

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA**

**FERRAMENTA ALTERNATIVA PARA A TAXONOMIA
VEGETAL: ASSINATURA ESPECTRAL DA MADEIRA DE
ÁRVORES CAÍDAS NATURALMENTE NA AMAZÔNIA CENTRAL**

CLAUDIA EUGENIO DA SILVA

Manaus, Amazonas
Janeiro, 2024

CLAUDIA EUGENIO DA SILVA

**FERRAMENTA ALTERNATIVA PARA A TAXONOMIA
VEGETAL: ASSINATURA ESPECTRAL DA MADEIRA DE
ÁRVORES CAÍDAS NATURALMENTE NA AMAZÔNIA CENTRAL**

Orientador: Dr. Niro Higuchi

Co-Orientadores: Dra. Claudete Catanhede do Nascimento
Dr. Cristiano Souza do Nascimento

Tutor: Dr. Charles Eugene Zartman

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Botânica, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Biológica (Botânica).

Manaus, Amazonas
Janeiro, 2024

Banca examinadora

Dr. Roberto Daniel de Araújo
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
1º Membro (Presidente)

Dra. Dirce Leimi Komura
Instituto Federal do Maranhão
2º Membro

Dr. Jefferson Rodrigues Maciel
Jardim Botânico de Recife
3º Membro

Catálogo na Publicação (CIP-Brasil)

S586f Silva, Cláudia Eugênio da
Ferramenta Alternativa para a Taxonomia Vegetal: Assinatura Espectral da Madeira de Árvores Caídas Naturalmente na Amazônia Central / Cláudia Eugênio da Silva; orientador Niro Higuchi; coorientadores Claudete Catanhede do Nascimento, Cristiano Souza do Nascimento, Charles Eugene Zartman. - Manaus - AM: [s.l.], 2024.

7,6 MB
81p. : il. color.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Botânica) -
Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2024.

1. Taxonomia . 2. Infravermelho . 3. Assinatura espectral . I. Higuchi, Niro.
II. Nascimento, Claudete Catanhede do. III. Nascimento, Cristiano Souza do.
IV. Zartman, Charles Eugene. V. Título

CDD 578.012 811 3

Sinopse:

A espectroscopia FT-NIR foi utilizada para discriminar madeira de árvores caídas naturalmente das famílias Lecythidaceae e Myristicaceae da Amazônia Central. A assinatura espectral é a chave para identificar diferentes madeiras para fins taxonômicos de forma rápida, precisa e não destrutiva.

Palavras-chave: Árvores caídas, taxonomia alternativa, madeiras amazônicas, modelos multivariados, espectroscopia no infravermelho próximo.

Dedicatória

Aos meus pais, Aurora Eugenio da Silva e Joaquim Eugenio da Silva
Minha amável Vicência Benedita da Silva (Dinha).

Palavras da fé

“... Acredito que um dia se fará justiça. Que somos um povo e não gente sem alma. Acredito que o povo também deve crer nisso...”

“...Fogo das ideias, fogo do amor, fogo para iluminar o oprimido, e a queimar o opressor, pois tudo por nós é produzido, não queremos mais **Senhor...**”

Música – Chico César & João Milet Meirelles (Prêmio APTR)

“Eu sou um milagre de Deus”

Jornalista Graça Araújo

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha existência, meu ser, e minha essência de viver maravilhada e encantada a cada dia, a cada momento, a cada minuto, a cada segundo, contemplando a natureza. Obrigada!

Meu sincero agradecimento ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA.

Ao Programa de Pós-Graduação da Botânica – INPA.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, pela concessão da bolsa de Doutorado (Proc. No. 158839/2015-3).

Ao Laboratório de Engenharia e Artefatos da Madeira (LEAM/INPA) no extraordinário desenvolvimento dos resultados da pesquisa da tese. Obrigada!

Ao Laboratório de Manejo Florestal (LMF/INPA) no apoio logístico e financeiro para o desenvolvimento da pesquisa, em nome de Dr. Adriano José Nogueira de Lima (INPA) e toda a equipe técnica, em especial Geraldo Alves da Mota (Geraldinho ou GG), meu agradecimento.

Ao Laboratório de Química da Madeira (LQM/INPA) que foi imprescindível no desenvolvimento e apoio na pesquisa. Obrigada!

Resolvendo todas as direções em trilhas, coordenadas, mapas e sensoriamento remoto, o Dr. Carlos Henrique Souza Celes. Obrigada!

Aos meus orientadores Dr. Niro Higuchi, Dra. Claudete Catanhede Nascimento e Dr. Cristiano Souza Nascimento.

Ao tutor Dr. Charles Eugene Zartman.

Às secretárias do Programa de Pós-Graduação da Botânica – INPA, Helcineide Andrade (Neide) e Maria do Carmo Arruda (Carminha).

Um agradecimento especial ao anatomista de madeira, Jorge Alves Freitas pelo grande aprendizado em Anatomia, Tecnologista do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, para regra a palavra (*in memoriam*) deve estar escrita do lado do nome e em letras menores, mas você foi grande aqui na Terra. Muita luz, amigo.

A Dra. Flávia Machado Durgante (KIT/Alemanha) pelo companheirismo no aprendizado em Infravermelho (FT-NIR). Obrigada!

A família, minhas irmãs, meus irmãos, sobrinhas, sobrinhos, em especial aos meus entes que está em luz Cledimilson Soares da Silva Filho (*in memoriam*) e minha irmã Luzia Eugenio da Silva (*in memoriam*), Marcílio José da Silva (*in memoriam*), José Eugenio da Silva (*in memoriam*) e meu irmão, ao cunhado Cledimilson Soares da Silva (*in memoriam*) e ao meu tio João Siqueira Montavão (irmão da minha mãe).

Aos meus amados médicos Dr. Gerson Mourão, Dr. William Fuzita, Dr. Fábio Medeiros, Dra. Graziete Barbosa e toda equipe da Fundação Centro de Controle de Oncologia do Estado Amazonas – FCECON e SENSUMED Oncologia.

As meus e minhas amados (as), acho que posso chamá-los (las) de anjos aqui na Terra: Daniel da Silva Mota, Eliane Silva Batista, Luís Felipe Paes (sobrinho), Adriana Wisniewski, Marta Brasil, Andreia Picanço da Silva, Aldenéia Soares, Solange Moreira, Tatiane Marinho, Íris Rianne, Lucélia Rodrigues Santos, André Carlos Barcelos, Sophia Hollanda, Patrícia Alfaia, Guilherme Cavazani, Diego Garzón, Eduardo Amat, Galileo Lopes, Galileu Dantas, Eduardo Rios, Jefferson Maciel, Jaqueline Lira Bremgartner, Jéssica Ester Elvas Costa, Marília Oliveira Fonseca, Gerson de Mendonça Nogueira, Talles Gonçalves de Oliveira, Gerla Myrcea Lima da Silva, pelo amor, orações, fé, companheirismo, aprendizado, festas, tristezas e reencontros. Meu muito obrigada!

A amada amiga que estará sempre em minha vida e em minhas orações Dirce Leimi Komura. Obrigada por tudo.

Ao Roberto Daniel de Araújo, Irineide Cruz e Marta Brasil, amados por mim.

Ao amigo Dr. José Júlio Toledo (UNIFAP), meu muito obrigado.

Aos camaradas de ideias sociais e afeto fraterno Augusto Semente e José dos Santos Semente (*in memoriam*).

A amável professora Luci Machado Pinheiro, sou extremamente admiradora desta guerreira de lutas sociais, grande mestra. Aprendi com ela um grande fogo de ideias sociais, principalmente no meu caminhar, no meu ser. Te amo!♥

As amáveis orientadoras na graduação Dra. Maria de Pompéia Corrêa Araújo Coelho, Dra. Maria Rita de Cássia Pereira e Dra. Ana Du Bocage Neta.

Aos José Carlos Rodrigues Soares e Júlia Godoy, são imprescindível. Obrigada!

A minha madrinha Tereza Jorge dos Santos e todos da família pelo carinho sempre expressado por eles, amigos, irmãos de infância, entre brincadeiras e corre-corre no Campo do Floresta, Barro, Recife – PE. Ah! Tempos bons, nunca esquecerei a nossa bela infância.

A minha querida e amada amiga de infância Sandra Freitas.

Ao amigo de infância Evaldo Tiburdino Lopes.

A amiga Tereza Cristina Caraúbas Mendes.

Aos Gonzagas de Manacapuru – AM, meu amigo Roberval Gonzaga, sua maravilhosa esposa Shirley Gonzaga e seus filhos Cristina, Cristiano e Nathalie, meus amores.

Gentileza gera gentileza, já dizia o poeta. Obrigada a todos!

RESUMO GERAL

O espectro infravermelho revela uma gama significativa de informações sobre moléculas orgânicas presentes em diversos materiais, incluindo o tecido vegetal. Esse espectro carrega a "assinatura digital" da amostra, informação importante para estudos de taxonomia integrativa. O desafio do reconhecimento taxonômico e o uso adequado da biomassa de árvores caídas em florestas tropicais, que frequentemente carecem de flores, frutos e folhas durante a coleta de campo, motivou este estudo. O objetivo principal foi avaliar e desenvolver modelos preditivos utilizando a espectroscopia do infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) como ferramenta alternativa para a discriminação botânica de madeiras de árvores caídas naturalmente das famílias Lecythidaceae e Myristicaceae de ocorrência na Amazônia Central. Durante inventário florestal na região do Alto Solimões (Amazonas, Brasil), foram identificadas unidades arbóreas no solo da floresta oriundas de fatores naturais que fizeram com que essas árvores caíssem. Um número significativo de árvores, como matámatá, tauari e ucuúba, foram identificadas pelos parobotânicos e coletadas para o estudo. Amostras foram retiradas do tronco para identificação anatômica e obtenção de espectros NIR (10.000 a 4.000 cm^{-1}). Um total de 1.836 espectros foram obtidos e utilizados na análise multivariada (calibração, validação e teste). A investigação das bandas de absorção na região NIR e o uso da quimiometria (estatística e química) facilitaram a interpretação dos espectros com alto índice de identificação. A aplicação do algoritmo distância Mahalanobis aos dados espectrais das madeiras de Lecythidaceae identificou sete espécies (*Couratari* sp., *C. guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *Lecythis usitata* e *Holopyxidium* sp.) distribuídas em quatro gêneros. Por sua vez, a análise discriminante linear (LDA) foi capaz de discriminar madeiras de Myristicaceae em dois gêneros: *Iryanthera ulei* e *Virola* (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 e *Virola* sp.2). A espectroscopia NIR, aliada a modelos multivariados, no tecido xilémico de árvores caídas, emerge como uma ferramenta valiosa para facilitar o reconhecimento botânico, especialmente em cenários com disponibilidade limitada de material vegetal fértil. Essa abordagem não apenas se mostra útil em estudos florísticos, mas também desempenha um papel vital na caracterização das propriedades da matéria-prima da madeira, contribuindo assim para otimizar sua utilização, alinhada aos princípios da botânica econômica. A integração dessas técnicas pode oferecer *insights* importante para a tomada de decisões em planos de manejo florestais, indicando usos alternativos para esta biomassa muitas vezes negligenciada pelo setor florestal.

