudando algumas espécies de Myrtaceae da Mata Atlântica, Barros et al. (2013) e Sousa et al. (2019) avaliando espécies arbóreas tropicais da floresta Amazônica.

De modo similar, a Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) que tem sido utilizada com sucesso como um método não-destrutivo e rápido, com qualidade de análises satisfatórias (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). A espectroscopia no infravermelho próximo tem sido caracterizada como uma medida quantitativa não destrutiva, baseada em métodos estatísticos e matemáticos com intuito de auxiliar na discriminação de espécies de potencial madeireiro e prever suas qualidades antes de encaminhá-las à comercialização (TSUCHIKAWA et al., 2003).

As indústrias de processamento de madeira apresentam necessidade de métodos com essas características, isto é, com menor morosidade e com maior confiabilidade na seleção e classificação das espécies madeireiras (YANG; EVANS, 2003).

Assim, o objetivo deste capítulo foi comparar o comportamento das características colorimétricas e dos espectros do infravermelho próximo de dezesseis amostras de madeira sólida pertencentes a três diferentes famílias botânicas: Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae, todas oriundas da Reserva Extrativista Verde para Sempre, no Estado do Pará.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

As espécies foram coletadas em área de manejo florestal sustentável no Estado do Pará conforme descrito no capítulo 1 (página 38) e capítulo 2 (página 91). As espécies avaliadas estão na Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 - AMOSTRAS DE MADEIRA DAS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE COLETADAS NAS COMUNIDADES PARAÍSO E ARIMUM, ESTADO DO PARÁ.

Nome vernacular	Código	Nome científico	Família	Comunidade	Árvores	Cubos de madeira sólida	N.º de leituras
Angelim pedra	-	<i>Hymenolobium petraeum</i>	Fabaceae	Paraíso	1	14	252
Cumarú	-	<i>Dipteryx odorata</i>	Fabaceae	Arimum	1	11	198
Louro cumarú	-	<i>Ormosia</i> sp.	Fabaceae	Paraíso	1	12	216
Fava tamboril	-	<i>Enterolobium maximum</i>	Fabaceae	Paraíso	1	13	234
Jatobá	-	<i>Hymenaea courbaril</i>	Fabaceae	Paraíso	1	18	324
Jatobá	-	<i>Hymenaea courbaril</i>	Fabaceae	Arimum	1	8	144
Timborana	-	<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Fabaceae	Paraíso	2	25	450
Preciosa	PR	<i>Aniba</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	11	198
Louro preto	LP	<i>Nectandra</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	12	216
Louro pimenta	LPI	<i>Ocotea</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	11	198
Louro rosa	LR	<i>Ocotea</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	13	234
Itauba	IT	<i>Mezilaurus</i> sp.	Lauraceae	Arimum	1	27	486
Itauba amarela	ITA	<i>Mezilaurus</i> sp.	Lauraceae	Paraíso	1	8	144
Louro branco	LB	<i>Euplassa</i> sp.	Proteaceae	Arimum	1	11	198
Louro vermelho	LV	<i>Roupala</i> sp.	Proteaceae	Arimum	1	8	144
Total de amostras					16	202	6636

FONTE: A autora (2022).

3.2.1 Colorimetria – espectroscopia no visível

Os parâmetros L^* , a^* , b^* , C^* e h , foram determinados conforme descritos nas metodologias dos capítulos 1 e 2. Para os espectros no visível foi testado a análise de componentes principais (PCA) para avaliar a influência dos parâmetros colorimétricos no agrupamento das famílias botânicas Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae, com o pacote FactoMineR (LÊ et al., 2008), e os resultados principais foram extraídos com o pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON, 2020). Um gráfico biplot foi construído para verificar a relação dos espectros de PCA e a contribuição de cada variável para os componentes principais. As curvas de reflectância de espectros visíveis foram traçadas com o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016). Todas as análises foram realizadas com a linguagem R (versão 3.4.3) conforme descrito nos capítulos 1 e 2.

3.2.2 Espectroscopia no infravermelho próximo

Foram testadas três técnicas de aprendizado de máquina para a construção de modelos de reconhecimento de família por espécies: a) *Support Vector Machine* (SVM); b) *Partial Least Squares - Discriminant Analysis* (PLS-DA); e c) *k-Nearest Neighbors* (k -NN) conforme descritos nos capítulos 1 e 2.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

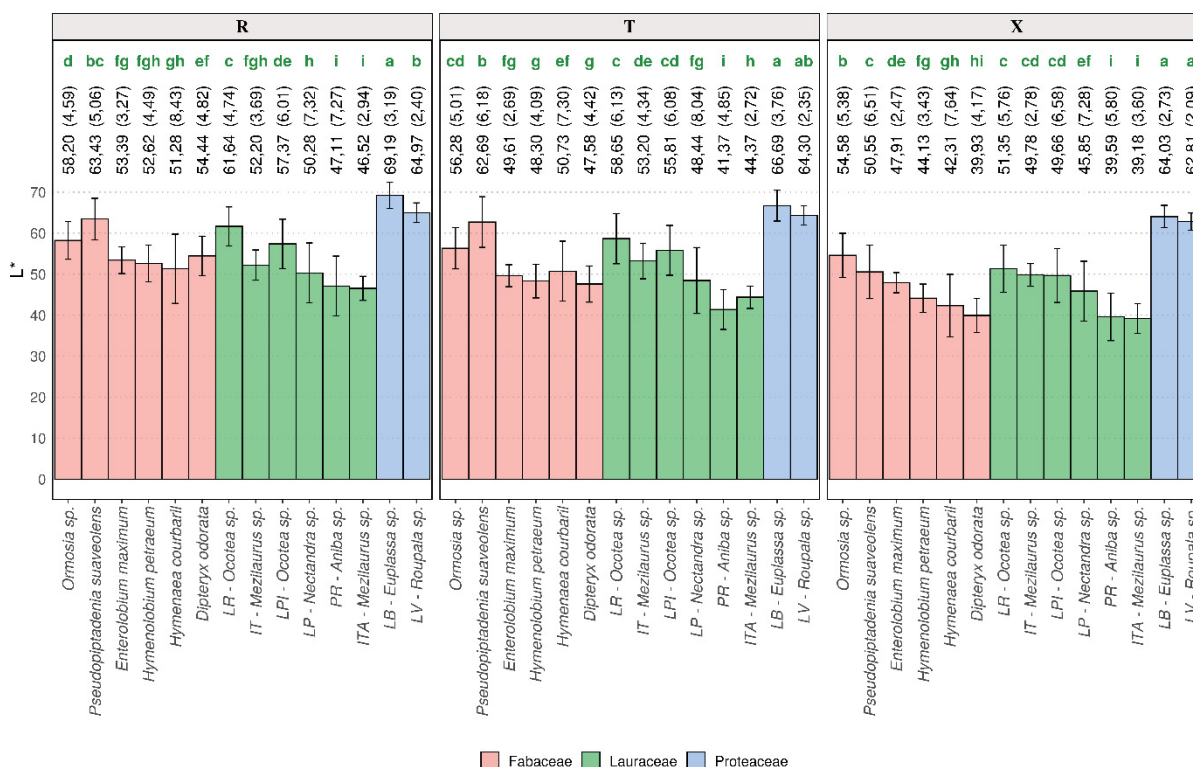
3.3.1 Colorimetria - espectroscopia no visível

As médias aritméticas, com a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$), e os desvios padrão dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h) para cada espécie de três famílias (Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae), para cada seção anatômica (transversal, radial e tangencial) da madeira, estão apresentadas nas Figuras 3.1 a 3.5. Em muitos casos, espécies de diferentes famílias exibiram diferenças significativas entre as médias dos parâmetros colorimétricos, nas seções anatômicas.

Em relação ao parâmetro colorimétrico L^* , na maioria dos casos, as espécies *Euplassa* sp. (Louro branco) e *Roupala* sp. (Louro vermelho), pertencentes à família Proteaceae, apresentaram médias significativamente maiores (FIGURA 3.1). Provavelmente, este comportamento pode ser justificado pelas semelhanças das estruturas anatômicas dessas madeiras como descrito no Capítulo 1. Na seção radial, a média de *Euplassa* sp. foi superior à *Roupala* sp. A espécie *Roupala* sp., por sua vez, mostrou média igual à *Pseudopiptadenia suaveolens* (Fabaceae), nas seções radial e tangencial.

As espécies ITA - *Mezilaurus* sp. e PR - *Aniba* sp., pertencentes à família Lauraceae, apresentaram médias significativamente menores, para o parâmetro colorimétrico L^* , na maioria dos casos, nas três seções anatômicas da madeira. Na seção transversal, estas espécies tiveram média similar apenas à *Dipteryx odorata* (Fabaceae).

FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.



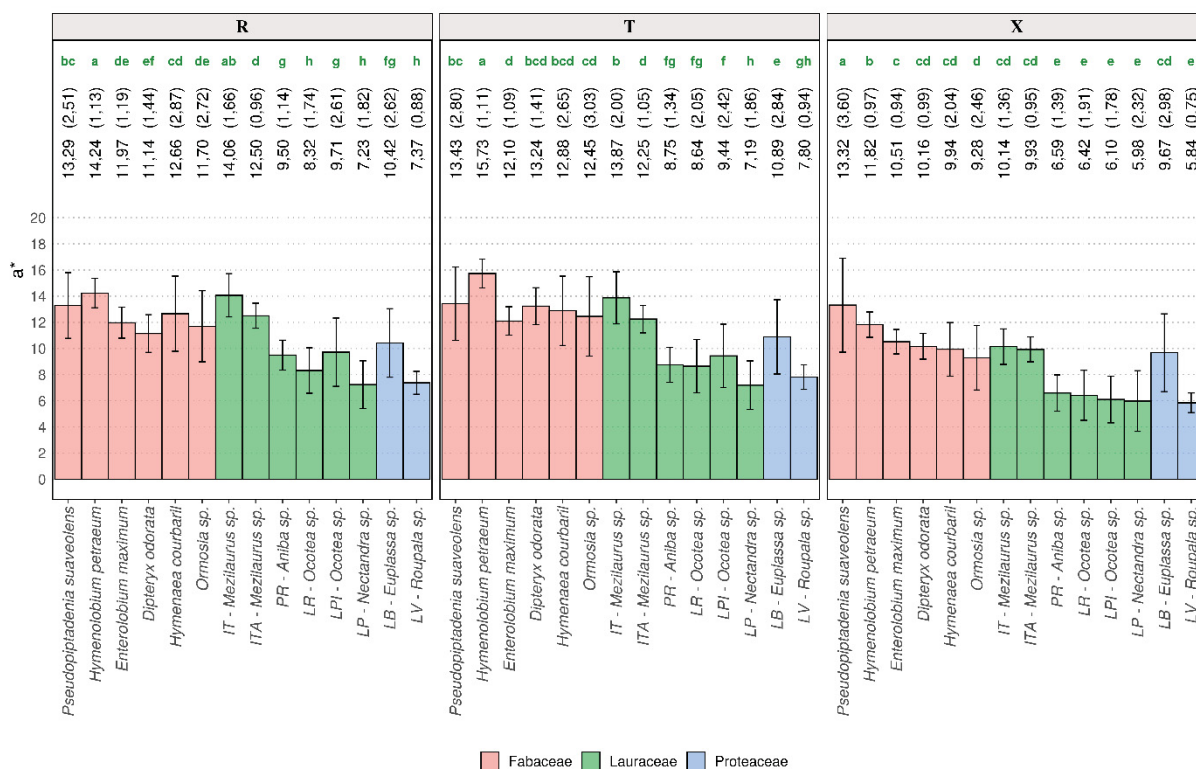
FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: No topo das barras estão as médias e os desvios padrão (entre parênteses) das espécies, em cada seção anatômica, e as letras que indicam a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para cada seção anatômica, letras iguais entre espécies indicam não haver diferença entre as médias do parâmetro. X = transversal, R = radial, T = tangencial.

Em relação à coordenada cromática a^* , *Hymenolobium petraeum* (Fabaceae) apresentou média significativamente maior, na maior parte das vezes, para as seções radial e tangencial (FIGURA 3.2). A exceção está na seção radial, onde a média de *Hymenolobium petraeum* foi igual à encontrada para IT – *Mezilaurus* sp. Na seção transversal, por outro lado, *P. suaveolens* (Fabaceae) foi a espécie com maior média para o parâmetro a^* , seguida de *Hymenolobium petraeum*.

Em geral, as menores médias do parâmetro a^* , foram encontradas para as espécies pertencentes às famílias Lauraceae e Proteaceae. Na seção tangencial, LP – *Nectandra* sp. e LV – *Roupala* sp. apresentaram menores médias e iguais entre si. Do mesmo modo, na seção radial, estas espécies exibiram médias significativamente menores, porém iguais também à LR – *Ocotea* sp. Na seção transversal, outras espécies (LPI – *Ocotea* sp. e PR – *Aniba* sp.) mostraram médias menores e similares à LP – *Nectandra* sp., LV – *Roupala* sp. e LR – *Ocotea* sp.

FIGURA 3.2 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a^* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.