Palavras-Chave: Árvores caídas, taxonomia alternativa, madeiras amazônicas, modelos multivariados, espectroscopia no infravermelho próximo

Alternative tool for plant taxonomy: Fingerprint of wood from natural fallen trees in the Central Amazon

The infrared spectrum reveals a significant range of information about organic molecules present in various materials, including plant tissue. This spectrum carries the sample's "fingerprint" important information for integrative taxonomy studies. The challenge of taxonomic recognition of fallen trees in tropical forests, which often lack flowers, fruits, and leaves during field collection, motivated this study. The main objective was to evaluate and develop predictive models using Fourier transform near-infrared spectroscopy (FT-NIR) as an alternative tool for the botanical discrimination of wood from natural fallen trees from the Lecythidaceae and Myristicaceae families occurring in the Central Amazon. During a forest inventory in the Alto Solimões region (Amazonas, Brazil), arboreal individuals were diagnosed on the forest floor, known as natural fallen trees. A significant number of trees, such as máta-matá, tauari, and ucuúba, were identified by parobotanists and collected for the study. Samples were taken from the trunk for anatomical identification and obtaining NIR spectra (10,000 to 4,000 cm^{-1}). A total of 1,836 spectra were collected and used in multivariate analysis (calibration, validation, and testing). Investigation of absorption bands in the NIR region and the use of chemometrics facilitated the interpretation of spectra with a high identification rate. The application of the Mahalanobis distance algorithm to the spectral data of Lecythidaceae wood identified seven species (*Couratari* sp., *Couratari guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *Lecythis usitata* and *Holopyxidium* sp.) distributed in four genera. In turn, linear discriminant analysis (LDA) was able to discriminate Myristicaceae wood into two genera: *Iryanthera ulei* and *Virola* (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 and *Virola* sp.2). NIR spectroscopy, combined with multivariate models on the xylem tissue of fallen trees, emerges as a valuable tool to facilitate botanical recognition, especially in scenarios with limited availability of fertile plant material. This approach not only proves useful in floristic studies but also plays a vital role in characterizing the properties of the wood raw material, thus contributing to optimizing its use in line with the principles of economic botany. Integration of these techniques can offer crucial insights for decision-making in forest management plans, indicating alternative uses for this biomass often neglected by the forestry sector.

Keywords: Fallen trees, alternative taxonomy, Amazonian wood, multivariate models, near-infrared spectroscopy

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	4	
OBJETIVOS	10	
CAPÍTULO 1		
Identificação alternativa de madeira de árvores caídas naturalmente da família Lecythidaceae na Amazônia Central utilizando a espectroscopia FT-NIR		11
Resumo	11	
Abstract	12	
Introdução	13	
Material e Métodos	16	
Obtenção dos espectros NIR	19	
Processamento de dados e análise multivariada	19	
Resultados e Discussão	20	
Discriminação de madeiras de árvores caídas	20	
Assinatura espectral NIR	25	
Conclusão	31	
CAPÍTULO 2		
Aplicação da espectroscopia infravermelha na discriminação de ucuúbas (Myristicaceae) caídas naturalmente na Amazônia Central		32
Resumo	32	
Abstract	33	
Introdução	33	
Material e Métodos	37	
Área de coleta e preparação das amostras	37	
Obtenção dos espectros NIR e análise de dados.....	39	
Resultados	41	
Espectros NIR e Classificação Botânica de Myristicaceae	41	
Caracterização NIR de traços de árvores caídas	46	
Discussão	48	
Conclusão	51	
Material complementar	53	
SÍNTESE.....	56	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58	

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das árvores caídas naturalmente	17
Figura 2. Distribuição do conjunto de calibração “gênero” de madeiras caídas de Lecythidaceae a partir do algoritmo distância Mahalanobis	24
Figura 3. Distribuição do conjunto de calibração “espécie” de madeiras caídas de Lecythidaceae a partir do algoritmo distância Mahalanobis	24
Figura 4. Assinatura espectral de <i>Couratari stellata</i>	26
Figura 5. Assinatura espectral de <i>Eschweilera odora</i>	27

Capítulo 2

Figura 1. Espectros NIR de madeira de árvores caídas	42
Figura 2. Espectros NIR com tratamento matemático de madeira de árvores caídas	43
Figura 3. Análise do componente principal de espectros de árvores caídas naturalmente	44
Figura 4. Matriz de confusão (LOO) reunindo todas as previsões de madeiras de árvores caídas e madeira de Xiloteca	46
Figura 5. Análise de agrupamento das madeiras estudadas	48

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1. Árvores caídas naturalmente coletadas na região do Alto Solimões (Amazonas/Brasil)	18
Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos usados na modelagem FT-NIR	20
Tabela 3. Parâmetros de avaliação de modelos quimiométricos para discriminação em gênero	21
Tabela 4. Parâmetros de avaliação de modelos quimiométricos para discriminação em espécie	22
Tabela 5. Atribuição de bandas de absorção NIR de <i>Couratari stellata</i> e <i>Eschweilera odora</i>	29

Capítulo 2

Tabela 1. Resumo das características de campo e laboratório da madeira de Ucuúba	38
Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos usados na modelagem FT-NIR	40
Tabela 3. Modelos NIR utilizados para estimativa das propriedades tecnológicas de madeira de Ucuúba	41
Tabela 4. Modelos multivariado NIR (análise discriminante) desenvolvidos para classificação de árvores caídas de Myristicaceae	45
Tabela 5. Estimativa das propriedades tecnológicas das madeiras de árvores caídas naturalmente por modelos quimiométricos	47

INTRODUÇÃO GERAL

A diversidade da flora brasileira revela-se extraordinária, especialmente no que diz respeito às árvores de grande porte, que desempenham um papel preponderante na composição da maioria dos biomas do país. A floresta tropical exerce influência direta nos serviços ecossistêmicos, na regulação do clima, no ciclo da água e, não menos importante, no desenvolvimento econômico regional. Embora a floresta amazônica se destaque por sua biodiversidade, a riqueza de espécies é tema de considerável debate. O estudo de Steege et al. (2020) revelou que a distribuição da abundância de espécies na Amazônia é mais adequadamente representada por uma série logarítmica, estimando-se uma incrível riqueza total de mais de 15.000 espécies de árvores nesta região. Recentemente, novos avanços em estudos de taxonomia vegetal têm sido discutidos para fornecer uma atualização sobre o número estimado de espécies na flora arbórea amazônica, bem como seus tamanhos populacionais estimados. A disponibilidade de conjuntos de dados florísticos que abordam a diversidade e composição da flora arbórea amazônica é importante para entender a dinâmica da floresta, bem como sua conservação, e assim usá-la de forma sustentável (Cardoso et al. 2017; Prata et al. 2018; Hopkins 2019).

Na fase inicial do manejo florestal, estudos sobre a composição florística descrevem a quantidade e a variedade dos indivíduos (Gonçalves e Santos, 2008). Na Amazônia, é comum atribuir diversos nomes populares a uma única espécie, e essas designações podem variar consideravelmente de acordo com a região em que a amostra é coletada. Assim, a ampla diversidade de termos vernaculares na Amazônia impõe um desafio significativo para a identificação precisa das espécies florestais.

Uma das principais dificuldades e, conseqüentemente, desafios nos inventários florísticos reside na precisa identificação ao nível de gênero e espécie. Não é incomum deparar-se com registros botânicos que apresentam erros substanciais, cujas conseqüências extrapolam a mera imprecisão no armazenamento de material vegetal, repercutindo em ações estratégicas para o uso adequado da floresta (Ferreira et al. 2004; Souza et al. 2007; Souza 2012).

As espécies madeireiras presentes no bioma amazônico estão classificadas nas principais famílias botânicas, tais como Fabaceae, Lauraceae, Sapotaceae,

Lecythidaceae, Moraceae, Myristicaceae, entre outras (INPA/CPPF 1991; Cysneiros et al. 2018). Para este estudo, foram selecionadas as famílias botânicas Lecythidaceae e Myristicaceae, representadas por árvores localizadas na Amazônia e que demonstraram alta frequência nas áreas inventariadas na região do alto rio Solimões (Amazonas/Brasil). É importante destacar que um dos maiores desafios durante o levantamento é a classificação taxonômica, devido à diversidade de espécies, à falta de especialistas na área e à confusão com os nomes comuns locais. Por exemplo, muitas árvores rotuladas como "matá-matá" e "tauari" são frequentemente designadas de maneira incorreta, podendo ser associadas a pelo menos quatro gêneros distintos dentro de Lecythidaceae. Da mesma forma, as madeiras denominadas como "ucuúba" no campo estão agrupadas em três gêneros de Myristicaceae.

A família Lecythidaceae, integrante da ordem Ericales, apresenta uma distribuição Pantropical e é constituída por 25 gêneros, compreendendo aproximadamente 340 espécies (Mori et al. 2015). Conforme a Lista de Verificação da Flora Brasileira, o estado do Amazonas abriga a maior diversidade de Lecythidaceae no país, com 79 espécies distribuídas em sete gêneros (ter Steege et al. 2013; Smith et al. 2015). Uma análise realizada por Metcalfe e Chalk (1950) em uma descrição abrangente da madeira de Lecythidaceae, concluiu não haver uma distinção clara do parênquima axial, tornando-o inadequado como ferramenta de diagnóstico. Poucos registros sobre as relações taxonômicas de Lecythidaceae na região Neotropical podem ser encontrados nos estudos de DeZeeuw e Mori (1987) que fornecem uma descrição genérica do xilema secundário de *Corythophora*, *Couratari*, *Eschweilera*, *Gustavia* e *Lecythis* oriunda de florestas tropicais da Guiana Francesa.