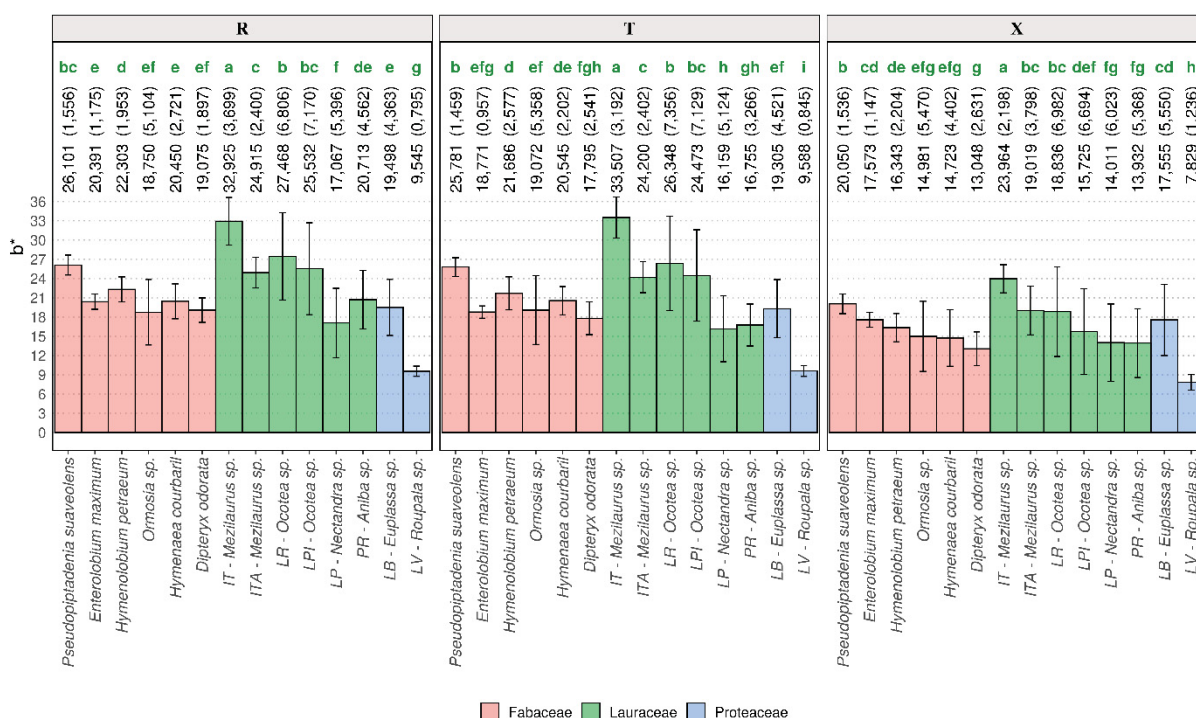


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: No topo das barras estão as médias e os desvios padrão (entre parênteses) das espécies, em cada seção anatômica, e as letras que indicam a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para cada seção anatômica, letras iguais entre espécies indicam não haver diferença entre as médias do parâmetro. X = transversal, R = radial, T = tangencial.

Em se tratando do parâmetro colorimétrico b^* , a espécie IT - *Mezilaurus* sp. (Lauraceae) apresentou médias superiores em todas as seções anatômicas (FIGURA 3.3). Enquanto que, médias significativamente menores foram encontradas para LV - *Roupala* sp., em todas as seções anatômicas.

FIGURA 3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b^* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.

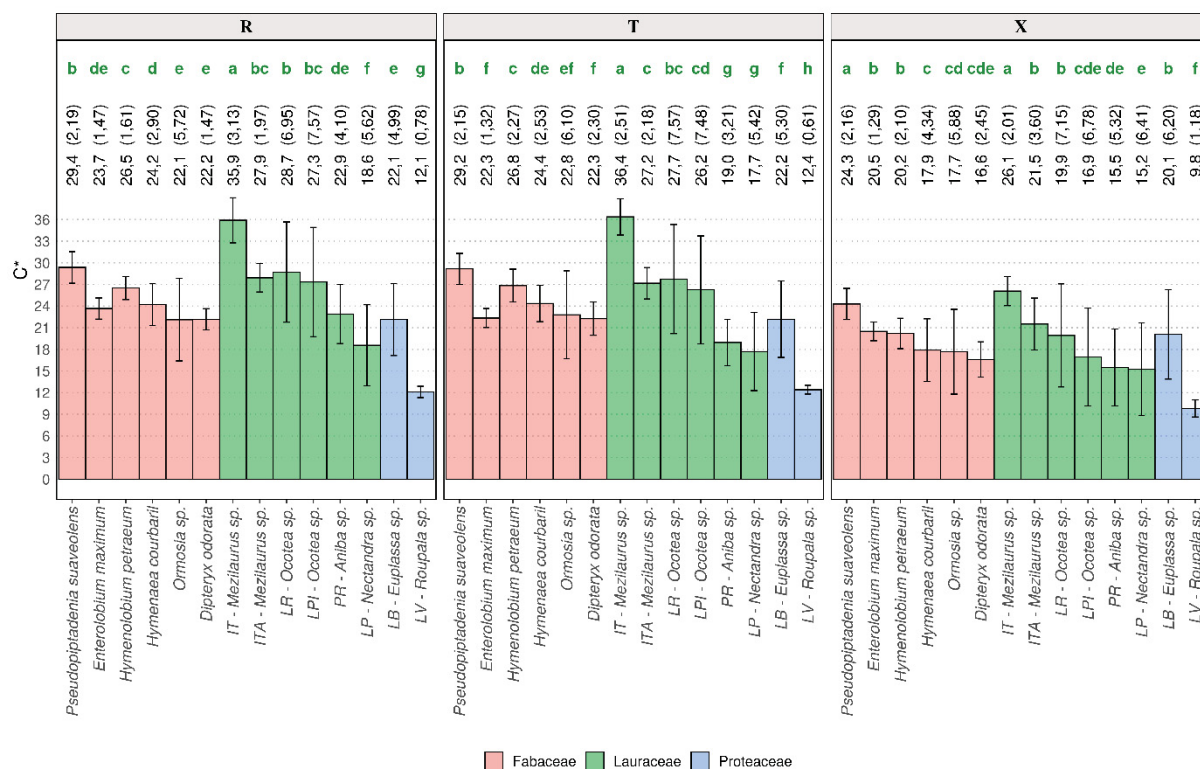


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: No topo das barras estão as médias e os desvios padrão (entre parênteses) das espécies, em cada seção anatômica, e as letras que indicam a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para cada seção anatômica, letras iguais entre espécies indicam não haver diferença entre as médias do parâmetro. X = transversal, R = radial, T = tangencial.

Em relação ao parâmetro C^* , a espécie IT - *Mezilaurus* sp. (Lauraceae) apresentou valores de médias superiores em todas as seções anatômicas, sendo estatisticamente igual *P. suaveolens* (Fabaceae) apenas na seção transversal. De modo contrário, a espécie LV - *Roupala* sp. exibiu médias significativamente menores nas três seções anatômicas (FIGURA 3.4).

FIGURA 3.4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C* DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.

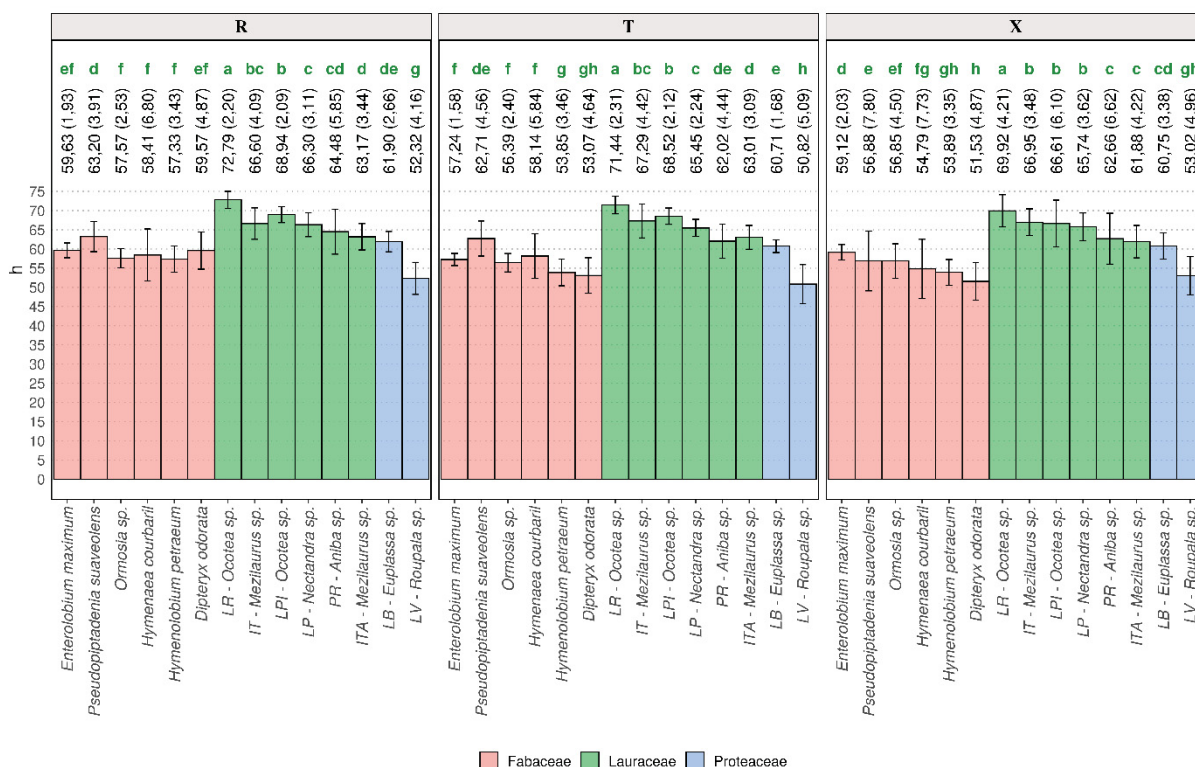


FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: No topo das barras estão as médias e os desvios padrão (entre parênteses) das espécies, em cada seção anatômica, e as letras que indicam a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para cada seção anatômica, letras iguais entre espécies indicam não haver diferença entre as médias do parâmetro. X = transversal, R = radial, T = tangencial.

No que se refere ao ângulo de tinta h, a espécie LR - *Ocotea* sp. (Lauraceae) apresentou valores de médias superiores, em todas as seções anatômicas. Em geral, a maioria das espécies de Lauraceae mostraram médias significativamente superiores às encontradas para as espécies das famílias Fabaceae e Proteaceae (FIGURA 3.5).

FIGURA 3.5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h DAS ESPÉCIES DE DIFERENTES FAMÍLIAS NAS SEÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: No topo das barras estão as médias e os desvios padrão (entre parênteses) das espécies, em cada seção anatômica, e as letras que indicam a significância estatística por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para cada seção anatômica, letras iguais entre espécies indicam não haver diferença entre as médias do parâmetro. X = transversal, R = radial, T = tangencial.

Em geral, os parâmetros colorimétricos mostraram potencial para discriminar diferentes espécies, dentro e entre diferentes famílias. A melhor diferenciação de algumas espécies foi alcançada para diferentes parâmetros colorimétricos e seções anatômicas da madeira.

A média geral da luminosidade (L^*) variou entre 39,18 a 69,19. Camargos e González (2001), baseado no parâmetro L^* , sugeriram a classificação de madeiras em duas categorias: 1) espécies de madeiras escuras: possuem luminosidade menor ou igual a 56 ($L^* \leq 56$); 2) espécies de madeiras claras: apresentam luminosidade maior do que 56 ($L^* > 56$). Neste estudo, portanto, as espécies *Euplassa sp.* e *Roupala sp.* (Proteaceae), foram enquadradas no grupo de madeiras claras. Por outro lado, as espécies *Pseudopiptadenia suaveolens* (Fabaceae) e *LR - Ocotea sp.* (Lauraceae), também foram classificadas como madeiras claras, porém apenas nas seções anatômicas radial e tangencial.

As diferenças de tonalidades nas amostras de madeiras são naturais. Isto porque a cor da madeira é sensível a diversos fatores, como degradação natural, tratamento térmico (TORRES et al., 2012; CADEMARTORI et al., 2013), a idade da árvore, composição química, local de coleta e fatores genéticos (SILVA et al., 2017; ARCE; MOYA 2015; SOTELO-MONTES et al., 2013; GONÇALEZ et al., 2014), a densidade da madeira (SOUSA et al., 2019) e também características de cada seção anatômica (NISHINO et al., 2000). Silva et al. (2017) relataram diferenças entre a colorimetria das madeiras de trinta espécies tropicais. Sousa et al. (2019) realizaram uma pesquisa visando subsidiar a fiscalização da comercialização da madeira utilizando a colorimetria e descreveram diferenças entre os resultados das espécies analisadas.

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada usando dados dos parâmetros colorimétricos, visando avaliar a existência de padrões de separação em nível de espécies ou família. O número de componentes a reter foi dois, pois apresentaram autovalores (λ_i) maiores do que 1. A variância total explicada pelos dois primeiros componentes principais foi de 83,4%, com 54,2% e 29,2% para PC-1 e PC-2, respectivamente (FIGURA 3.6A). Portanto, é confiável usar as duas primeiras componentes principais para realização de inferências sobre padrões aparentes, sendo as demais dimensões menos informativas.

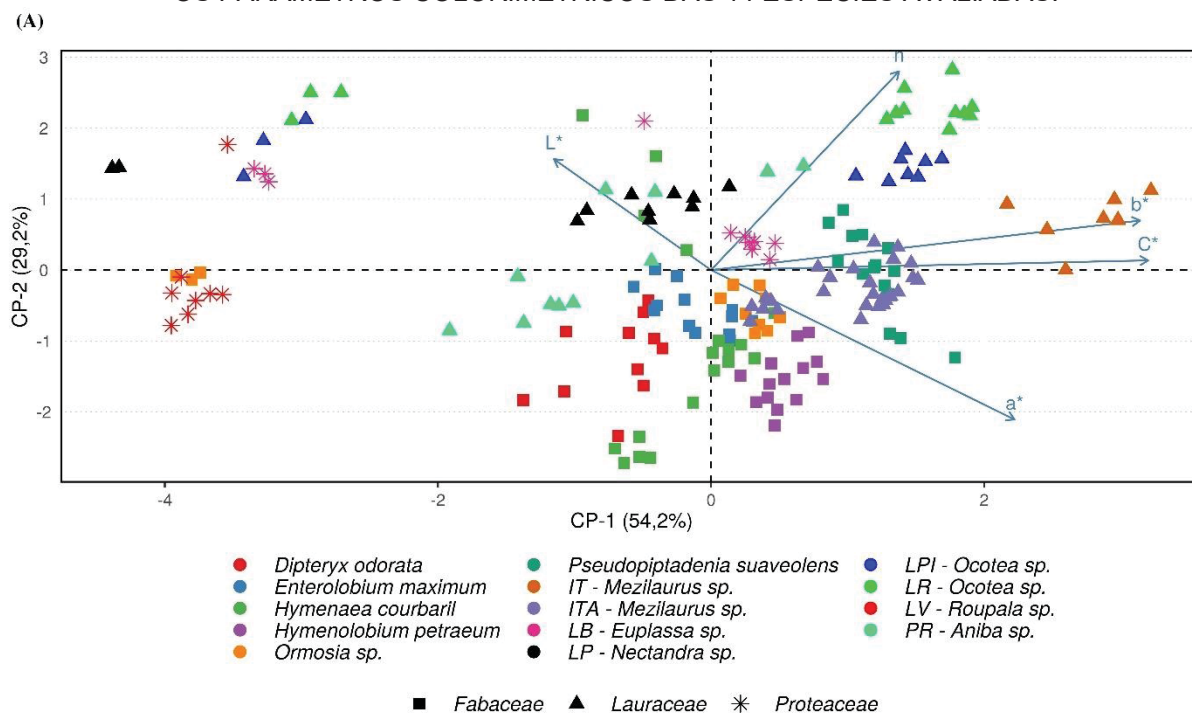
Por meio do gráfico biplot (FIGURA 3.6A) é possível inferir sobre a contribuição dos parâmetros colorimétricos no agrupamento ou separação entre as madeiras das espécies e famílias. Em geral, as amostras de madeiras de uma mesma espécie mostraram maior tendência de aproximação. Além disso, comumente, amostras de espécies de uma mesma família estiveram mais próximas.

As amostras de madeira de LV - *Roupala* sp. (Proteaceae) foram caracterizadas por altos valores de luminosidade L^* , com visível separação em relação às demais espécies. Além disso, algumas amostras de *Ormosia* sp. (Lauraceae) compartilharam de características semelhantes (altos valores de L^*) com a madeira de LV - *Roupala* sp. Ainda, IT - *Mezilaurus* sp. (Lauraceae) também apresentou clara separação, cujas amostras exibiram altos valores de b^* e C^* .

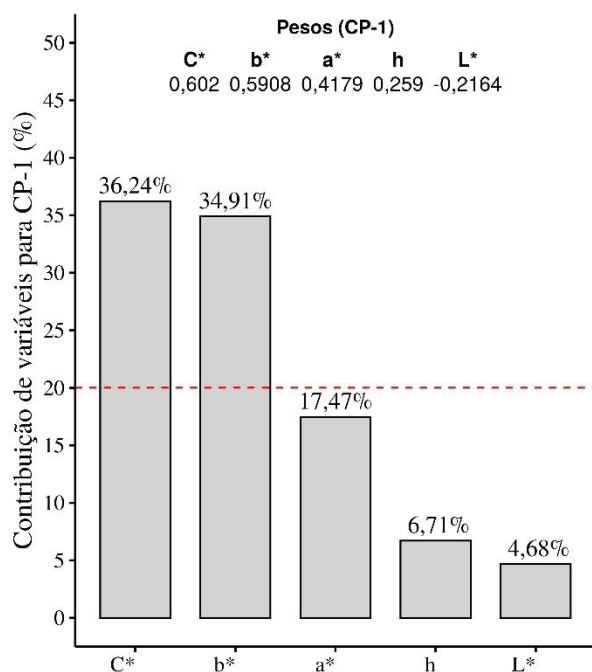
No que se refere à separação entre as famílias botânicas, foi observada uma melhor distinção para a Fabaceae. Apenas *Ormosia* sp., com altos valores de a^* , e *P. suaveolens*, com altos valores de b^* e C^* , compartilharam características com as madeiras da Família Lauraceae (ITA - *Mezilaurus* sp.) e Proteaceae (LV - *Roupala*

sp.). Esta maior proximidade pode estar relacionada com alterações naturais resultantes do processo de crescimento das árvores entre outros fatores bióticos e abióticos.

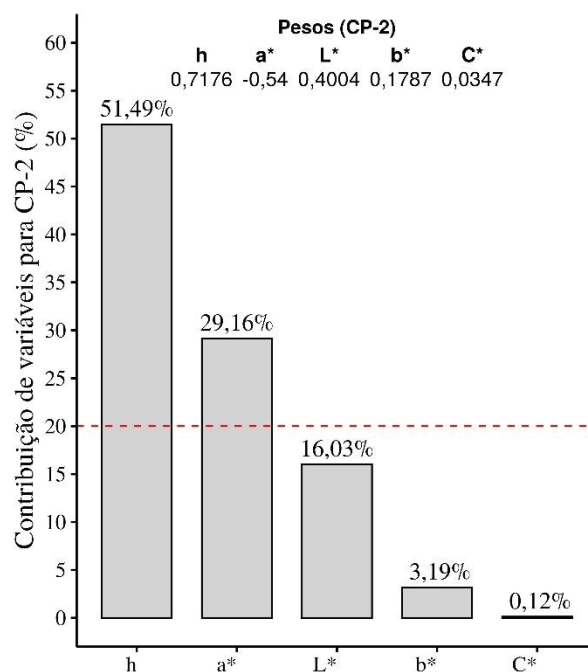
FIGURA 3.6 - GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS.



(B)



(C)

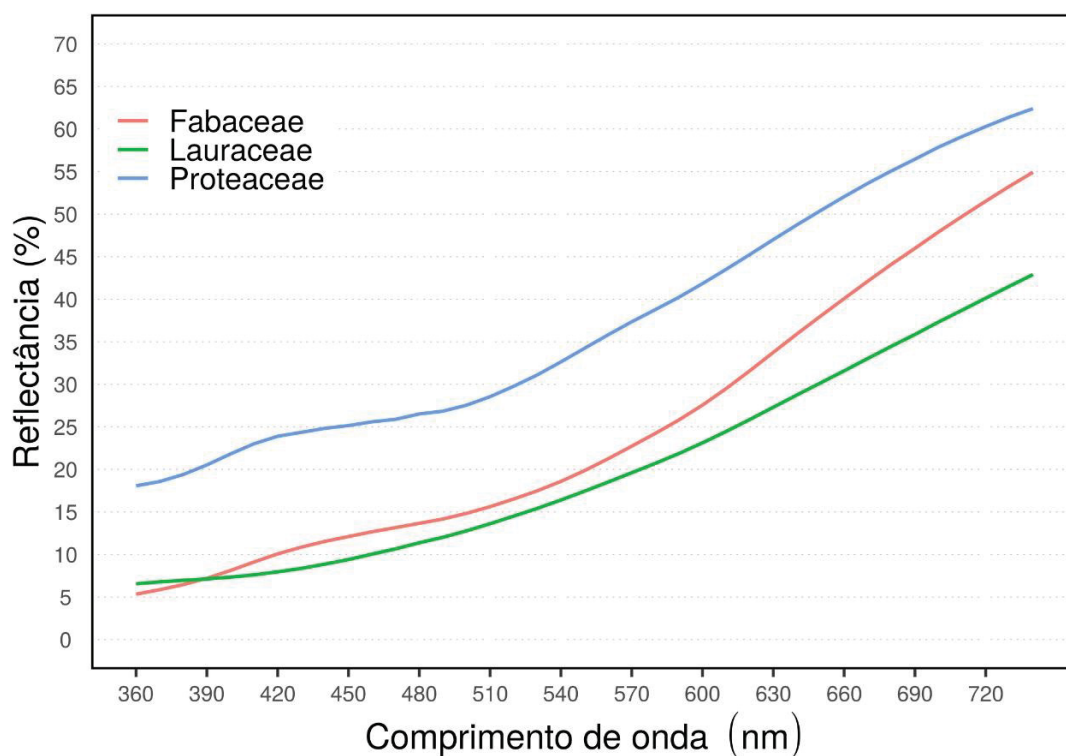


FONTE: A autora (2022).

Na PCA, a magnitude dos pesos informa sobre a contribuição de cada parâmetro na construção dos componentes principais, e o sinal indica se estão diretas ou inversamente correlacionados (FIGURAS 3.6B e 3.6C). A cromaticidade C^* mostrou maior contribuição na variância explicada pela PC-1, enquanto o ângulo de tinta (h) apresentou maior peso na PC-2. Somente a luminosidade L^* e a coordenada a^* foram inversamente correlacionadas com a PC-1 e PC-2, respectivamente

Na Figura 3.7, estão os espectros médios na região do visível das três famílias de espécies Amazônicas (Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae). Em geral, as famílias mostraram comportamento espectral semelhante, com valores de reflectância mais próximos para as famílias Lauraceae e Fabaceae, sobretudo, na faixa de comprimento de onda de 370 nm a 570 nm.

FIGURA 3.7 - ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL PARA AS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE.

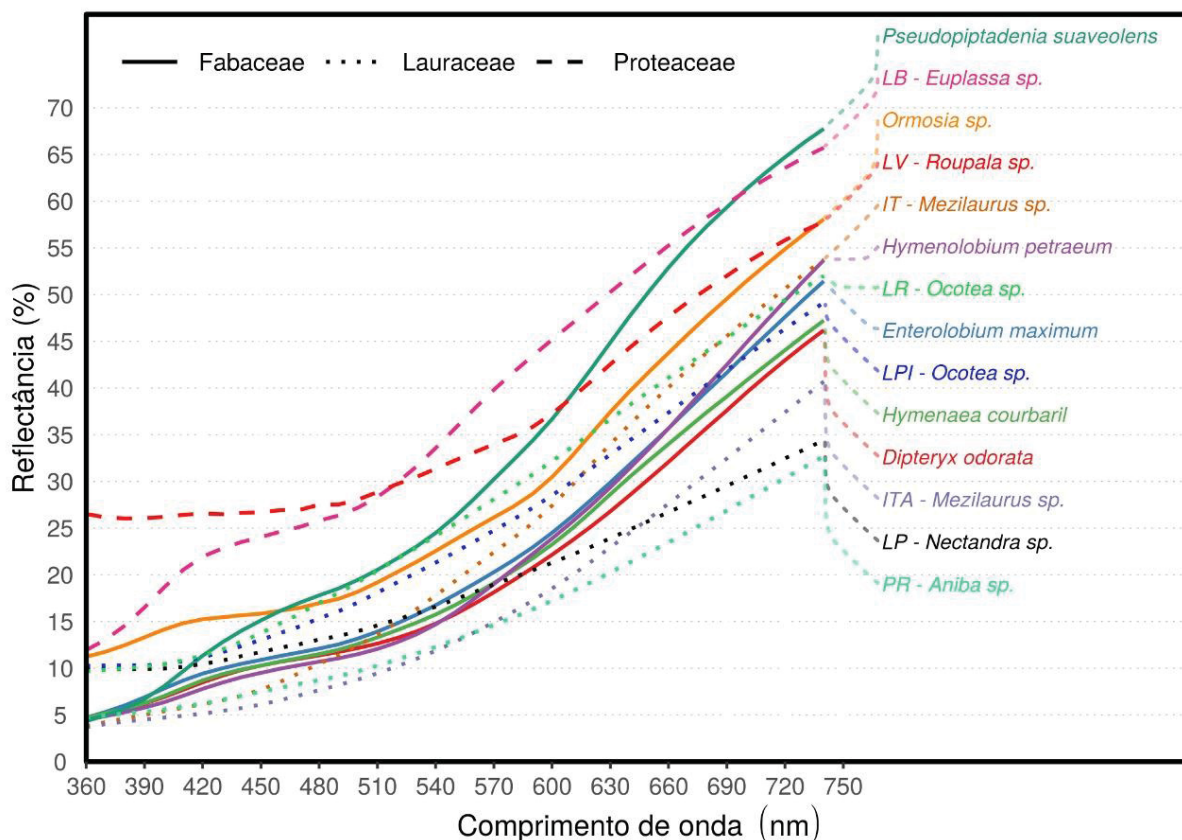


FONTE: A autora (2022).

O comportamento espectral foi semelhante, para a maioria das espécies, ao longo de todo comprimento de onda, com maior aproximação entre as curvas de reflectância das espécies pertencentes às famílias Lauraceae e Fabaceae (FIGURA 3.8). A exceção está nas espécies *Euplassa* sp. e *Roupala* sp., pertencentes à Proteaceae, que exibiram um comportamento espectral diferenciado, sobretudo, na

faixa de comprimento de onda de 360 nm a 690 nm. Além disso, no intervalo de 600 nm a 720 nm, as curvas das espécies de Proteaceae mostraram aproximação com duas espécies de Fabaceae (*Pseudopiptadenia suaveolens* e *Ormosia* sp.).