Myristicaceae possui uma distribuição Pantropical, com suas espécies encontradas tanto no dossel quanto no sub-bosque das florestas. Essa família é composta por 20 gêneros, sendo que cinco deles são endêmicos das Américas, totalizando 58 espécies. Destaca-se que *Virola* e *Iryanthera* possuem ampla distribuição na bacia Amazônica (Vicentini e Rodrigues 1999; Brito et al. 2023). Em levantamentos florísticos, a nomenclatura popular frequentemente gera confusões na identificação botânica. Na Amazônia, é comum designar a mesma espécie com os nomes "virola" e "ucuúba". No entanto, essa nomenclatura é enganosa, pois, na realidade, podem representar diferentes espécies e até mesmo gêneros distintos, como *Iryanthera*, *Osteophloeum* e *Virola* (Rodrigues 1980; Vicentini e Rodrigues

1999).

Os estudos de Loureiro et al. (1989) foram pioneiros na descrição dos caracteres anatômicos da madeira desses indivíduos, abrangendo 24 espécies de *Virola*. O objetivo desse trabalho era auxiliar na identificação ao nível de espécie, entender a filogenia dos grupos americanos e africanos, além de caracterizar as madeiras com potencial comercial. Dada a dificuldade de distinguir esses indivíduos pela morfologia clássica, apenas especialistas conseguem descrever caracteres distintivos e seletivos a partir de variáveis qualitativas e quantitativas de elementos como vaso, parênquima e fibra.

A complexidade na identificação de espécies vegetais está frequentemente relacionada à disponibilidade do material coletado. Em muitos casos, a análise dos órgãos reprodutivos das plantas é necessária, mas esses órgãos nem sempre estão acessíveis. O material estéril pode ser avaliado por paratômicos em campo, contudo, mesmo assim, podem ocorrer erros de identificação, muitas vezes exigindo a consulta de especialistas (Fidalgo e Bononi 1984). No contexto da identificação do tecido lenhoso, as xilotecas (coleções de madeiras) e especialistas em anatomia de madeira desempenham um papel crucial. No entanto, especialistas nessa área são uma categoria profissional escassa no Brasil. Em geral, as descrições de gêneros neotropicais na região amazônica baseiam-se em informações sobre cor, odor, densidade básica e características macroscópicas e microscópicas (Freitas e Vasconcellos 2019).

Apesar de o estudo da anatomia da madeira ser uma prática secular, observa-se uma crescente aplicação de técnicas avançadas para a identificação vegetal, como citologia, genética, biologia molecular, bioquímica, análises de isótopos de carbono, espectrometria de raio-x, entre outras. No entanto, é importante ressaltar que essas técnicas são onerosas, demandam tempo e têm custos elevados (Vázquez et al. 2002; Fasciotti et al. 2015).

Árvores caídas naturalmente são encontradas de maneira aleatória no solo de florestas inexploradas, o que dificulta uma explicação precisa para a causa de sua queda, bem como a identificação precisa de sua espécie. A queda dessas árvores na floresta está primariamente associada a fatores como ventos intensos, raios, idade avançada, competição, presença de ocos e ataques de organismos xilófagos. Esses eventos resultam em alterações significativas nas propriedades físicas, mecânicas, químicas e biológicas da madeira dessas árvores (Harmon et al. 1986; Stokland et al.

2012). Esses indivíduos são registrados em inventários florestais e categorizados como necromassa lenhosa. Essa variável tem sido aplicada em equações de volume para estimativas de biomassa em florestas tropicais (Higuchi et al. 2015; Freitas et al. 2019). Estudos em andamento pelo INCT Madeiras da Amazônia (MCTI/CNPq/FAPEAM/Brasil) têm associado a queda de determinados indivíduos a possíveis efeitos de ventos fortes, identificando a variável azimute como um fator explicativo relevante.

No que diz respeito aos estudos taxonômicos, econômicos e tecnológicos relacionados a essa matéria-prima, há um conhecimento limitado sobre a "madeira morta". Assim, a identificação botânica desses indivíduos é fundamental para auxiliar estudos ecológicos sobre a mortalidade de árvores nativas, biomecânica, manejo florestal, aspectos econômicos e, igualmente, no campo da tecnologia da madeira para promover a destinação sustentável dessa biomassa (Aleixo et al. 2019; Costa et al. 2021; Dionísio et al. 2022).

Os métodos convencionais de identificação botânica de espécies vegetais, que consideram a filogenia e biogeografia com base na comparação de características fenológicas a partir de material fértil (flores e frutos) ou estéril (folhas), produção de exsicata, registro e depósito do material em herbários ou coleções botânicas, não são aplicáveis para a identificação de árvores caídas naturalmente na floresta (Vicentini e Rodrigues, 1999; Di Domenico et al. 2012). A anatomia comparativa da madeira emerge como a principal ferramenta para amostras dessas árvores. No entanto, este método é complexo e demanda um alto nível de habilidade para uma identificação precisa, até mesmo no nível de gênero e espécie (Freitas e Vasconcellos 2019; LPF/SFB 2023). Vale ressaltar que as amostras frequentemente apresentam características anatômicas alteradas devido à biodegradação acelerada no chão da floresta, o que dificulta a identificação por métodos convencionais.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica analítica não destrutiva, fundamentada na espectroscopia vibracional, que mede a interação da radiação eletromagnética com os componentes químicos presentes na amostra (Hein et al. 2017; Pasquini 2018). A faixa de comprimento de onda do espectro NIR abrange de 12.000 a 4.000 cm^{-1} , sendo considerada uma "assinatura espectral" ou "impressão digital" da amostra. Esta assinatura carrega informações químicas importantes sobre o caráter e o número de grupos funcionais, incluindo ligações químicas (Jouquet et al. 2014; Tang et al. 2018).

Estudos que empregam a espectroscopia NIR têm revelado promissoras aplicações na caracterização e identificação de material vegetal como o tecido xilemático. Nascimento et al. (2023) afirmam que a espectroscopia NIR é uma técnica que proporciona resultados rápidos, demandando mínimo preparo das amostras. Apesar do crescente uso dessa técnica em produtos florestais (madeira, casca, frutos, resíduos) nos últimos anos, subsistem lacunas de conhecimento, especialmente quando aplicada à madeira. A discriminação de tipos de madeira reside predominantemente na variação de suas características anatômicas, físicas e químicas. Embora a relação entre o espectro e essas características ainda seja pouco explorada na espectroscopia NIR para a discriminação de espécies, estudos indicam um notável potencial para essa aplicação (Hein et al. 2017; Lengowski et al. 2018; Nascimento et al. 2021).

Dentre os benefícios que respaldam o investimento em pesquisas utilizando o NIR e sua otimização para a discriminação de espécies, destacam-se vantagens como agilidade nos resultados, análise não destrutiva, precisão nos resultados; simplicidade e rapidez no processo de preparo das amostras para a leitura; obtenção de resultados em tempo real durante análises de campo; e ausência de resíduos químicos impactantes ao ambiente no desfecho do processo de determinação (Morozova et al. 2013; Eugenio-da-Silva et al. 2018; Mancini et al. 2019).

A extração de informações do espectro infravermelho (IR) é realizada por meio da quimiometria, uma disciplina que combina estatística e química. Essa abordagem correlaciona as informações de referência (biblioteca) às bandas químicas, visando responder às características quantitativas/qualitativas do material orgânico. Nesse processo, os dados são calibrados e modelos de classificação (discriminação) e caracterização são criados (Horikawa et al. 2015; Nascimento et al. 2021). A eficácia dessa técnica foi confirmada por Buoso et al. (2016) ao utilizar a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) para agrupar madeiras de coníferas e folhosas. Resultados similares foram encontrados por Yang et al. (2015), que testaram o sistema NIR para identificar madeiras dos gêneros *Pometia*, *Instia* e *Couratari*, obtendo uma precisão de 90% no conjunto de testes adquirido no mercado de Dongba (Pequim/China). Da mesma forma, Soares et al. (2017) ao empregarem análise discriminante aos espectros NIR de espécies de madeira tropical, alcançaram taxas de eficiência superiores a 90%.

Embora existam estudos de identificação taxonômica com a espectroscopia NIR,

há uma lacuna no conhecimento sobre a identificação do tecido xilemático de árvores caídas naturalmente, especialmente com a aplicação da tecnologia NIR. Diante desse cenário, o presente estudo teve como questões norteadoras: Como diferenciar madeiras de árvores caídas, uma vez que não existe material fértil e estéril? A espectroscopia NIR pode ser uma ferramenta alternativa para discriminar madeiras caídas? Visando responder a essas perguntas, o objetivo do estudo foi avaliar e desenvolver modelos utilizando a espectroscopia do infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) como uma ferramenta alternativa para a discriminação botânica de madeira de árvores caídas naturalmente na Amazônia Central, pertencentes às famílias Lecythidaceae e Myristicaceae. Os resultados deste estudo são apresentados em dois capítulos seguindo a formatação de artigos científicos.

OBJETIVO GERAL

Avaliar e desenvolver modelos utilizando espectroscopia do infravermelho próximo como ferramenta alternativa para discriminação botânica de madeira de árvores caídas naturalmente da Amazônia Central das famílias Lecythidaceae e Myristicaceae.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o uso da espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) na discriminação de árvores caídas da família Lecythidaceae;
- Validar a capacidade da espectroscopia FT-NIR (Infravermelho próximo com transformada de Fourier), identificar e caracterizar madeiras de árvores caídas naturalmente de *Virola* spp. e *Iryanthera* spp. (Myristicaceae).