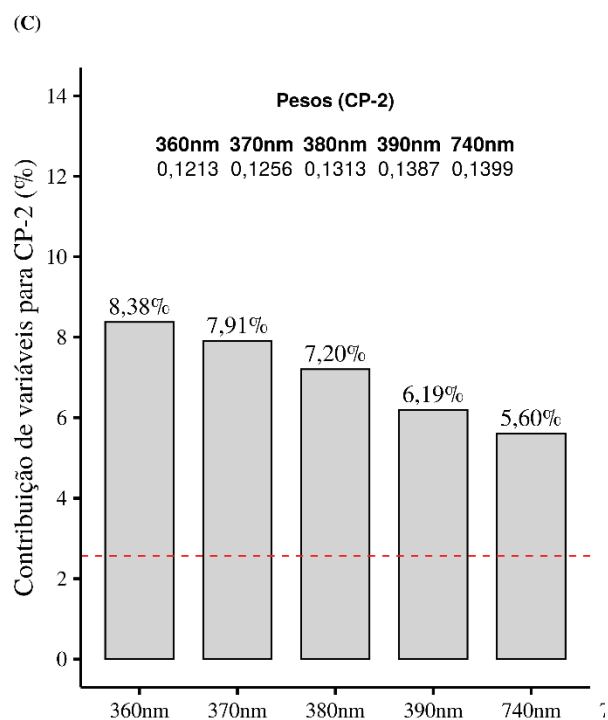
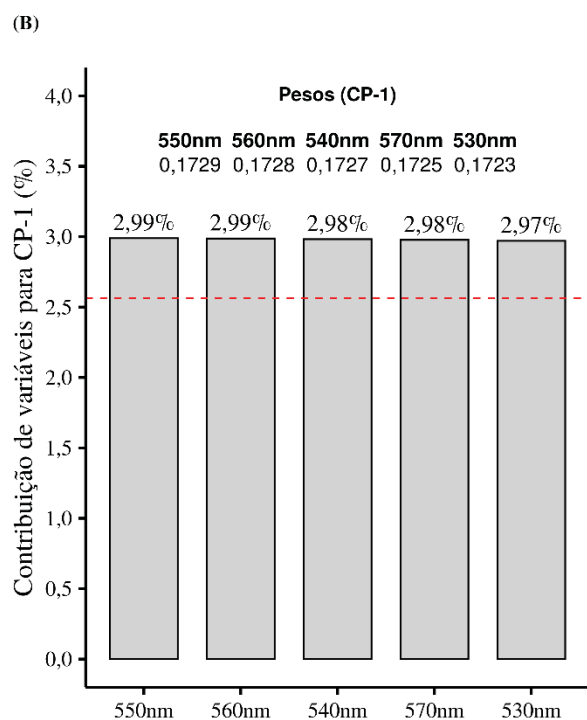
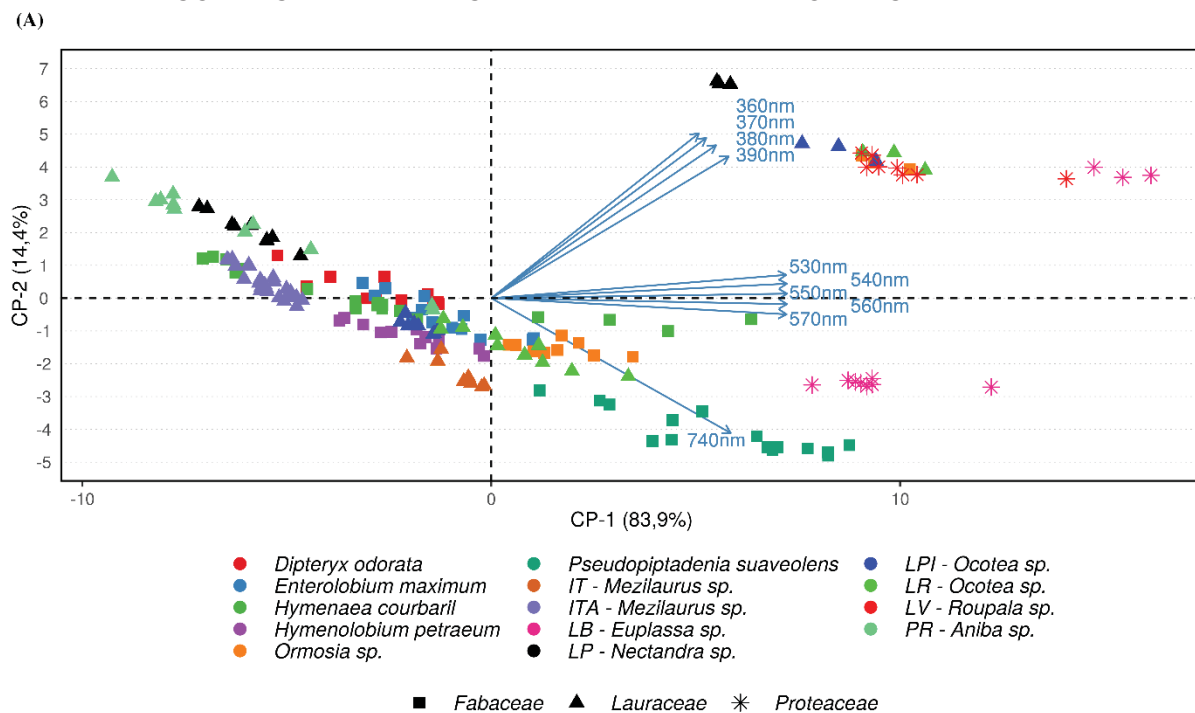
FIGURA 3.8 - ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS



FONTE: A autora (2022).

O gráfico biplot da análise de componentes principais construído usando espectros de refletância está na Figura 3.9A. A PC-1 e PC-2 responderam por 83,9% e 14,4% da variação total dos dados padronizados, alcançando uma variância explicada de 98,3%. Por meio da PCA foi possível separar as amostras de *Pseudopiptadenia suaveolens* (Fabaceae) caracterizadas por altos valores na faixa de 650 a 740 nm. As amostras das Proteaceas (LB - *Euplassa* sp. e LV - *Roupala* sp.) também foram facilmente distinguíveis das demais espécies. As demais espécies compartilharam fortes semelhanças com relação aos espectros colorimétricos. Os espectros de 530 nm a 570 nm apresentaram maior contribuição para a variância explicada pelo PC-1, enquanto os espectros de 360 nm a 390 nm e 740 nm apresentaram maiores pesos no PC-2 (FIGURA 3.9B e C).

FIGURA 3.9 - GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS ESPECTROS ORIGINAIS MÉDIOS DA REGIÃO DO VISÍVEL DE MADEIRAS COMERCIAIS DE ESPÉCIES DE TRÊS FAMÍLIAS BOTÂNICAS.

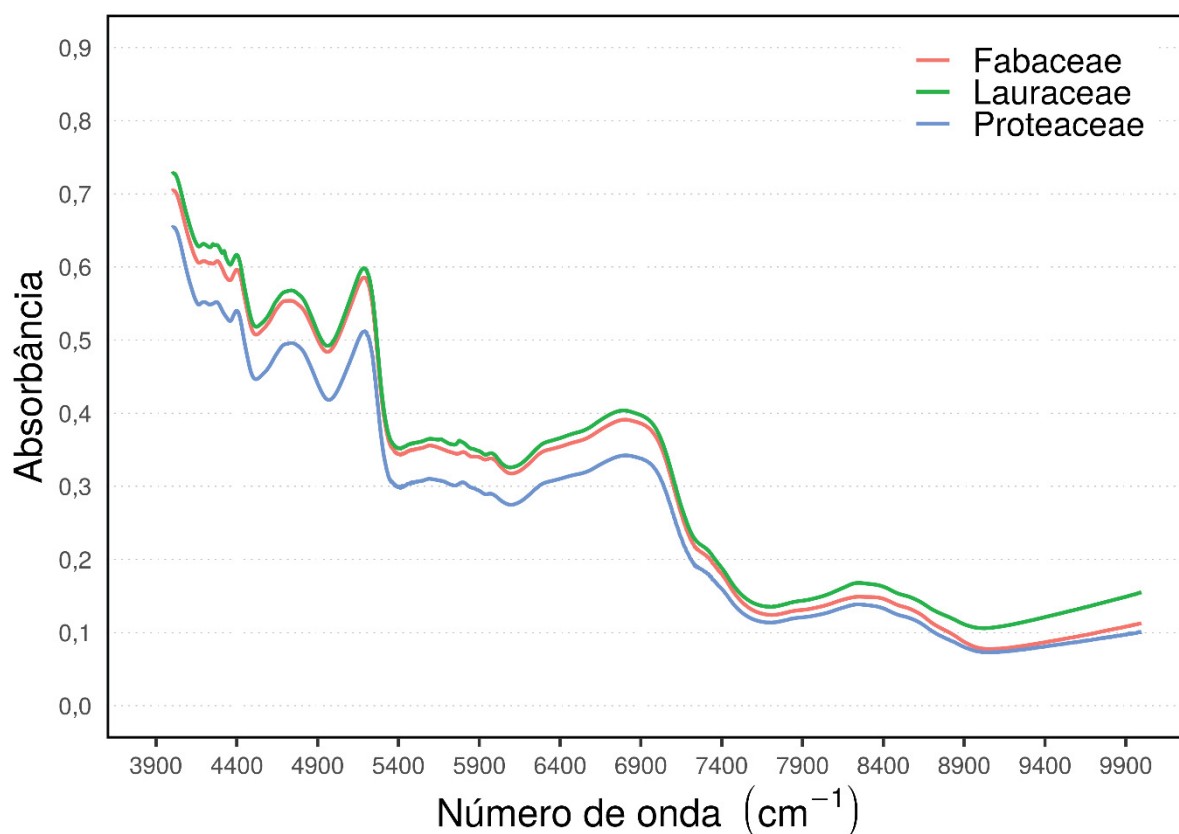


FONTE: A autora (2022).

3.3.2 Espectroscopia no infravermelho próximo

Os espectros médios do NIR para as três famílias botânicas (Fabaceae, Lauraceae e Proteaceae), na faixa espectral entre 3900 cm^{-1} a 10000 cm^{-1} (FIGURA 3.10), exibiram comportamento similar, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. Em geral, ao longo de toda faixa espectral, constatou-se menores valores de absorbância para a Família Proteaceae. Na faixa de 9000 cm^{-1} a 10000 cm^{-1} , foi observada uma tendência de afastamento da curva da família Lauraceae em relação as demais, devido ao maior aumento da intensidade de absorbância.

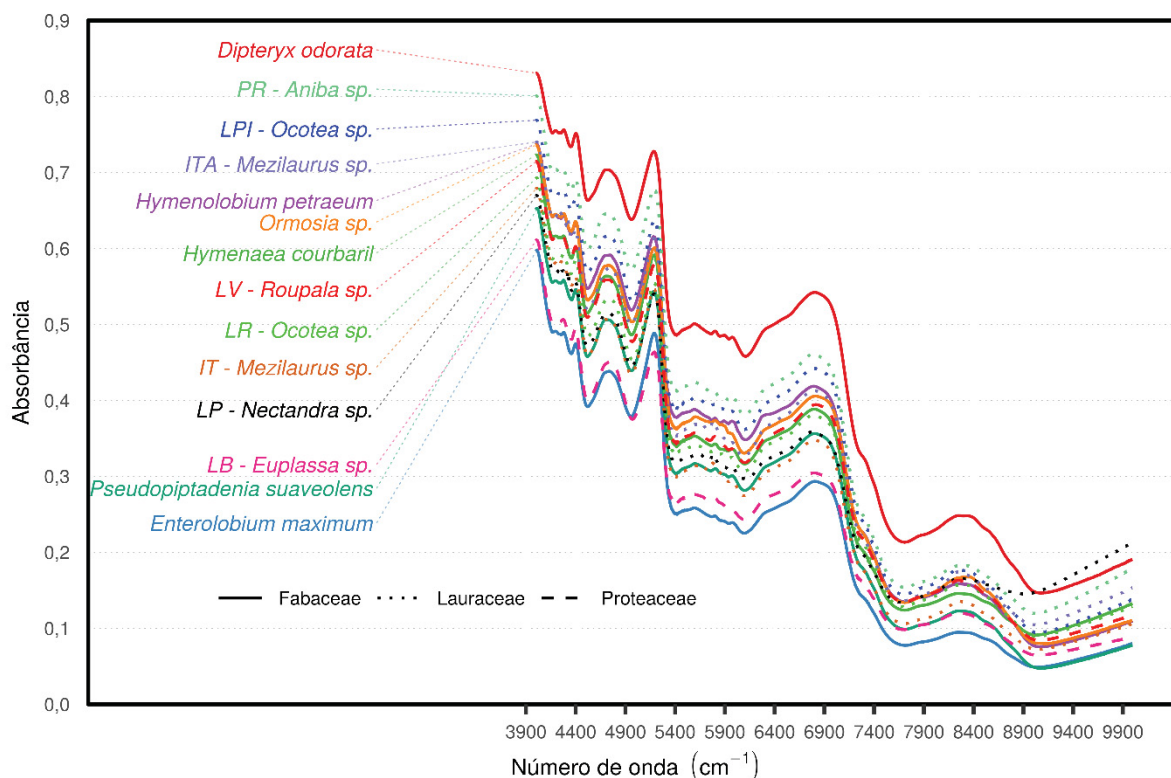
FIGURA 3.10 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS PARA AS FAMÍLIAS FABACEAE, LAURACEAE E PROTEACEAE.



FONTE: A autora (2022).

As curvas espectrais por espécie também mostraram comportamento semelhante, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. *Dipteryx odorata* foi melhor diferenciada em relação às demais, sobretudo devido aos maiores valores de absorbância, na maior parte da faixa espectral (FIGURA 3.11).

FIGURA 3.11 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS DAS 14 ESPÉCIES AVALIADAS

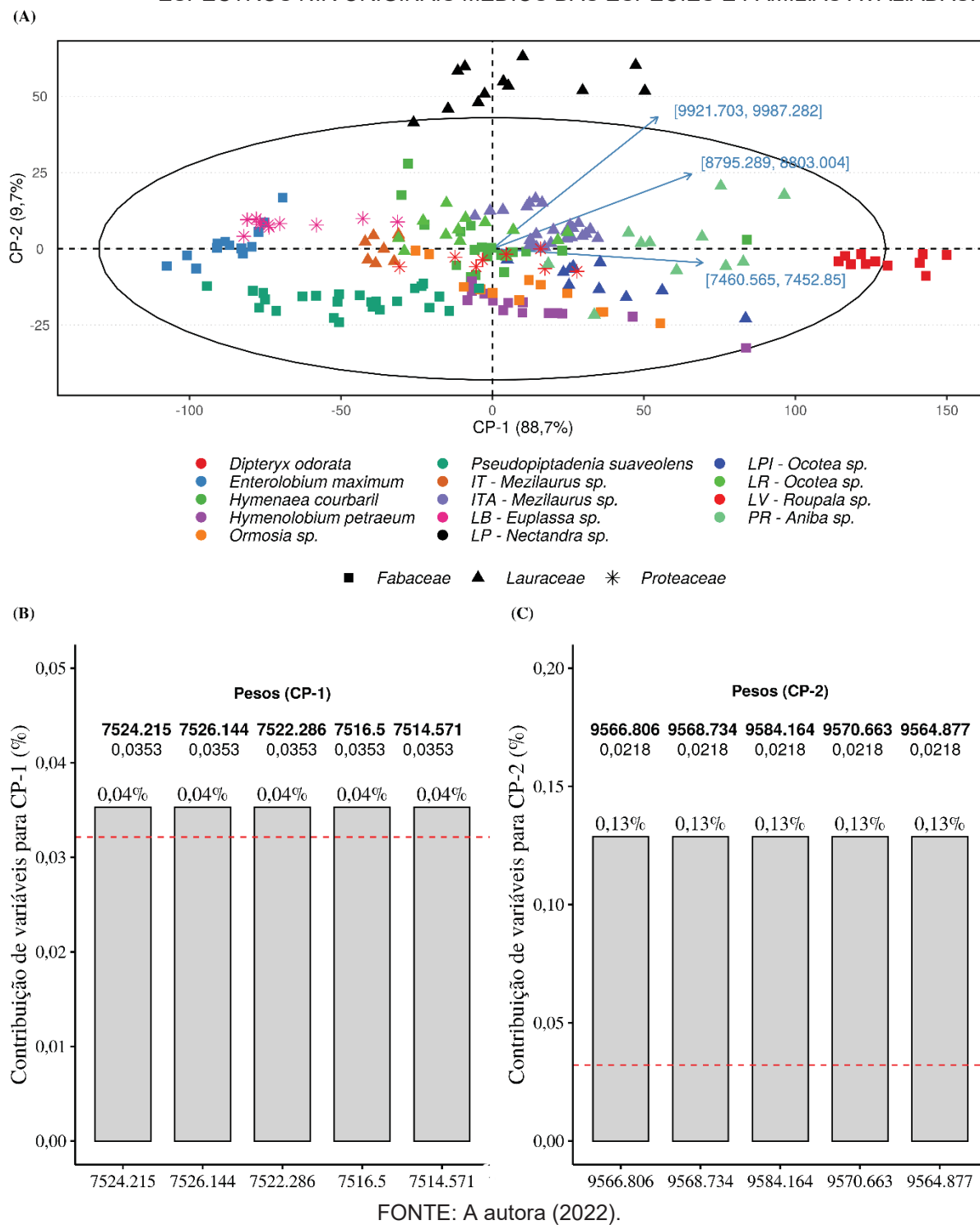


FONTE: A autora (2022).

A PCA realizada usando dados de espectros NIR de amostras de madeiras, indicou que os dois primeiros componentes principais explicaram cerca de 98,4% da variância total dos dados originais, com 88,7% e 9,7% para PC-1 e PC-2, respectivamente. Além disso, estes componentes mostraram autovalores (λ_i) maiores do que 1, sendo confiável a realização de inferências a partir destas componentes (FIGURA 3.12).

Por meio do gráfico biplot (FIGURA 3.12A) foi possível identificar maior tendência de aproximação entre as amostras de madeiras de uma mesma espécie. Contudo, somente *Dipteryx odorata* (Fabaceae) e LP - *Nectandra* sp. (Lauraceae) exibiram uma visível separação em relação às demais. As amostras de *D. odorata* e *Nectandra* sp. foram caracterizadas por possuir altos valores na faixa espectral de 7460,565 cm^{-1} a 7452,850 cm^{-1} e de 9921,703 cm^{-1} a 9987,282 cm^{-1} , respectivamente. Além disso, não foi possível encontrar uma clara separação das amostras por famílias. No entorno da coordenada central (0,0) do biplot, se concentraram amostras de espécies das três famílias (Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae) sendo, portanto, uma região de confusão entre as espécies.

FIGURA 3.12 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DOS ESPECTROS NIR ORIGINAIS MÉDIOS DAS ESPÉCIES E FAMÍLIAS AVALIADAS.



No que se refere à contribuição dos espectros NIR, identificou-se que uma faixa considerável do espectro possui igual contribuição, seja para PC-1, seja para PC-2, com correlações positivas com estas componentes. Para a PC-1 as maiores contribuições foram de espectros entre 7514,571 cm⁻¹ e 7526,144 cm⁻¹, e para a PC-2 entre 9564,877 cm⁻¹ e 9584,164 cm⁻¹.

Os dados de espectros NIR foram usados também na construção de modelos de reconhecimento de espécies ($n = 14$) usando técnicas de aprendizado de máquina. Os classificadores construídos a partir do algoritmo PLS-DA mostraram melhor desempenho preditivo, com acurácia e F1-Score superior a 97% na validação cruzada repetida (TABELA 3.1). Estes resultados foram semelhantes aos encontrados nos modelos PLS-DA construídos para discriminar somente espécies de Lauraceae (Capítulo 1) ou Fabaceae (Capítulo 2). Os modelos k -NN mostraram desempenho inferior para todos os experimentos. O modelo PLS-DA construído usando apenas dados da seção tangencial (E_3) exibiu taxa de acurácia (98,71%) e F1-Score (98,48%) ligeiramente superior. Em geral, em função do algoritmo, houve pouca diferença no desempenho preditivo dos modelos aprendidos entre experimento. Portanto, combinar dados de espectros NIR das três seções anatômicas da madeira não melhorou o desempenho preditivo dos modelos construídos.

TABELA 3.1 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.

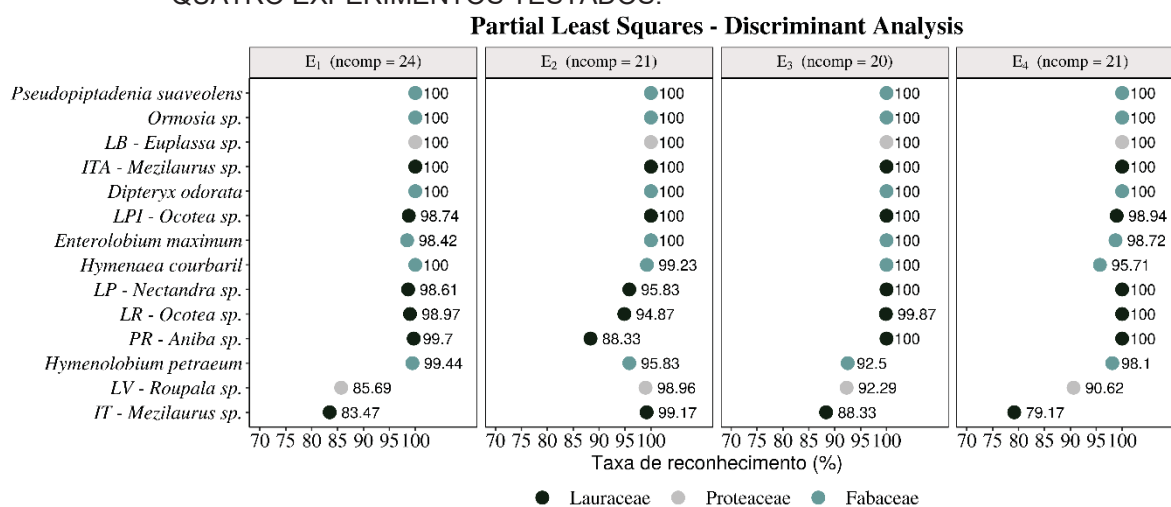
Experimento	Estatística	10x5 – Partições de Validação Cruzada								
		SVM ^a			PLS-DA			k-NN		
		HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia	F1-Score	HAO	Acurácia	F1-Score
E ₁	Média	C =	84,31	82,73		98,41	97,85		75,49	71,95
	DP	512	2,21	2,49	ncomp	1,09	1,75	k = 2	2,04	2,18
	Min.	sigma	76,38	75,56	= 24	95,54	94,58		71,27	67,76
	Máx.	= 0,01	89,09	88,33		100	100		80,63	76,50
E ₂	Média	C =	83,54	81,31		98,31	97,99		78,55	74,51
	DP	512	3,32	4,60	ncomp	1,64	2,07	k = 2	3,49	3,74
	Min.	sigma	76,26	70,29	= 21	92,98	90,69		69,66	66,95
	Máx.	= 0,01	90,65	88,81		100	100		85,77	83,49
E ₃	Média	C =	85,28	84,38		98,71	98,48		78,01	76,35
	DP	512	3,01	3,65	ncomp	1,09	1,54	k = 2	3,07	3,50
	Min.	sigma	77,90	76,36	= 20	96,49	92,97		70,24	68,13
	Máx.	= 0,01	91,67	92,30		100	100		84,19	83,89
E ₄	Média	C =	84,21	82,72		97,98	97,31		76,35	73,83
	DP	512	2,69	3,72	ncomp	1,42	1,99	k = 2	3,83	3,67
	Min.	sigma	76,42	75,65	= 21	93,75	90,27		68,22	66,72
	Máx.	= 0,01	89,02	88,42		100	100		84,21	80,13

FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: Todas as medidas são expressas como uma porcentagem. SVM = *Support Vector Machine*; PLS-DA = *Partial Least Squares Discriminant Analysis*; k -NN = *k-Nearest Neighbor*; HAO = Hiperparâmetro de Ajuste Ótimo; DP= desvio padrão na reamostragem; mín. = mínimo, máx. = máximo; E₁: classificador treinado com espectros NIR de todas as seções; E₂: classificador treinado com espectros NIR de seções transversais; E₃: classificador treinado com espectros NIR de seções tangenciais; E₄: classificador treinado com espectros NIR de seções radiais; C = custo de violação de restrições; *sigma* = parâmetro kernel de base radial, k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais. ^aRadial kernel.

O melhor desempenho no reconhecimento de espécies foi alcançado pelo classificador treinado usando apenas dados de espectros NIR da seção tangencial (E_3), em que dez espécies apresentaram 100% de reconhecimento (FIGURA 3.13). Por outro lado, as espécies LV – *Roupala* sp. e IT – *Mezilaurus* sp. foram melhor discriminadas pelo classificador PLS-DA treinado com dados NIR da seção transversal, com taxa de reconhecimento de aproximadamente 99%. Por fim, o classificador PLS-DA treinado usando dados NIR de todas as seções da madeira (E_1), permitiu reconhecer melhor *Hymenolobium petraeum*, com ligeiro aumento na taxa de reconhecimento quando comparado ao modelo PLS-DA construído usando apenas dados NIR da seção radial (E_4). Portanto, no experimento E_1 , é provável que os dados NIR da seção radial tenham contribuído com padrões mais informativos para a discriminação desta espécie.

FIGURA 3.13 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS NOS QUATRO EXPERIMENTOS TESTADOS.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: E_1 = classificador treinado usando espectros NIR de todas as seções; E_2 = classificador treinado usando espectros NIR de seções transversais; E_3 = classificador treinado usando espectros NIR de seções tangenciais; E_4 = classificador treinado usando espectros NIR de seções radiais. ncomp = número de componentes principais.

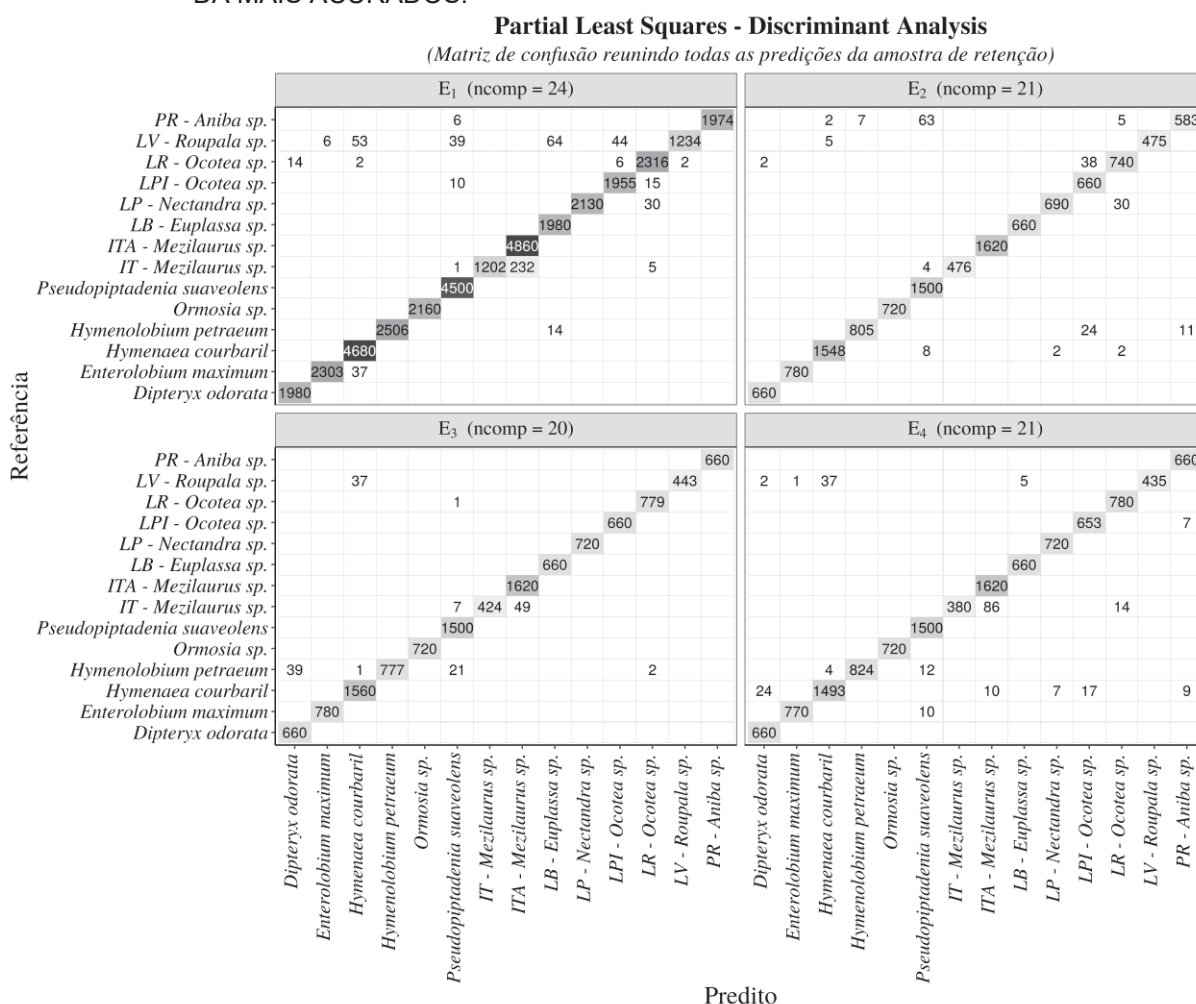
As matrizes de confusão (CM) dos classificadores PLS-DA mais acurados permitem identificar as espécies com maior taxa de confusão (FIGURA 3.14). Em geral, todos os modelos PLS-DA mostraram confusão na distinção de espécies, seja dentro da mesma família, seja entre diferentes famílias.