**IDENTIFICAÇÃO ALTERNATIVA DE MADEIRA DE ÁRVORES CAÍDAS
NATURALMENTE DA FAMÍLIA LECYTHIDACEAE NA AMAZÔNIA CENTRAL
UTILIZANDO A ESPECTROSCOPIA FT-NIR***

RESUMO

O espectro infravermelho fornece diversas informações sobre moléculas orgânicas presentes em diversos materiais, como o tecido vegetal, uma vez que carrega a assinatura digital ou “*fingerprint*” da amostra. O reconhecimento taxonômico de árvores caídas naturalmente no solo de florestas tropicais é bastante complexo, devido à falta de material fértil na coleta de campo. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso da espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) na discriminação de árvores caídas da família Lecythidaceae da Amazônia Central. Árvores caídas na floresta foram coletadas na região do Alto Solimões (Amazonas, Brasil), e amostras foram retiradas para identificação anatômica e obtenção dos espectros NIR. Foram desenvolvidos modelos quimiométricos com um conjunto de dados espectrais (calibração, validação e teste) e aplicado o algoritmo Mahalanobis. Ao final, o desempenho dos modelos de classificação foi avaliado. A espectroscopia FT-NIR mostrou-se eficiente na discriminação de madeiras provenientes de árvores caídas da família Lecythidaceae, apresentando resultados com alto índice de identificação (conjunto de calibração $\geq 61\%$; validação $\geq 86\%$). Os modelos discriminantes que incluíram o tratamento dos espectros com a segunda derivada (filtros Savitzky-Golay e Norris) melhoraram a capacidade de discriminação, resultando em baixos índices de erro ($< 5\%$) na classificação por gênero (*Couratari*, *Eschweilera*, *Holopyxidium* e *Lecythis*) e espécie (*Couratari* sp., *C. guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *Lecythis usitata* e *Holopyxidium* sp.). O algoritmo distância Mahalanobis, aplicado na análise discriminante, identificou de maneira precisa as madeiras caídas com base na similaridade e dissimilaridade do espectro NIR. A análise comparativa da assinatura espectral das amostras árvores

*Artigo submetido ao *International Forestry Review* (11/2023), Qualis A3 (Biodiversidade)

caídas e Xiloteca revelou que mesmo após exposição às intempéries por algum tempo a madeira de árvores caídas ainda preservava aproximadamente 50% das bandas originais, o que favoreceu a discriminação ao nível de gênero. A precisão dos modelos quimiométricos desenvolvidos indica a aplicabilidade dessa ferramenta de forma integrativa em estudos de taxonomia de materiais lenhosos provenientes de florestas tropicais.

Palavras-chave: Madeiras caídas, taxonomia alternativa, madeiras amazônicas, análise discriminante, metodologia não destrutiva.

ALTERNATIVE IDENTIFICATION OF WOOD FROM NATURAL FALLEN TREES OF THE LECYTHIDACEAE FAMILY IN THE CENTRAL AMAZONIAN USING FT-NIR SPECTROSCOPY

ABSTRACT

The infrared spectrum provides diverse information about organic molecules present in various materials, such as plant tissue, as it carries the fingerprint of the sample. The taxonomic recognition of natural fallen trees on the soil of tropical forests is quite complex, due to the lack of fertile material in field collection. The aimed of this study was to evaluate the use of Fourier-transform near-infrared spectroscopy (FT-NIR) in the discrimination of wood from natural fallen trees of the Lecythidaceae family from the Central Amazonian. Fallen trees in the forest were collected in the Alto Solimões region (Amazonas, Brazil), and samples were taken for anatomical identification and obtaining NIR spectra. Chemometric models were developed with a set of spectral data (calibration, validation and test) and the Mahalanobis algorithm was applied. Finally, the performance of the classification models was evaluated. FT-NIR spectroscopy proved to be efficient in discriminating wood from fallen trees of the Lecythidaceae family, presenting results with a high identification rate (calibration $\geq 61\%$; validation $\geq 86\%$). The discriminant models that included the treatment of spectra with the second derivative (Savitzky-Golay and Norris filters) improved the discrimination capacity, resulting in low error rates ($< 5\%$) in the classification by genus (*Couratari*, *Eschweilera*,

Holopyxidium and *Lecythis*) and species (*Couratari guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, and *Lecythis usitata*). The Mahalanobis distance algorithm, applied in discriminant analysis, accurately identified fallen wood based on the similarity and dissimilarity of NIR spectral signatures. The comparative analysis of the spectral signatures of samples, fallen trees and Xylotheque revealed that, even after exposure to the elements for some time, the wood from fallen trees still preserved approximately 50% of the original bands, which favored discrimination at the gender level. The accuracy of the chemometric models developed indicates the applicability of this tool in an integrative manner in taxonomy studies of woody materials from tropical forests.

Keywords: Fallen wood, alternative taxonomy, Amazon woods, discriminant analysis, non-destructive methodology

INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica abriga uma das maiores diversidades florestais do planeta. Um dos mais recentes estudos de levantamento taxonômico na região registrou um total de 14.003 espécies pertencentes a 1.788 gêneros e 188 famílias de espécies vegetais (Cardoso et al. 2017). Entretanto, é importante notar que estudos de conservação, climatologia e biotecnologia em muitas áreas da Amazônia brasileira enfrentam desafios significativos em relação à taxonomia botânica dessa vasta biota. Não é surpreendente que o Brasil apresenta as maiores lacunas de coleta e identificação de espécies na região amazônica (Schulman et al. 2007; Nascimento et al. 2022).

Em um inventário florístico realizado na região do Alto Solimões, na Amazônia Central (Brasil), foram identificadas as famílias botânicas mais abundantes, incluindo Fabaceae, Lecythidaceae, Burseraceae, Moraceae, Myristicaceae e Euphorbiaceae (Resex Rio Jutuí 2011). A família Lecythidaceae, que faz parte da ordem Ericales, possui uma distribuição Pantropical, sendo composta por 25 gêneros e aproximadamente 340 espécies (Mori et al. 2015). Segundo a Lista de Verificação da Flora Brasileira, o estado do Amazonas abriga a maior diversidade de Lecythidaceae

do país, com 79 espécies distribuídas em sete gêneros (Smith et al. 2015; Cruz et al. 2021).

As Lecythidaceae são conhecidas internacionalmente como a "família da castanha" devido ao comércio global das sementes de *Bertholletia excelsa* (castanha-do-Brasil), bem como à exploração madeireira de espécies como *Couratari* (tauari), *Lecythis* (jarana) e *Eschweilera* (matá-matá) (Procópio et al. 2010; Freitas e Vasconcellos 2019). A presença de indivíduos dessa família serve como indicativo de florestas de várzea preservadas ou pouco perturbadas (Prance e Mori 1979). Além disso, é notável que algumas espécies arbóreas desse táxon sejam consideradas entre as mais antigas, como evidenciado por testemunhos de madeiras silicificadas datadas do Cretáceo Superior encontrados tanto na Floresta Amazônica quanto na Floresta Atlântica, os quais foram identificados como pertencentes ao gênero *Lecythis* (Fernandes 1998; BFG 2015; BFG 2018).

Na Amazônia, a identificação das Lecythidaceae frequentemente se baseia em uma combinação de características vegetativas distintas. Dentre esses traços, incluem o hábito predominantemente arbóreo, a liberação de um odor característico quando a casca é cortada, a presença de folhas simples dispostas de forma alternada e a existência de feixes corticais na casca que produzem fibras, conhecidas como "envira". Esses traços vegetativos fornecem uma base sólida para a identificação de espécies e são de fácil observação. No entanto, a identificação precisa das Lecythidaceae, tanto em termos de sua morfologia externa quanto interna, exige um nível significativo de conhecimento especializado por parte dos botânicos. Infelizmente, especialistas nesse campo são escassos em todo o mundo (Hopkins e Mori 1999).

A dificuldade na identificação de espécies vegetais está frequentemente associada à disponibilidade de material coletado. Em muitos casos, é necessário analisar os órgãos reprodutivos das plantas, mas esses órgãos nem sempre estão disponíveis. O material estéril de Lecythidaceae pode ser avaliado por parobotânicos em campo, mas mesmo assim, erros de identificação podem ocorrer, muitas vezes exigindo a consulta de especialistas (Fidalgo e Bononi 1984; Smith et al. 2016; Batista e Mori 2017). Para a identificação de tecido lenhoso, as Xilotecas (coleções de madeiras) e especialistas em anatomia de madeira desempenham um papel fundamental. No entanto, especialistas em anatomia de madeira são uma categoria profissional escassa no Brasil. A identificação e classificação de madeiras dependem

principalmente de características microscópicas, pois características mais visíveis, como cor, odor e textura, podem variar consideravelmente, mas ainda são úteis (INPA/CPFF 1991; Wheeler e Baas 1998; Freitas e Vasconcellos 2019). Além disso, outras técnicas avançadas de identificação vegetal estão sendo aplicadas, como citologia, genética, biologia molecular, bioquímica, análise de isótopos de carbono, espectrometria de raio-x, entre outras. No entanto, essas técnicas são onerosas, demoradas e de alto custo (Vázquez et al. 2002; Fasciotti et al. 2015).

A circunscrição da família da castanha ainda é uma questão não completamente resolvida, com a falta de consenso sobre as relações tanto inter e intrafamiliares dentro do grupo (Mori et al. 2015). Outra situação que chama atenção para a confusão na identificação de Lecythidaceae na Amazônia brasileira, é o reconhecimento tradicional de nomes comuns para indivíduos de diferentes gêneros e espécies (Bernal et al. 2011; Mori et al. 2015; Cysneiros et al. 2018). Por exemplo, Procópio e Secco (2008) identificaram oito espécies diferentes de Lecythidaceae agrupadas sob o nome "tauari" na região norte do Brasil. Portanto, a identificação da madeira no campo tem se mostrado desafiadora. Características macroscópicas, como a morfologia externa da casca ou a presença de anéis de crescimento, muitas vezes são insuficientes para uma identificação precisa ao nível de espécie.

Um dos primeiros registros de identificação de madeiras de Lecythidaceae foi relatado por Diehl (1935), que indicou a presença de um grupo homogêneo caracterizado por faixas de parênquima axial, placas de perfuração exclusivamente simples, fibras com pontuações simples a indistintamente delimitadas, pontuações intervasculares alternadas e dois tipos de pontuações nos raios dos vasos. Anos depois, Metcalfe e Chalk (1950), descreveram madeiras de táxon e concluíram que não havia uma distinção clara do parênquima axial, e esse não poderia ser utilizado como uma ferramenta de diagnóstico.