Em relação ao modelo PLS-DA treinado usando dados NIR de todas as seções (E_1), observou-se maior confusão para a espécie LV - *Roupala* sp.

(Proteaceae). Esta espécie foi classificada incorretamente como sendo cinco espécies distintas, ou seja, três espécies da Fabaceae (*E. maximum*, *H. courbaril* e *P. suaveolens*), uma Proteaceae (LB – *Euplassa* sp.) e uma Lauraceae (LPI – *Ocotea* sp.).

No que se refere ao modelo PLS-DA treinado usando dados NIR da seção transversal (E_2), a espécie PR – *Aniba* sp. (Lauraceae) foi classificada incorretamente como *P. suaveolens* (Fabaceae), sendo esta a maior taxa de confusão. Além disso, LR – *Ocotea* sp. foi classificada como LPI - *Ocotea* sp., e LP – *Nectandra* sp. foi classificada como LR – *Ocotea* sp.

FIGURA 3.14 - MATRIZ DE CONFUSÃO COM AS PREVISÕES NA AMOSTRA DE RETENÇÃO DA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA PARA OS QUATRO CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADOS.



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: E_1 = classificador treinado usando espectros NIR de todas as seções; E_2 = classificador treinado usando espectros NIR de seções transversais; E_3 = classificador treinado usando espectros NIR de seções tangenciais; E_4 = classificador treinado usando espectros NIR de seções radiais. ncomp = número de componentes principais.

No que tange aos modelos PLS-DA treinados usando dados NIR das seções tangencial (E₃) ou radial (E₄), as maiores taxas de confusão foram encontradas entre IT – *Mezilaurus* sp. e ITA – *Mezilaurus* sp., pertencentes à Lauraceae. Do mesmo modo, espécies de diferentes famílias foram confundidas, quando LV – *Roupala* sp. (Proteaceae) foi classificada incorretamente como *Hymenaea courbaril* (Fabaceae), por ambos os classificadores. Em particular, o modelo PLS-DA para seção tangencial, também apresentou muita confusão entre *Hymenolobium petraeum* e *Dipteryx odorata*.

3.4 CONCLUSÕES

A técnica de colorimetria permitiu discriminar espécies de diferentes famílias. Em geral, os valores dos parâmetros colorimétricos são influenciados pela seção anatômica da madeira e, comumente, variam entre espécies, sejam estas da mesma família, sejam de famílias diferentes. Na colorimetria, os parâmetros com maiores potenciais de distinção entre as espécies foram L^* , b^* e h . Na espectroscopia do visível, as regiões dos espectros de 530 nm a 570 nm apresentaram maior contribuição para a variância explicada pelo PC-1, enquanto os espectros de 360 nm a 390 nm e 740 nm apresentaram maiores pesos no PC-2.

Em nível de família ou de espécie, as curvas espectrais do NIR foram semelhantes, sendo que a principal diferença está na intensidade de absorbância. Em geral, ao longo de toda faixa espectral, a absorbância foi menor para a família Proteaceae. Um maior aumento na intensidade de absorbância foi identificado para a família Lauraceae, na faixa espectral entre (9000 cm^{-1} e 10000 cm^{-1}). *Dipteryx odorata* foi melhor diferenciada, devido à maior intensidade de absorbância ao longo da maior parte da faixa espectral.

Na Análise de Componentes Principais (PCA) não foi possível encontrar uma clara separação das amostras por famílias. Porém, foi possível identificar maior tendência de aproximação entre as amostras de madeiras de uma mesma espécie. Apenas *Dipteryx odorata* (Fabaceae) e LP - *Nectandra* sp. (Lauraceae) exibiram uma visível separação em relação às demais.

Classificadores altamente acurados podem ser alcançadas combinando dados NIR e técnicas de aprendizado de máquina. O melhor modelo de reconhecimento de espécies foi encontrado quando usando dados NIR da seção tangencial da madeira e o algoritmo PLS-DA, cuja acurácia foi de 98,71% e F1-Score de 98,48%. Portanto, existem evidências de que dados de NIR guardam padrões relevantes para separação de espécies arbóreas.

REFERÊNCIAS

- ARCE, N.; MOYA, R. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. **Cerne**, v.21, n.3, p.353-362, 2015.
- BARROS, S.V.S.; MUÑIZ, G.I.B.; MATOS, J.L. Colorimetric characterization of three wood species from the Amazon Forest. **Cerne**, v.20, n.3, p.337-342, 2013.
- CADEMARTORI, P.H.G; SCHNEID, E.; GATTO, D.A.; STANGERLIN, D.M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas Ciencia y tecnología**, v.15, n., p.57-64, 2013.
- CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v.5, n.71, p.30-41, 2001.
- CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação**. IBAMA, Brasília, 2002. 28p.
- GONÇALEZ, J.C.; MARQUES, M.H.B.; KARAS, M.C.S.; JANIN, G.; RIBEIRO, P.G. 2014. Effect of drying process on Marupá wood color. **Maderas Ciencia y tecnología**, v.16, n.3, p.337-342, 2014.
- LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR R: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.
- NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAINADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v.46, n.4, p.267-272, 2000.
- SILVA, R.A.F.; SETTER, C.; MAZETTE, S.S.; DE MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M. (2017). Colorimetry of wood from thirty tropical species. **Ciência da Madeira**, v.8, n.1, p.36-41, 2017.
- SOARES, L. F.; SILVA, D. C.; BERGO, M. C. J.; CORADIN, V. T. R.; BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeira Amazônicas. **Química Nova**, São Paulo, v.40, n.4, p.418 - 426, 2017.
- SOTELO MONTES, C.S.; WEBER, J. C.; GARCIA, R.A.; SILVA, D.A.; MUÑIZ, G.I. Variation in wood color among natural populations of five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. **Canadian Journal of Forest Research**, v.43, n.6, p.552-562, 2013.
- SOUSA, W. C. S.; BARBOSA, L. J.; SOARES, A. A. V.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO T.P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v.25, n.4, p.451-462, 2019.

THULEAU, S.; HUSSON, F. **FactoInvestigate: Automatic Description of Factorial Analysis**. R package version 1.6. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=FactoInvestigate>>. Acesso em 12 nov, 2020.

TORRES, S.S.; JOMA, A.W.M.; PUIGGALI, J.R. Colour alteration and chemistry changes in oak wood (*Quercus pedunculata*) during plain vacuum drying. **Wood Science and Technology**, v.46, n.1, p.177-191, 2012.

TSUCHIKAWA, S.; INOUE, K.; NOMA, J.; HAYASHI, K. Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination. **Journal of Wood Science**, v.49, n.1, p.0029-0035, 2003.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. 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.

VIDAL, E.; VIANA, V.M.; BATISTA, J.L.F. Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo florestal na Amazônia oriental. **Scientia forestalis**, n.61, p.133-143, 2002.

VIEIRA, H. C.; DA SILVA, E.L.; DOS SANTOS, J.X.; DE MUÑIZ, G. I.B.; MORRONE, S.R.; NISGOSKI, S. Wood colorimetry of native species of Myrtaceae from an Araucaria forest. **Floresta**, v.49, n.2, p.353-362, 2019.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. 319p.

YANG, J.L.; EVANS, R. Prediction of MOE of *Eucalyptus* wood from microfibril angle and density. **Holz als roh-und werkstoff**, v.61, n.6, p.449-452, 2003.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação de espécies é sem dúvida um dos principais desafios do Manejo Florestal Sustentável - MFS, seja devido à elevada biodiversidade, seja em razão da escassez de profissionais qualificados para esta tarefa. Neste estudo, as técnicas apresentaram potencial de distinção de espécies. É imprescindível, sobretudo, a composição de um banco, com dados colorimétricos e de espectros NIR, representativos da diversidade de espécies comerciais da floresta Amazônica, com intuito de potencializar a capacidade de diferenciação em nível de espécie, com o auxílio da estatística multivariada e de modelos preditivo.

CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS

A experiência adquirida durante o desenvolvimento desta pesquisa permitiu sumarizar alguns argumentos favoráveis e contra-argumentos no emprego das técnicas de colorimetria-espectroscopia no visível e Espectroscopia no Infravermelho Próximo – NIR (QUADRO 1).

QUADRO 1 - ARGUMENTOS FAVORÁVEIS E CONTRA-ARGUMENTOS NO EMPREGO DAS TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DISCRIMINAÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS.

	Argumentos favoráveis	Contra-argumentos
Espectroscopia no visível	- Abordagem não-destrutiva: não requer a obtenção de amostras de madeiras por abordagem destrutiva; - Análise laboratorial: menos complexa e mais ágil do que a caracterização anatômica; - Pessoas especializadas: não exige mão de obra especializada para aquisição dos dados colorimétricos; e - Fiscalização ambiental: o colorímetro portátil pode ser facilmente transportado e usado em atividades de campo, como na fiscalização ambiental. Para isso, porém, é necessário desenvolver sistema integrado capaz de coletar dados colorimétricos da madeira e processá-los em tempo real, e fornecer uma resposta automatizada sobre a identidade da espécie (ou gênero).	- Fatores que afetam a cor: diversos fatores (ambientais, genéticos, químicos, posição no tronco, exposição a luz, oxidação, entre outros) podem influenciar a cor da madeira; - Dados da superfície: os dados colorimétricos são extraídos somente da superfície da madeira; e - Falta de dados: a dificuldade de construir uma base de dados representativa limita o desenvolvimento de um sistema de reconhecimento baseado em dados colorimétricos.
Espectroscopia no infravermelho próximo	- Abordagem não-destrutiva: não requer a obtenção de amostras de madeiras por abordagem destrutiva; - Análise laboratorial: menos complexa e mais ágil do que a caracterização anatômica; - Pessoas especializadas: não exige mão de obra especializada para aquisição somente das leituras no equipamento; - Resposta química: os dados de espectros NIR são em essência uma resposta química da madeira. Portanto, o feixe de luz emitido tem maior capacidade de penetração no material quando comparado à colorimetria; e - Fiscalização ambiental: o NIR portátil também tem potencial de aplicação em atividades de campo. Porém, similar à técnica de colorimetria, é fundamental o desenvolvimento de um sistema integrado para coleta e processamento de espectros NIR, pela aplicação de técnicas estatísticas.	- Ajuste e calibração: é necessário ajustar e calibrar o aparelho NIR para uso. Isso, por sua vez, demanda treinamento e conhecimento do operador; - Custo de aquisição: NIR portátil é uma tecnologia potencial para implementação em atividades de campo, porém o custo de aquisição é alto; e - Falta de dados: a dificuldade de construir uma base de dados representativa limita o desenvolvimento de um sistema de reconhecimento baseado em espectros NIR. Também a transferência de dados brutos entre equipamentos é uma barreira a ser vencida.

FONTE: A autora (2022).

CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MADEIRAS AVALIADAS

As análises das características anatômicas das amostras de madeiras sólidas das espécies comerciais oriundas das Famílias botânicas Lauraceae, Proteaceae e Fabaceae, confirmou a grande semelhança entre espécies, com mínimas diferenças de caracteres anatômicos, tanto em níveis macroscópicos quanto em microscópicos. Evidenciou-se, assim, a necessidade de procedimentos mais eficazes de identificação de espécies com potencial madeireiro em inventários florestais sustentáveis

destinados à aprovação de Projetos de Manejo Florestal Comunitário em Reserva Extrativista, especialmente no Estado do Pará, haja vista que espécies florestais diferentes possivelmente podem estar sendo agrupadas sob o mesmo nome vernacular.

Pesquisas futuras:

Recomenda-se que pesquisas sejam desenvolvidas de forma integrada entre instituições nacionais e internacionais, com experiência em estudo de madeiras tropicais, que disponham de novas tecnologias que possam ser adaptadas às regiões Amazônicas e, que permitam a transferência e o intercâmbio de conhecimento.