Em geral, o processo de identificação correto de madeiras deve seguir padrões desde o momento da coleta das amostras, juntamente com os respectivos comprovantes de herbário, conforme recomendado por Barker (2008). Infelizmente, essa abordagem não é sempre possível quando se trata de madeiras de árvores caídas naturalmente na floresta, sendo sua queda associadas frequentemente a ventos, raios, indivíduos velhos, doentes ou infestados por organismos xilófagos. Nessas situações, muitas vezes não se encontra material estéril nem material vegetativo de qualidade para fins de identificação.

Metodologias não destrutivas baseadas na assinatura espectral estão se tornando uma alternativa eficaz e complementar na identificação vegetal, permitindo a discriminação taxonômica em diversos níveis, desde famílias, gêneros, espécies e até morfotipos de várias partes das plantas, como folhas, frutos, sementes e tecido xilemático. Essa abordagem tem se mostrado rápida e confiável em comparação com a taxonomia tradicional (Horikawa et al. 2015; Paiva et al. 2021; Nguyen et al. 2022).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica analítica que se baseia na espectroscopia vibracional e mede a interação da radiação eletromagnética com os componentes químicos presentes na amostra. O espectro NIR abrange a faixa de número de onda de 12.000 - 4.000 cm^{-1} , sendo considerado uma "assinatura espectral" ou "impressão digital" da amostra. Esse espectro contém informações químicas importantes sobre o tipo e número de grupos funcionais, bem como ligações químicas C–H, N–H e O–H presentes na amostra (Durgante et al. 2013; Tang et al. 2018; Pasquini 2018).

Alguns estudos botânicos têm validado a eficácia da espectroscopia NIR. Castillo et al. (2008) e Severo (2010) demonstraram a utilidade da impressão digital foliar na classificação taxonômica. Lang et al. (2015, 2017) obtiveram altas taxas de acerto na identificação de plântulas e ramos ao nível de gênero e família de espécies amazônicas utilizando o NIR. Hadlich et al. (2018) aplicaram a espectroscopia no visível e NIR para reconhecer espécies arbóreas a partir do tecido da casca de árvores tropicais. No Brasil, há poucos estudos que usam o NIR para a identificação botânica com base no tecido xilemático (madeira), como Braga et al. (2011), Nisgoski et al. (2018), Ramalho et al. (2018) e Pace et al. (2019). No entanto, até o momento, não foram encontrados registros de estudos que utilizem o NIR para discriminar madeiras de árvores caídas naturalmente em florestas tropicais. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o uso da espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) na discriminação de árvores caídas da família Lecythidaceae da Amazônia Central.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma área de floresta tropical na região do Alto

Solimões, que abrange os municípios de Atalaia do Norte (comunidades Pau Mari e São Rafael), Benjamim Constant (Comunidade Faustino) e Jutai (Comunidades Novo Apostolado, Porto Belo e São Raimundo), todos localizados na Amazônia Central, no estado do Amazonas, Brasil (Figura 1).

A região possui um clima tropical úmido e superúmido, com uma média anual de precipitação de 2.800 mm e uma temperatura média de $29 \pm 2^\circ\text{C}$. A altitude média na região é de aproximadamente 65 m acima do nível do mar. Do ponto de vista geográfico, predominam terrenos semiplanos com solos do tipo latossolo amarelo, que são predominantemente argilosos, caracterizados por baixa taxa de permeabilidade e fertilidade (Maia e Marmos 2010; Saldanha et al. 2018).

No inventário florestal realizado na região, foram selecionadas árvores que estavam caídas no chão da floresta. Antes de prosseguir com a coleta, realizaram-se inspeções detalhadas para avaliar possíveis danos às árvores, incluindo sua condição fitossanitária. Foram medidos parâmetros dendrológicos, como altura total, altura comercial, diâmetro à altura do peito (DAP), volume total, e ainda azimute de cada indivíduo (Tabela 1). A maioria das árvores apresentava copas danificadas e não possuía material fértil para fins de identificação taxonômica. Suas raízes estavam expostas, mas o tronco parecia estar intacto. O levantamento das árvores caídas revelou uma grande ocorrência de indivíduos das famílias botânicas Fabaceae, Lecythidaceae, Moraceae, Myristicaceae, Euphorbiaceae, entre outras.

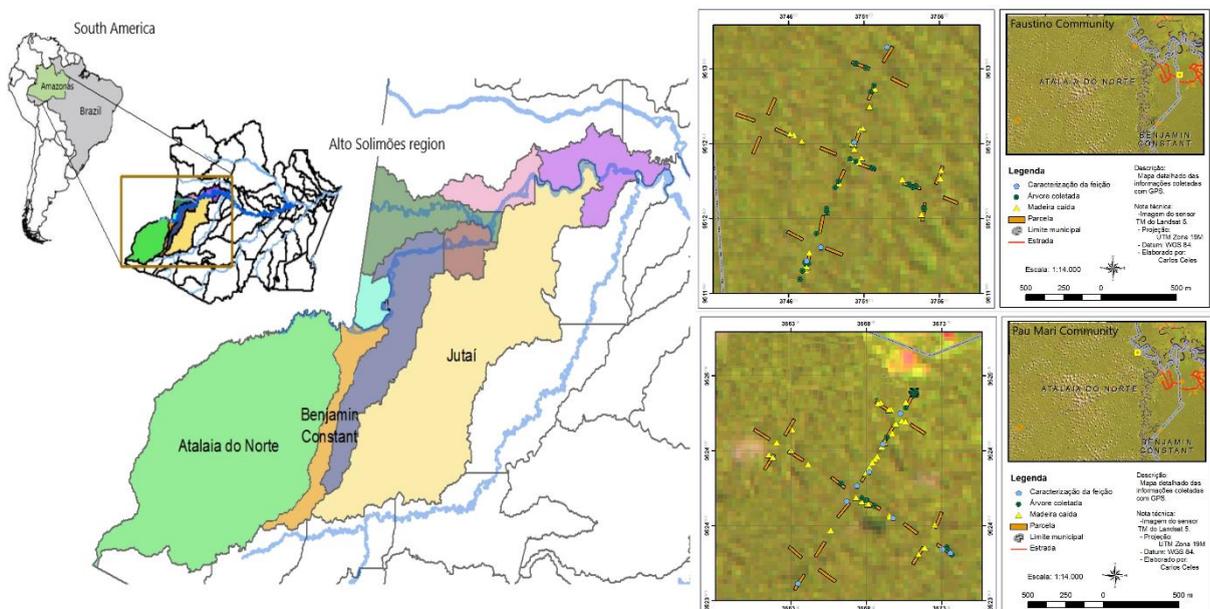


Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das árvores caídas naturalmente.

Sete árvores de matá-matá (*Eschweilera odora*) e tauari (*Couratari stellata*) da família Lecythidaceae (castanheiras) reconhecidas pelos especialistas de campo (parataxobotânicos FQ Reis e GA Mota) foram selecionadas para o estudo. De cada árvore, foram retirados discos de madeira com uma espessura de 10 cm (DAP) usando uma motosserra. Cada disco foi numerado e transportado para o Laboratório de Engenharia e Artefatos de Madeira (LEAM/COTEI/INPA – Manaus, Brasil). Para fins de identificação anatômica, foi retirada uma cunha correspondente a um quarto do disco utilizando uma serra-fita (modelo Videira), e esse material foi enviado ao Laboratório de Identificação e Anatomia da Madeira (LIAM/COTEI/INPA – Manaus, Brasil) para identificação ao nível de gênero e espécie, utilizando a técnica de confrontação (Freitas e Vasconcellos 2019), com amostras da Coleção Botânica - Xiloteca/PCAC/INPA. O restante de cada disco foi transformado em corpos de prova (20 x 20 x 30 mm), totalizando nove repetições por árvore.

Tabela 1. Árvores caídas naturalmente coletadas na região do Alto Solimões (Amazonas/Brasil).

Identificação		Local de coleta	Az (°)	Alt (m)	HT (m)	HC (m)	DAP (cm)	VT (m ³)
Campo	Xiloteca							
N° 18: Tauari <i>Couratari</i> sp.	<i>Couratari</i> sp.	BC (Faustino): 3°06' 39,6"S, 67°07'13,3"W	178	82	32,0	15,0	52,0	2,84
N° 286 Tauari <i>Couratari</i> sp.	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	JU (Porto Belo): 3°17' 19"S, 67°08'42,2"W	200	69	37,5	10,5	100,3	8,62
N° 362 Tauari <i>Couratari</i> sp.	<i>Lecythis usitata</i> Miers.	JU (S. Raimundo): 3°0' 10'24"S, 67°13'22,3"W	160	56	22,0	11,5	18,5	0,30
N° 83 Matá-matá <i>Couratari</i> sp.	<i>Couratari stellata</i> A.C. Smith	BC (Faustino): 3°11' 08,9"S, 67°08'59,4"W	229	89	18,6	12,5	20,5	0,35
N° 87 Matá-matá <i>Eschweilera</i> sp.	<i>Eschweilera odora</i> (Poepp. ex O.Berg)	AN (Pau Mari): 3°11' 06,5"S, 67°09'11"W	229	72	14,0	6,3	18,5	0,16
N° 163 Matá-matá <i>Eschweilera</i> sp.	<i>Eschweilera corea</i> (DC.) S.A.Mori.	AN (S. Rafael): 3°27' 0,9"S, 67°33'15,0"W	185	84	20,8	7,6	22,0	0,28
N° 312 Matá-matá <i>Eschweilera</i> sp.	<i>Holopyxidium</i> sp.	JU (N. Apóstolo): 3° 46'08"S, 67°26'32"W	180	68	26,0	14,5	26,0	0,66

AN: Atalaia do Norte; BC: Benjamim Constant; JU: Jutai; Az: azimute; Alt: Altitude; HT: altura total; HC: altura comercial; DAP: diâmetro na altura do peito; VT: volume total

Obtenção dos espectros NIR

Inicialmente as amostras foram aclimatadas por um período de sete dias (20 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$) para reduzir os possíveis efeitos de desvios instrumentais durante a digitalização da assinatura espectral. Os espectros foram obtidos dos corpos-de-prova utilizando um espectrômetro de infravermelho próximo com transformada de Fourier - FT-NIR (Thermo Fisher Scientific, model Antaris II). O sistema utiliza o software RESULT™ que opera no comprimento de onda de 10.000 a 4.000 cm^{-1} , com resolução de 8 cm^{-1} , 96 varreduras - espectro/amostra de 16 scan (Torralvo et al. 2020; Nascimento et al. 2022). Em cada amostra foram obtidos quatro espectros em cada plano (planos radial, tangencial e transversal) o n amostral do experimento (calibração e validação) foi composto de 756 espectros (7 árvores x 9 amostras x 3 planos x 4 leituras) que foram usados para análise multivariada. De madeiras de *Couratari*, *Eschweilera*, *Holopyxidium* e *Lecythis*, depositadas na coleção da Xiloteca/INPA/Brasil foram obtidos 252 espectros que foram utilizados na avaliação dos modelos de madeiras caídas e ainda estudo espectral (bandas /referência).

Processamento de dados e análise multivariada

O software TQ Analyst™ foi usado na análise multivariada e o OMNIC™ para avaliação das bandas. Antes desse procedimento, para reduzir a influência de várias fontes não relacionadas às informações físicas ou químicas transportadas pelos espectros brutos, foi aplicada a técnica de pré-processamento, correção de dispersão multivariada (MSC).

Na montagem da análise discriminante as variáveis dependentes são categóricas (gênero/espécie) e as variáveis independentes da função são a absorbância e o comprimento de onda do espectro NIR. O modelo de classificação desenvolvido consistiu em uma análise discriminante que utilizou o algoritmo de Mahalanobis (distância Mahalanobis – DM) para indicação de agrupamento em dois níveis de classificação botânica (gênero e espécie) para madeiras de árvores caídas da família Lecythidaceae. A DM funciona como uma métrica que determina a distância entre um vetor e a distribuição, no caso do espectro NIR a expressão é baseada nas bandas químicas que possivelmente atribui à classe que está mais próxima da base na DM.

Toda calibração e validação foram desenvolvidas em conjuntos de dados espectrais centrados na média de cada amostra, onde o universo amostral foi composto por 75% de amostras para calibração e 25% para validação (Tabela 2). A seleção aleatória foi realizada para definir as amostras selecionadas para cada modelo.

O desempenho dos modelos de identificação foi avaliado usando os parâmetros: Índice de Identificação $(\text{calibração/validação}) = \frac{N1}{N2} \times 100$, onde N1 = Número de amostras corretamente identificadas no modelo; N2 = Número total de amostras, e Erro Máximo de Classificação $= \frac{\sum E}{CA} \times 100$, onde $\sum E$ = Soma dos erros (calibração + validação); CA = Conjunto de amostra total.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos usados na modelagem FT-NIR.

Método quimiométrico	Região espectral $\lambda(\text{cm}^{-1})$	Tratamento matemático	Filtros	Conjunto de dados
Análise Discriminante	9.882–4.119	Sem tratamento 1ª derivada; 2ª derivada	Savitzky-Golay; Norris	Calibração = 564 espectros Validação = 188 espectros Teste = 252 espectros

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Discriminação de madeiras de árvores caídas

A questão central deste estudo foi avaliar se a espectroscopia de infravermelho próximo é capaz de distinguir madeiras de árvores caídas naturalmente ao nível de gênero e espécie da família Lecythidaceae. Até onde sabemos, nenhuma tentativa foi feita para discriminar esse tipo de material vegetal por meio de técnicas não destrutivas como a espectroscopia NIR. Uma vez que os métodos tradicionais destrutivos de identificação de madeira são complexos, demorados, trabalhosos e requerem especialização devido à sua dependência de características físicas, anatômicas e visuais do tecido xilemático.

A assinatura espectral NIR das madeiras das árvores caídas foi utilizada como entrada de dados para a análise discriminante. Os resultados apontaram um alto

índice de identificação tanto para o conjunto de calibração ($\geq 61\%$) quanto para a validação ($\geq 86\%$), e ao nível de gênero e espécie (Tabela 3 e 4), destacando a eficiência dos modelos quimiométricos desenvolvidos. Os modelos discriminantes n.º 5 (gênero) e 4 (espécie) mostraram-se robustos na classificação do tecido xilemático das árvores caídas. Além disso, o tratamento dos espectros com a segunda derivada, filtros Savitzky-Golay e Norris, melhorou a capacidade de discriminação, resultando em baixos índices de erro ($< 5\%$). Estes resultados indicam que o tratamento matemático pode potencializar a qualidade do sinal espectral NIR, indicando identificação correta da madeira, ou seja, na validação do modelo com amostras de árvores caídas (gênero) que não constavam no conjunto calibrados, a classificação correta foi de 100%. Amostras de madeiras amazônicas de coleção botânica foram testadas nos modelos quimiométricos, e apresentaram resultados satisfatórios (77% de identificação correta) ao nível de gênero, entretanto para espécie, os resultados apresentaram classificação incorreta.

Tabela 3. Parâmetros de avaliação de modelos quimiométricos para discriminação em gênero.

Modelos quimiométricos	Tratamento espectral	Índice de Identificação		Erro Máximo de Classificação	Teste*
		Calibração	Validação		
1	Espectros brutos, filtro Savitzky-Golay	83% (470 espectros)	93% (176 espectros)	14,55%	3% (8 espectros)
2	Espectros 1ª derivada, filtro Savitzky-Golay	83% (470 espectros)	93% (176 espectros)	14,55%	19% (48 espectros)
3	Espectro 1ª derivada, filtro Norris	61% (346 espectros)	86% (162 espectros)	32,80%	13% (33 espectros)
4	Espectro 2ª derivada, filtro Savitzky-Golay	83% (470 espectros)	100% (189 espectros)	14,55%	68% (171 espectros)
5	Espectro 2ª derivada, filtro Norris	98% (556 espectros)	100% (189 espectros)	1,46%	77% (194 espectros)

* comparação com amostra Xiloteca; modelo mais robusto está destacado em negrito

A espectroscopia NIR aliada à análise multivariada, tem demonstrado ser uma ferramenta robusta, e pode ser adotada como um método alternativo para a identificação/classificação de espécies tropicais ou de regiões temperadas com fins

taxonômicos. Isso se deve ao fato de que os resultados obtidos são rápidos e altamente confiáveis, conforme registros na literatura (Durgante et al. 2013, Horikawa et al. 2015, Pace et al. 2019, Karlinasari et al. 2021). No entanto, é importante ressaltar que não foram encontrados no registro de modelos espectrais específicos para a identificação taxonômica de árvores caídas naturalmente até o presente momento.

Tabela 4. Parâmetros de avaliação de modelos quimiométricos para discriminação em espécie.

Modelos quimiométricos	Tratamento espectral	Índice de Identificação		Erro máximo de Classificação	Teste*
		Calibração	Validação		
1	Espectros brutos, filtro Savitzky-Golay	86% (488 espectros)	88% (166 espectros)	13,49%	0%
2	Espectros 1 ^a derivada, filtro Savitzky-Golay	86% (488 espectros)	88% (166 espectros)	13,49%	0%
3	Espectro 1 ^a derivada, filtro Norris	91% (516 espectros)	88% (166 espectros)	9,79%	0%
4	Espectro 2 ^a derivada, filtro Savitzky-Golay	98% (556 espectros)	89% (168 espectros)	4,23%	9% (24 espectros)
5	Espectro 2 ^a derivada, filtro Norris	93% (527 espectros)	88% (166 espectros)	8,33%	0%

* comparação com amostra Xiloteca; modelo mais robusto está destacado em negrito

A variável utilizada na análise discriminante foi o algoritmo distância Mahalanobis (Figura 2 e 3), que possibilitou a observação de quatro agrupamentos (similaridade) *Couratari*, *Eschweilera*, *Holopyxidium* e *Lecythis*, com base nas características espectrais. Na Figura 2, a DM é de aproximadamente 3, com valores significativamente menores para os gêneros *Holopyxidium* e *Lecythis*, o que pode ser atribuído à similaridade nas bandas espectrais desses gêneros. Por outro lado, para as espécies de *Couratari* (Figura 3A) e *Eschweilera* (Figura 3B), a DM foi maior, em torno de 6, sugerindo que esse comportamento pode estar relacionado a marcadores quimiotaxonômicos botânicos (Barbosa et al. 2006, Fasciotti et al. 2015, Nascimento et al. 2019b).

A análise multivariada desempenha um papel fundamental na modelagem quimiométrica, uma vez que permite explorar relações complexas entre diversas

variáveis. No contexto da assinatura espectral NIR, essa técnica combina a absorvância com o comprimento de onda, incorporando uma variedade de informações sobre o analito de interesse. Isso possibilita a identificação de padrões, tendências e agrupamentos potenciais. Estudos desenvolvidos por Morozova et al. (2013) com espectroscopia NIR e conjunto DM validaram a eficiência desse método de reconhecimento de padrões baseado em distância, e concluíram que o algoritmo DM apresenta relações confiáveis ao considerar as características qualitativas das amostras. Um estudo conduzido por Wang et al. (2016) exemplifica o poder da metodologia não destrutiva em combinação com a DM para avaliar defeitos em madeiras. Os resultados deste estudo destacaram a robustez dos modelos desenvolvidos e sua superioridade em comparação a outros tratamentos matemáticos.

Outro exemplo relevante é o estudo realizado por Davrieux et al. (2010), que utilizou a espectroscopia NIR em conjunto com o algoritmo DM para discriminar carvão de origem das madeiras nativas *Tabebuia serratifolia* e *Eucalyptus grandis*. Nesse caso, os valores de DM obtidos foram de 40 e 80, respectivamente, permitindo a validação da discriminação com um índice de 100% de acerto. De acordo com Morozova et al. (2013), distâncias mais curtas indicam similaridade espectral com uma classe, números mais altos indicam dissimilaridade espectral. Vale ressaltar que a espectroscopia NIR é baseada na medida do comprimento de onda x absorvância, sendo uma variável intimamente associada à concentração química (Budinova et al. 2008; Prades et al. 2012). Nesse sentido, o presente estudo pode demonstrar a eficácia da análise multivariada em conjunto com a espectroscopia NIR e o algoritmo DM na identificação e classificação das madeiras caídas, de forma precisa e não destrutiva, potencializando seu uso alternativo na taxonomia alternativa.