REFERÊNCIAS GERAIS

AHMAD, I.; BASHERI, M.; IQBAL, M.J.; RAHIM, A. Performance comparison of support vector machine, random forest, and extreme learning machine for intrusion detection. **IEEE Access**, n.6, p.33789–33795, 2018.

ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. **IAWA Journal**, v.21, n.1, p.3-30, 2000.

ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 2. Axial parenchyma, rays and fibres. **IAWA Journal**, v.23, n.4, p.391-418, 2002.

ARAÚJO, H.J.B. **Agrupamento de madeiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas**. Piracicaba, 184p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

ARCE, N.; MOYA, R. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. **Cerne**, v.21, n.3, p.353-362, 2015.

BAAR, J.; WIMMER, R.; D'AMICO, S. Dependence of colour and discolouration on total extractive content of African Padauk and Jatobá. **Wood Science and Technology**, v.48, n.6, p.1155-1165, 2014.

BAAS, P. Systematic, phylogenetic, and ecological wood anatomy - history and perspectives. In *New perspectives in wood anatomy*. **Springer Science**, v.1, p.23-58, 1982.

BARROS, P. L. C.; SILVA JÚNIOR, A. T. Equação de volume para árvores de uma floresta tropical densa no município de Anapu, oeste do estado do Pará, Amazônia oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 51, p.115-126, 2009.

BARROS, S.V.S.; MUÑIZ, G.I.B.; MATOS, J.L. Colorimetric characterization of three wood species from the Amazon Forest. **Cerne**, v.20, n.3, p.337-342, 2013.

BERGO, M.C, PASTORE, T.C.; CORADIN, V.T.; WIEDENHOEFT, A.C.; BRAGA, J.W. NIRS identification of *Swietenia macrophylla* is robust across specimens from 27 countries. **IAWA Journal**, v.37, n.3, 420–430, 2016.

BERNAL, R.A.; CORADIN, V.; CAMARGOS, J.; COSTA, C.; PISSARRA, J. Wood anatomy of Lecythidaceae species called tauari. **IAWA Journal**, v.32, n.1, p.97–112, 2011.

BERTI, R. N.; ABBATE M. L. E. **Legnami tropicali importati in Italia: anatomia e identificazione**. Vol. II. America Latina. CNR, Firenze.1992. 406p.

BOTOSSO, P.C. **Identificação Macroscópica de Madeiras**: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Embrapa Florestas, Colombo, 2011. 65p.

BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M.; CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; DA SILVA, A. R. The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla* (Cites Appendix II). **IAWA Journal**, v. 32, n. 2, p. 285-296, 2011.

BRANDES, A. F. N.; NOVELLO, B. Q.; LEMOS, D. N.; NASCIMENTO, L. B.; ALBUQUERQUE, R. P.; TAMAIO, N.; BARROS, C. F. Wood anatomy of endangered Brazilian species. **IAWA Journal**, v.41, n.4, 510-576, 2020.

BRASHAW, B.K.; BUCUR, V.; DIVOS, F. Nondestructive testing and evaluation of wood: a worldwide research update. **Forest Products Journal**, v.59, n.3, p.7-14, 2009.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154P.

CADEMARTORI, P.H.G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v.15, n.1, p.57-64, 2013.

CAIAFA, A.N.; MARTINS, F.R. Taxonomic identification, sampling methods, and minimum size of the tree sampled: implications and perspectives for studies in the Brazilian Atlantic Rainforest. **Functional Ecosystems and Communities**, v.1, n.2, p.95-104, 2007.

CALLADO, C. H.; ROIG, F. A.; TOMAZELLO-FILHO, M.; BARROS, C.F. Cambial growth periodicity studies of South American woody species – a review. **IAWA Journal**, v. 34, n. 3, p. 213-230, 2013.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, v.5, n.71, p.30-41, 2001.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v.9, n.4, p.83-98, 2009.

CHATTAWAY, M.M. The wood anatomy of the Proteaceae. **Australian Journal of Biological Sciences**, v.1, n.3, p.279-302, 1948.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A.; PASTORE, T.C.M.; CHRISTO, A.G.
Madeiras Comerciais do Brasil: Chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 2010.

COSTA, M.L.M.N.; BAJGIELMAN, T. **Estratégia nacional para a conservação ex situ de espécies ameaçadas da Flora Brasileira.** Centro Nacional de Conservação da Flora-CNCFlora: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2016. 24p.

COSTER, C. **Zur anatomie und physiologie der zuwachszone-und jahresringbildung in den tropen.** Leiden Brill, 225p. Dissertação (Doctoral Agricultura e Veterinária). Universidade de Wageningen, 1927.

DETENNE, P.; JACQUET, P. **Atlas d'identification des bois de l'amazonie et des régions voisines.** Centre Technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne 1983. 640p.

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**, v.20, n.4, p.437-447, 2012.

FEELEY, K.J.; SILMAN, M.R. Extinction risks of Amazonian plant species. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America - PNAS**. v.106, n.30, p.12382-12387, 2009.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA D.A, FERREIRA, M.E.B. 2013. **Package 'ExpDes.Pt'**. 2013.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA D.A. ExpDes.pt: **Pacote Experimental Designs. R package version 1.2.0.** <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>. 2018.

FLORA DO BRASIL. **Fabaceae in Flora do Brasil 2020 em construção.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB115>>. Acesso em 6 dez. 2021.

FLORA DO BRASIL. **Lauraceae in Flora do Brasil 2020 em construção.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em 21 janeiro de 2020.

FORZZA, R.C.; BAUMGRATZ, J.F.A.; BICUDO, C.E.M.; CARVALHO, J.R.A.A.; COSTA, A.; COSTA, D.P.; HOPKINS, M.; LEITMAN, P.M.; LOHMANN, L.G.; MAIA, L.C.; MARTINELLI, G.; MENEZES, M.; MORIM, M.P.; COELHO, M.A.N.; PEIXOTO, A.L.; PIRANI, J.R.; PRADO, J.; QUEIROZ, L.P.; SOUZA, V.C.; STEHMANN, J.R.; SYLVESTRE, L.S.; WALTER, B.M.T.; ZAPPI, D. **Catálogo das Plantas e Fungos**

do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 878p.

FRANKLIN, G.L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature, London**, v.155, n.3924, p.51-51, 1945.

GASSON, P. How precise can wood identification be? Wood anatomy's role in support of the legal timber trade, Especially CITES. **IAWA Journal**, v.32, n.2, p.137–154, 2011.

GEGZNA, V. **ManyROC: tools for ROC analysis**. Disponível em: <[https:// github. com/ gegzn av/ manyR OC](https://github.com/gegzn av/ manyR OC)>. Acesso em 12 nov.2020.

GONÇALEZ, J.C.; MARQUES, M.H.B.; KARAS, M.C.S.; JANIN, G.; RIBEIRO, P.G. 2014. Effect of drying process on Marupá wood color. **Maderas Ciencia y tecnología**, v.16, n.3, p.337-342, 2014.

GOTTLIEB, O. R. Chemosystematics of the Lauraceae. **Phytochemistry**, v.11, n.5, p.1537-1570,1972.

GUMA, R.; BALDIN, T.; DENARI, L.; HASELEIN, C. R.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de *Tetrorchidium rubrivenium* Poepp. & End. (Euphorbiaceae), **Balduinia**, n. 47, p. 12-18, 2015.

HECHENBICHLER, K.; SCHLIEP, K. **Weighted k-nearest-neighbor techniques and ordinal classification Sonderforschungsbereich**. Disponível em <[https://epub.ub.uni- muenchen.de/](https://epub.ub.uni-muenchen.de/)>. Acesso em 26 abril 2022.

HEIN, P.R.G.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung**, v.64, n.1, p.45-54, 2010.

HOADLEY, R. B. **Identifying wood: accurate results with simple tools**. Taunton Press. 1990. 248p.

HWANG, S.W.; KOBAYASHI, K.; ZHAI, S.; SUGIYAMA, J. Automated identification of lauraceae by scale-invariant feature transform. **Journal of Wood Science**, v.64, n.2, 69–77, 2018.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features of hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v.10, n.3, p.219-332, 1989.

IBÁ. **RELATÓRIO ANUAL**: Indústria Brasileira de árvores. Brasília: 1ed. 2016, 100p.

INCRA (Brasília, DF). Instrução normativa nº 65 de 27 de dezembro de 2010. **Estabelece critérios e parâmetros para as atividades de manejo florestal sustentável em projetos de assentamento.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, n. 251, 31 dez. 2010.

JANSEN, W. A. 1962. **Botanical histochemistry**. WF Freeman and Co, San Francisco.

KARATZOGLOU, A.; SMOLA, A.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. kernlab—an S4 package for kernel methods in R. **Journal of Statistical Software**, v.11, n.9, p.1–20, 2004.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.5. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>>. Acesso em 10 jan. 2017.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v.28, n.5, p.1–26, 2008.

KUHN, M. Contributions from Jed Wing, Steve Weston, Andre Williams, Chris KEEFER, Allan Engelhardt, Tony Cooper, Zachary Mayer, Brenton Kenkel, the R Core Team, Michael Benesty, Reynald Lescarbeau, Andrew Ziem, Luca Scrucca, Yuan Tang, Can Candan and Tyler Hunt. 2016. caret: **Classification and Regression Training. R package version 6.0-73**. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=caret>. Acesso em 3 de nov.2019.

KUHN, M.; JOHNSON, K. 2013. **Applied predictive modeling**. Springer, New York.

KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; COOPER, T.; MAYER, Z.; KENKEL, B.; THE R CORE TEAM, BENESTY M, LESCARBEAU, R.; ZIEM, A.; SCRUCICA, L.; TANG, Y.; CANDAN, C.; HUNT, T. 2016. **Caret: classification and regression training**. R package version 6.0-73.

LAZARESCU, C.; HART, F.; PIROUZ, Z.; PANAGIOTIDIS, K.; MANSFIELD, S.D.; BARRETT, J.D.; AVRAMIDIS, S. Wood species identification by near infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v.8, n.1, p.32–35, 2017.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR R: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.

LEWIS, G. P.; SCHRIRE, B.; MACKINDER, B.; LOCK, M. (Eds.). **Legumes of the World**. Royal Botanic Gardens Kew. 2005. Disponível em: <https://play.google.com/store/books/details?id=iC9FAQAIAAJ>. Acesso em 05 maio. 2022.

LI, C.; QIU, Z.; LIU, C. An improved weighted k-nearest neighbor algorithm for indoor positioning. **Wireless Personal Communication**, v.96, n.2, p.2239–2251, 2017.

LONGUI, E.L.; ASSAD, A.; ARZOLLA, F. A.; VILELA, F.E.; BAITELLO, J.B.; DE LIMA, I.L.; FLORSHEIM, S.M. Ecological wood anatomy of *Ocotea curucutuensis*. **IAWA Journal**, v.35, n.4, p.356-362, 2014.

LUAN, Q. F.; LI, Y. J.; JIANG, J. M.; YUE, H. F.; DIAO, S. F. Discrimination of *Pinus taeda* x *P. caribaea* var. *hondurensis* between its allele-species and hybrids using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.21, n.3, p.203-211, 2013.

MACHADO, P. F. S.; MARCHIORI, J. N. C.; SIEGLOCH, A. M. Anatomia da madeira de *Enterolobium glaziovii* (Benth.) Mesquita. **Balduinia**, n.50, p.11-15, 2015.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A. **Livro vermelho da flora do Brasil**. Rio de Janeiro: CNCFlora Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1 ed. 2013, 1100p.

MCROBERTS, R. E.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Optimizing the k-nearest neighbors technique for estimating forest aboveground biomass using airborne laser scanning data. **Remote Sensing and Environment**, n.163, p.13– 22, 2015.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; DE CASTRO, V. G.; DE SOUZA, M. J. C.; DE MEDEIROS, D. T. Grouping of commercial tropical timber using wood color. **Revista de Ciências Agrárias**, v.62, p.1-6, 2019.

MENNEGA, A.M.W. Wood anatomy of the genus *Euplassa* and its relation to other Proteaceae of the Guianas and Brazil (Botanical Museum and Herbarium, Utrecht). **Acta Botanica Neerlandica**, v.15, p.117-129, 1966.

MEVIK, B. H.; WEHRENS, R.; LILAND, K. H. pls: **Partial Least Squares and Principal Component Regression**. R package version 2.7-3, 2020.

MILLER, R. B. Fluorescent woods of the world. IN: J.H. Flynn, Jr. (ed.), **A Guide to the More Useful Woods of the World**. Forest Products Society, Madison, WI. 2007. 305p.

MUÑIZ, I. B.; CARNEIRO, M. E.; BATISTA, R.; RODRIGUES, F.; SCHARDOSIN, F.Z.; NISGOSKI, S. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. **Maderas Ciencia y tecnología**, v.18, n.3, 505-522, 2016.

NELSON, N.D.; MAEGLIN, R.R.; WAHLGREN, H.E. Relationship of black walnut wood color to soil properties and site. **Wood and Fiber Science**, v.1, n.1, p.29-37, 1969.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.I.B.; GONÇALVES, T.A.P.; BALLARIN, A. Use of visible and near-infrared spectroscopy for discrimination of eucalypt species by examination of solid samples. **Journal of Tropical Forest Science**, v.29, n.3, p.371-379, 2017.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; CHANSON, B.; DETIENNE, P.; GRIL, J.; THIBAUT, B. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. **Journal of Wood Science**, v.44, n.1, p.3-8, 1998.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAINADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v.46, n.4, p.267-272, 2000.

OLIVEIRA, E.M.; BRAGA, J.W.B.; COSTA, A.F. Discriminação de madeiras similares por fluorescência molecular e mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, São Paulo, v.38, n.0015200, p.1-4, 2015.

PACE, J.H.C.; LATORRACA, J.V.F.; HEIN, P.R.G.; CARVALHO, A.M.; CASTRO, J.P.; SILVA, C.E.S. Wood species identification from Atlantic Forest by near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, v.28, n.3, p.3-15, 2019.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives—a review. **Analytica Chimica Acta** v.1026, p.8-36, 2018.

PASTORE, T.C.; BRAGA, J.W.B.; CORADIN, V.T.R.; MAGALHÃES, W.L.E.; OKINO, E.Y.A.; CAMARGO, J.A.A.; MUÑIZ, G.I.B.; BRESSAN, O.A.; DAVRIEUX, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: Discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixa. **Holzforschung**, v.65, n.1, p.73-80, 2011.

PASTORE, T.C.M.; SANTOS, K.O.; RUBIM, J.C.A spectrocolorimetric study on the effect of ultraviolet irradiation of four tropical hardwoods. **Bioresource Technology**, v.93, n.1, p.37-42, 2004.

PAULA, J.D.; COSTA, K.P. **Densidade da madeira de 932 espécies nativas do Brasil**. Cinco Continentes, Porto Alegre, (ed) Cinco continentes. 2011. 248p.

PAULA, J.E.; ALVES, J.L.H. **Madeiras Nativas do Brasil: Anatomia; Dendrologia; Produção; Uso**. Porto Alegre, (ed) Cinco continentes. 2007. 438p.

RAMALHO, F.M.; ANDRADE, J.M.; HEIN, P.R. Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. **Forest Systems**, v.27, n.2, p.4, 2018.

RIBEIRO, J.E.L.S.; HOPKINS, M.J.G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.A.; COSTA, M.D.S.; BRITO, J.D. **Guia de identificação das plantas vasculares de uma Floresta de Terra-Firme na Amazônia Central**. Flora da Reserva Ducke Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus. 1999.

RICHTER, H.G. Wood and bark anatomy of Lauraceae. I. Aniba Aublet. **IAWA Journal**, v.2, p.79-87, 1981.

ROHWER, J.G. **Lauraceae**. IN: KUBITZKI, K.; ROHWER, J.G.; BITTRICH, V. (eds) Flowering Plants Dicotyledons. The Families and Genera of Vascular Plants. 1993. 391p.

ROQUE, R.M.; CORTÉS, M. G.; MORENO, J. R. Clave de identificación macroscópica para 22 especies maderables de Bolivia. **Revista Forestal Venezolana**, v.51, n.2, p.179-193, 2007.

SANTANA, F.B.; SOUZA, A. A. M.; ALMEIDA, M. R.; BREITKREITZ, M. A. C.; FILGUEIRAS, P. R.; SENA, M. M.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para classificação de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio combinado com análise discriminante por mínimos quadrados parciais: Um tutorial, Parte V. . **Química Nova**, v.43, n.3, p.371– 381, 2020.

SANTOS, J.X.; VIEIRA, H.C.; SOUZA, D.V.; MENEZES, M.C.; MUNIZ, G.I.B.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Discrimination of “Louros” wood from the Brazilian Amazon by near-infrared spectroscopy and machine learning techniques. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.79, p.989-998, 2021.

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

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo – 2013**: dados de 2007-2012. Brasília: SFB, 2013. 188p.

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONCALVES, L. S. A. **AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences**. R package version 1.2.7. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>>. Acesso em 10 mar. 2022.

SILVA, E.S.; STANGERLIN, D.M.; GATTO, D.A.; CALEGARI, L.; PARIZ, E. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ciência da Madeira**, v.6, n.1, p.31-37, 2015.

SILVA, R.A.F.; SETTER, C.; MAZETTE, S.S.; DE MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. **Ciência da Madeira**, v.8, n.1, p.36-41, 2017.

SINGH, M.K.; SHARMA, M.; SHARMA, C.L. Wood anatomy of some members of family Lauraceae with reference to their identification. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v.12, n.2, p.137-144, 2015.

SNEL, F. A.; BRAGA, J.W.; DA SILVA, D.; WIEDENHOEFT, A.C.; COSTA, A.; SOARES, R.; CORADIN, V. T. R; PASTORE, T.C. Potential field-deployable NIRS identification of seven *Dalbergia* species listed by CITES. **Wood Science and Technology**, v.52, n.5, p.1411-1427, 2018.

SO, C.L.; VIA, B. K.; GROOM, L. H. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**, v.54, n.3, p.6-16, 2004.

SOARES, L. F.; SILVA, D. C.; BERGO, M. C. J.; CORADIN, V. T. R.; BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeira Amazônicas. **Química Nova**, São Paulo, v.40, n.4, p.418 - 426, 2017.

SOARES, W.F.; MELO, L.E.L.; LISBOA, P.L.B. Anatomia do lenho de cinco espécies comercializadas como 'sucupira'. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.1, p.114- 125, 2014.

SOFFIATTI, P.; BOEGER, M.R.T.; NISGOSKI, S.; KAUAI, F. Wood anatomical traits of the araucaria forest, southern Brazil. **Bosque**, v.37, n.1, p.21-31, 2016.

SONG, Y.; LIANG, J.; LU, J.; ZHAO, X. An efficient instance selection algorithm for k nearest neighbor regression. **Neurocomputing**, n.251, p.26–34, 2017.

SONSIN, J. A.; GASSON, P.; MACHADO, S. R.; CAUM, C.; MARCATI, C. R. **Atlas da diversidade de madeiras do cerrado paulista**. Fepaf, Botucatu. 2014.

SOSEF, M.S.M.; HONG, L.T.; PRAWIROHATMODJO, S. (eds.). **Plant Resources of South-East Asia. No. 5 (3). Timber trees: Lesser-known timbers**. Backhuys Publishers, Leiden. 1998. 859p.

SOTELO MONTES, C.S.; WEBER, J. C.; GARCIA, R.A.; SILVA, D.A.; MUÑIZ, G.I. Variation in wood color among natural populations of five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. **Canadian Journal of Forest Research**, v.43, n.6, p.552-562, 2013.

SOTELO-MONTES, C.; HERNÁNDEZ, R.E.; BEAULIEU, J.; WEBER, J.C. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **New Forests**, v.35, p.57-73, 2008.

SOUSA, W. C. S.; BARBOSA, L. J.; SOARES, A. A. V.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO T.P. Wood colorimetry for the characterization of amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v.25, n.4, p.451-462, 2019.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N.C.; SABATIER, D.; BARALOTO, C.; SALOMÃO, R.P.; GUEVARA, J.E.; SILMAN, M.R. Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. **Science**, v.342, n.6156, p.1243092–1243092, 2013.

THULEAU, S.; HUSSON, F. **FactoInvestigate: Automatic Description of Factorial Analysis**. R package version 1.6. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=FactoInvestigate>>. Acesso em 12 nov, 2020.

TORRES, S.S.; JOMA, A.W.M.; PUIGGALI, J.R. Colour alteration and chemistry changes in oak wood (*Quercus pedunculata*) during plain vacuum drying. **Wood Science and Technology**, v.46, n.1, p.177-191, 2012.

TSUCHIKAWA, S.; INOUE, K.; NOMA, J.; HAYASHI, K. Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination. **Journal of Wood Science**, v.49, n.1, p.0029-0035, 2003.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. 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.

VIDAL, E.; VIANA, V.M.; BATISTA, J.L.F. Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo florestal na Amazônia oriental. **Scientia forestalis**, n.61, p.133-143, 2002.

VIDAL, N. G. Acordos Empresa Florestal-Comunidade no Brasil: Situação Atual e Oportunidades para Ação. *Traduzido por*: Amantino Ramos de Freitas. **Forest Trends**. Washington, D.C. 2005.

VIEIRA, H. C.; DA SILVA, E.L.; DOS SANTOS, J.X.; DE MUÑIZ, G. I.B.; MORRONE, S.R.; NISGOSKI, S. Wood colorimetry of native species of Myrtaceae from an Araucaria forest. **Floresta**, v.49, n.2, p.353-362, 2019.

VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. Produção na Amazônia Florestal: características, desafios e oportunidades. **Parcerias Estratégicas**, v.19, n.38, p.13-44, 2015.

WESTON, P.H.; BARKER, N.P. A new suprageneric classification of the Proteaceae, with an annotated checklist of genera. **Telopea**, v.11, p.314-344, 2006.

WHEELER, E. A.; BAAS, P.; RODGERS, S. Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the insidewood database. **IAWA Journal**, v.28, n.3, p.229-258, 2007.

WHEELER, E.A.; BAAS, P. A survey of the fossil record for Dicotyledonous wood and its significance for evolutionary and ecological wood anatomy. **IAWA Journal**, v.12, n.3, p.275-318, 1991.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. 319p.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and intelligent laboratory System**, v.58, n.2, p.109–130, 2001.

WORBES, M. Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the Neotropics. **IAWA Journal**, v.10, p.109-122, 1989.

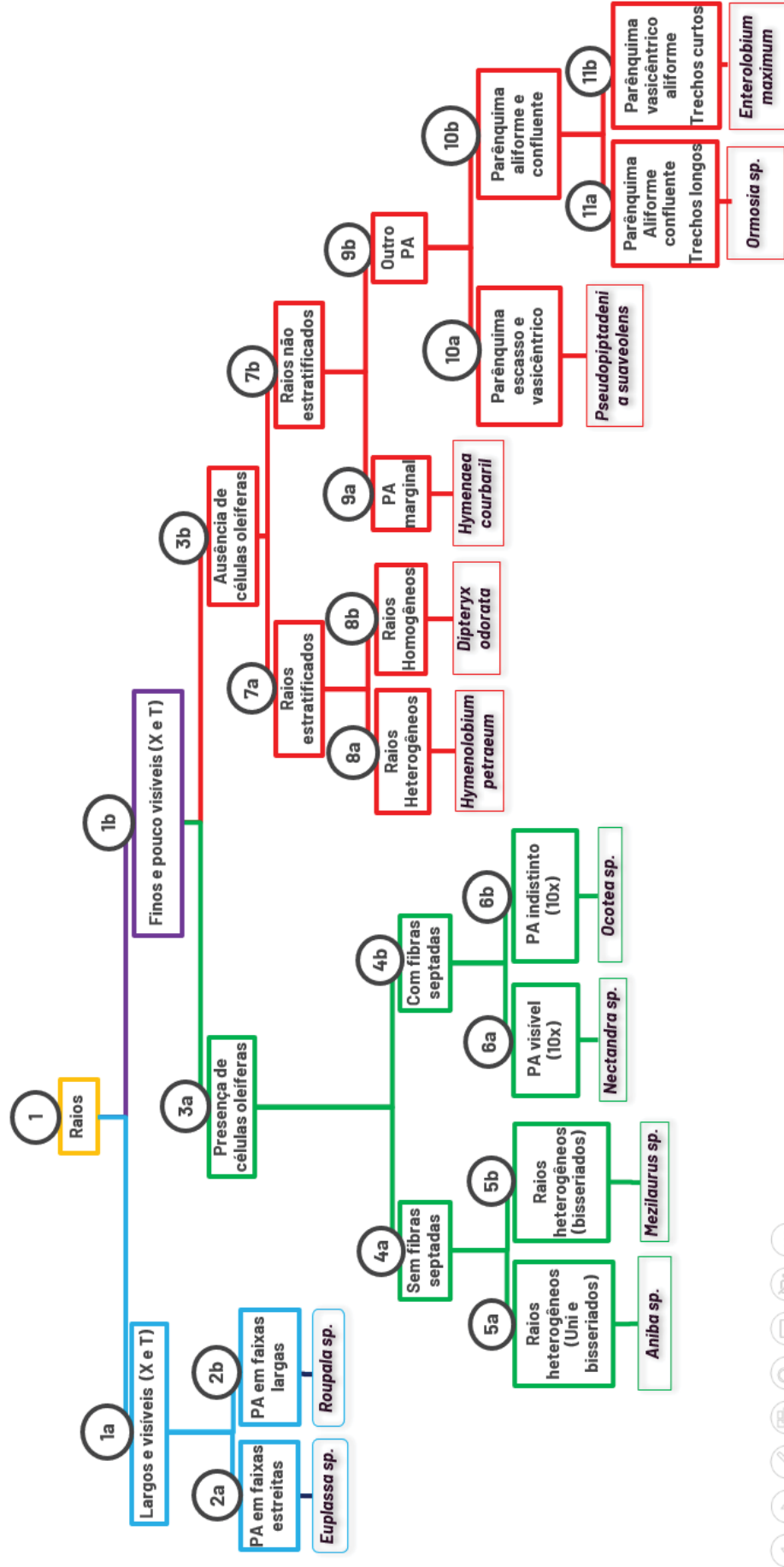
WU, X.; KUMAR, V.; QUINLAN, J. R.; GHOSH, J.; YANG, Q; MOTODA, H.; MCLACHLAN, G.J.; NG, A.; LIU, B.; YU, P.S.; ZHOU, Z-H; STEINBACH, M.; HAND, D.J.; STEINBERG, D. Top 10 algorithms in data mining. **Knowledge and Information Systems**, v.14, n.1, 1-37, 2008.

YANG, J.L.; EVANS, R. Prediction of MOE of *Eucalyptus* wood from microfibril angle and density. **Holz als roh-und werkstoff**, v.61, n.6, p.449-452, 2003.

YANG, Z.; LIU, Y.; PANG, X.; LI, K. Preliminary investigation into the identification of wood species from different locations by near infrared spectroscopy. **BioResources**, v.10, n.4, p.8505-8517, 2015.

YANG, Z.; LV, B.; FU, Y.J. The Relationship between near Infrared Spectroscopy and Surface Color of eight Rosewoods. **In Advanced Materials Research**, v.479, p.1772-1776, 2012.

APÊNDICE 1 – CHAVE DICOTÔMICA



LEGENDA: PA = Parênquima axial.