Diferentes modelos quimiométricos têm sido empregados em estudos que utilizam a espectroscopia NIR para analisar madeira tratada termicamente, carvão, madeiras antigas e arqueológicas. Essas pesquisas observaram a degradação anatômica, química e físico-mecânica da matriz xilemática, conforme Davrieux et al. (2010), Hwang et al. (2016), Tong e Zhang (2016) e Lengowski et al. (2018).

Exempli gratia, Xie et al. (2015), compararam as propriedades da madeira arqueológica e moderna de *Phoebe zhennan* (Lauraceae) utilizando análise infravermelha com transformada de Fourier. Os resultados revelaram diferenças significativas nos componentes químicos das duas categorias de madeira. Os extra

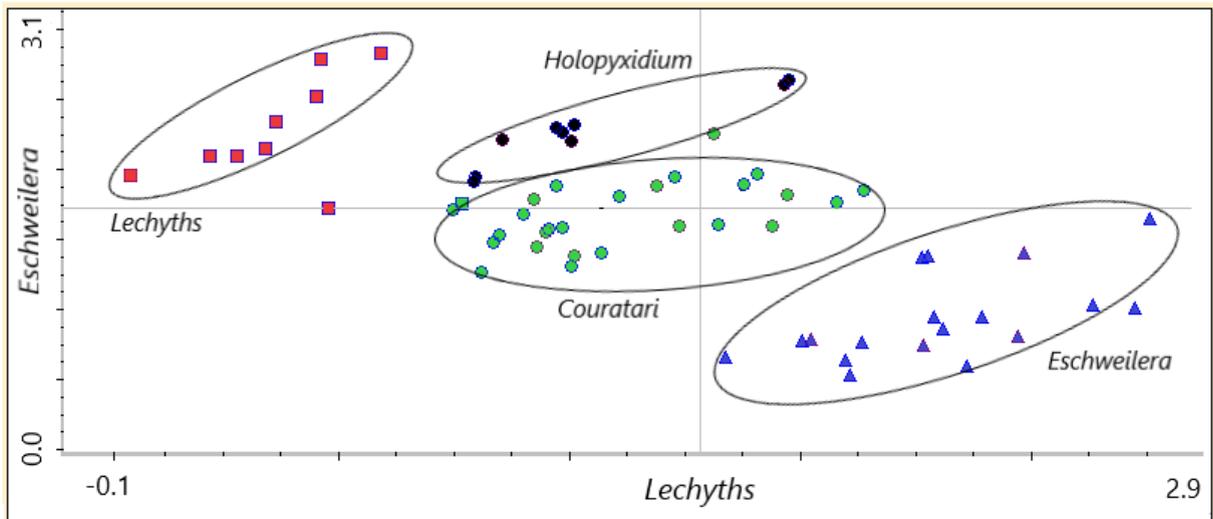


Figura 2. Distribuição do conjunto de calibração “gênero” de madeiras caídas de Lecythidaceae a partir do algoritmo distância Mahalanobis.

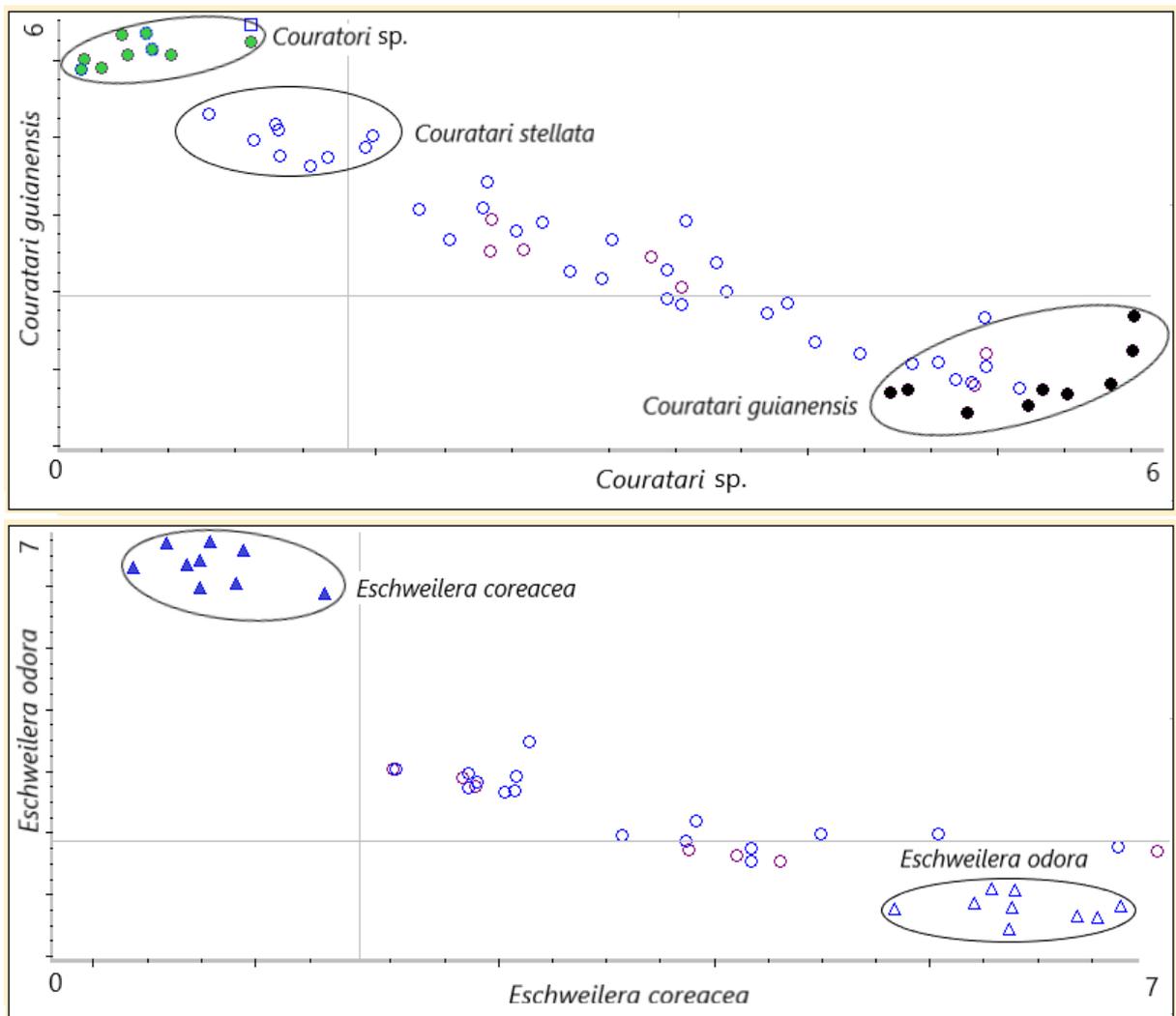


Figura 3. Distribuição do conjunto de calibração “espécie” de madeiras caídas de Lecythidaceae a partir do algoritmo distância Mahalanobis: A – tauari (*Couratari sp.*, *Couratari guianensis* e *Couratari stellata*); B – matá-matá (*Eschweilera coreacea* e *Eschweilera odora*).

tivos e a hemicelulose apresentavam-se degradados na madeira antiga, e a concentração de lignina era maior. A análise espectral das bandas com maior absorvância indicou que o material biologicamente mais novo (recém-abatido e não biodegradado) apresentava picos mais altos relacionados à concentração de componentes químicos da madeira.

Em outro estudo, Hwang et al. (2016) investigaram madeiras arqueológicas de *Pinus* na Coreia, utilizando espectroscopia NIR (8.000 - 4.000 cm^{-1}) em conjunto com análise multivariada. Foi obtido uma taxa de previsão correta de 100% para a identificação das madeiras de *Pinus densiflora* forma *erecta* Uyeki, *P. densiflora* Sieb. et Zucc., e *P. sylvestris* L. provenientes da Rússia e Alemanha. Semelhante aos estudos mencionados anteriormente, a presente pesquisa destacou a capacidade da espectroscopia infravermelha na discriminação de madeiras de árvores caídas naturalmente, mesmo quando apresentavam algum grau de degradação biológica, química e física. Esses estudos confirmam a versatilidade e eficácia da espectroscopia NIR na análise de uma ampla variedade de tipos de madeira, incluindo aquelas com diferentes graus de degradação, contribuindo assim para avanços significativos na caracterização e identificação do material lenhoso em diversos contextos.

Assinatura espectral NIR

As Figuras 3 e 4 exibem as assinaturas espectrais das madeiras de *Couratari stellata* e *Eschweilera odora* na região do infravermelho próximo (10.000 - 4.000 cm^{-1}). Nessa faixa, as bandas de absorção correspondem aos grupos funcionais característicos dos componentes químicos da madeira (Schwanninger et al. 2011; Fahey et al. 2018).

Uma observação inicial dos espectros pode sugerir uma possível similaridade entre as assinaturas espectrais da madeira de árvores caídas e a amostras da Xiloteca. No entanto, uma análise mais detalhada revela pequenas diferenças. Na Figura 3A, que apresenta os espectros de *C. stellata*, nota-se uma discrepância na região de 6.800 - 5.300 cm^{-1} . Enquanto na Figura 4A (*E. odora*), identificam-se diferenças em duas faixas, 6.900 - 6.200 e 5.100 - 4.600 cm^{-1} .

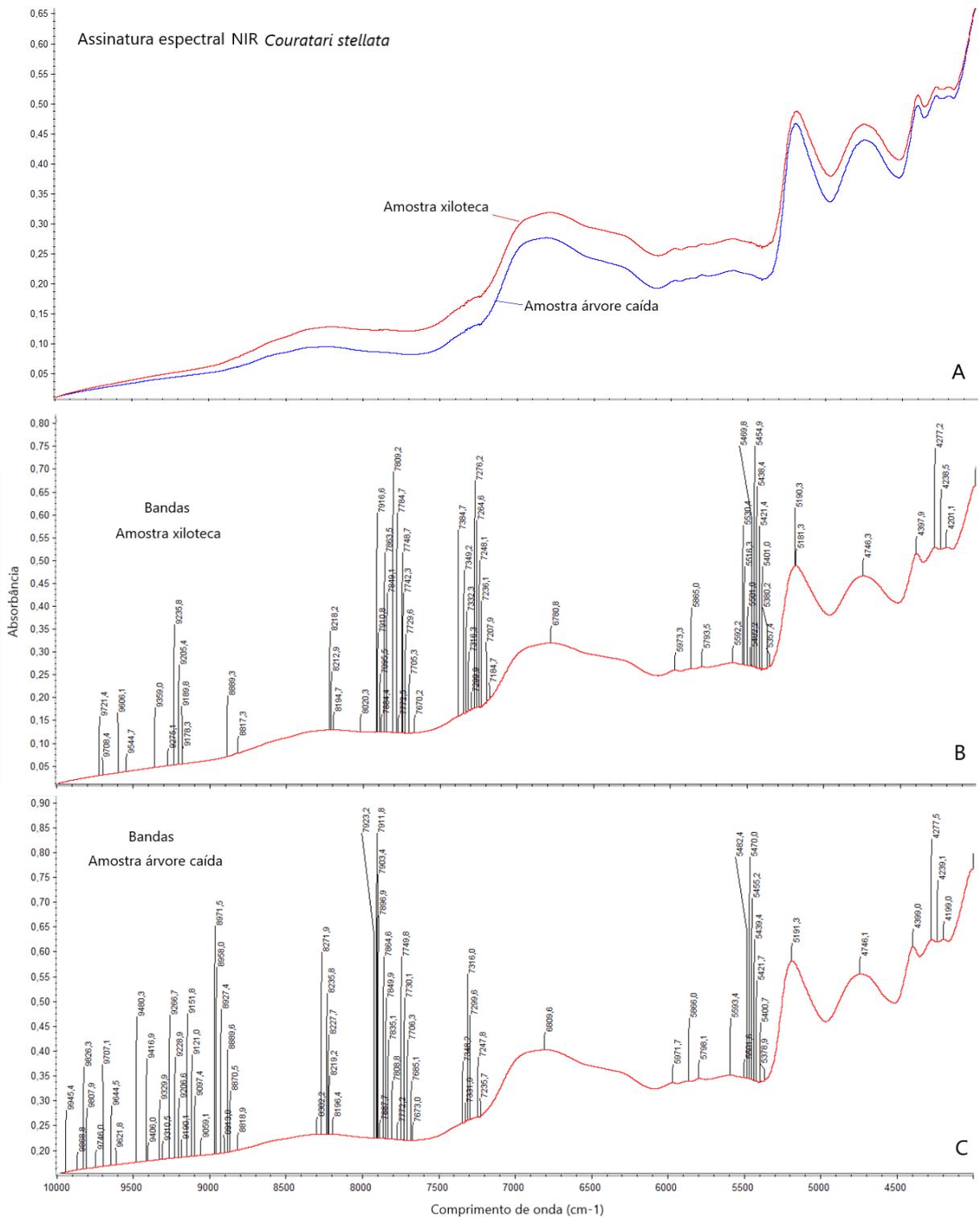


Figura 4. Assinatura espectral de *Couratari stellata*: A – Espectros de amostra da Xiloteca e árvore caída; B – espectro de amostra da Xiloteca com bandas com maior absorção do NIR; C - espectro de amostra de árvores caídas naturalmente com bandas com maior absorção do NIR.

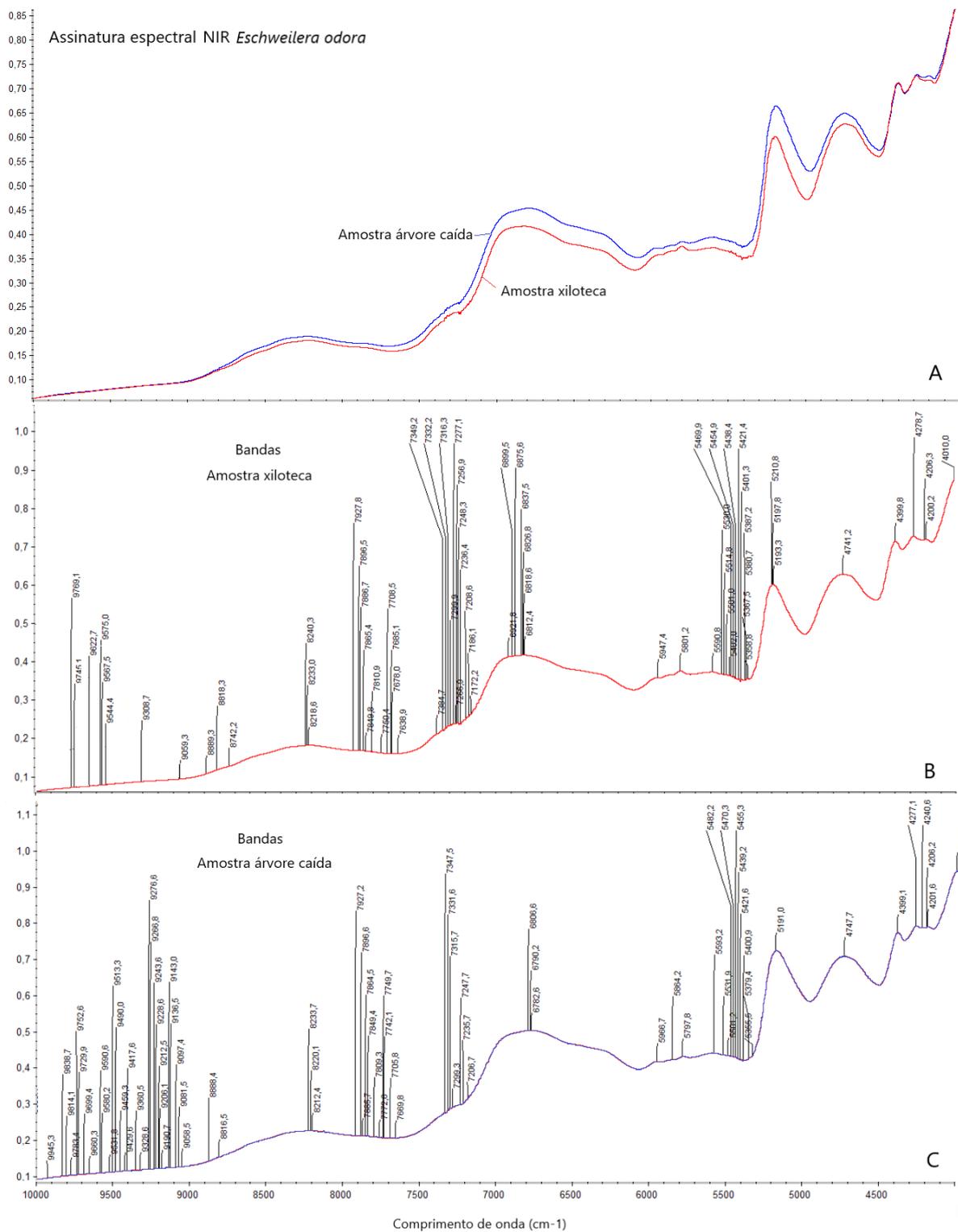


Figura 5. Assinatura espectral de *Eschweilera odora*: A – Espectros de amostra da Xiloteca e árvore caída; B – espectro de amostra da Xiloteca com bandas com maior absorção do NIR; C - espectro de amostra de árvores caídas naturalmente com bandas com maior absorção do NIR.

As características das bandas com maior absorção em relação ao comprimento de onda (cm^{-1}) podem fornecer informações essenciais para fins de classificação. Essa explicação abre a possibilidade de agrupamento com base no gênero e na espécie, referindo-se a tão chamada "assinatura espectral" ou "impressão digital" do material (Ricci et al. 2015; Souza et al. 2017). Outrossim, Nascimento et al. (2023), ao avaliarem a biodegradação de material lignocelulolítico por fungos *Pleurotus*, observaram resultados semelhantes em relação à altura das bandas no infravermelho próximo, chegando à conclusão de que as diferenças na absorbância estão relacionadas à concentração de compostos químicos, bem como à degradação das bandas associadas às ligações químicas características das amostras.

De modo geral, a aparência dos espectros analisados é bastante semelhante. A análise espectral foi conduzida utilizando o software OMNIC[®], que destacou as bandas com maior absorção nos espectros (Figura 3B, 3C, 4B e 4C). Essas informações são importantes para facilitar a compreensão das similaridades ou dissimilaridades no universo espectral avaliado.

A avaliação espectral do material botânico abordado neste estudo revelou diferenças significativas que parecem estar relacionadas às propriedades químicas do tecido lenhoso. Isso pode envolver a quantidade de metabólitos primários, como celulose, hemicelulose e lignina, bem como a quantidade e qualidade dos extrativos (metabólitos secundários). De acordo com Sandak et al. (2017), esses agrupamentos podem ser explicados pelos traços químicos e físicos do material vegetal. Os espectros NIR são representados pelo número de ondas *versus* absorbância, resultando da quantidade de energia absorvida pelas ligações características OH, CH, CN e CO. A interpretação dos espectros pode ser facilitada quando se dispõe de uma biblioteca de referência contendo picos e assinaturas digitais de compostos. Caso contrário, as interpretações das bandas dependem da comparação com espectros padrão (Schwanninger et al. 2011; Ricci et al. 2015).

Na Tabela 5 são apresentadas as bandas observadas na assinatura espectral das madeiras *C. stellata* e *E. odora*, tanto das amostras obtidas de árvores caídas como de Xiloteca. A análise das bandas indica que os espectros das amostras de árvores caídas exibem uma proporção de bandas superior a 50% em comparação com as amostras da Xiloteca, que inicialmente serviram como referência para as bandas originais, ou seja, amostras aparentemente não degradadas.

Tabela 5. Atribuição de bandas de absorção NIR de *Couratari stellata* e *Eschweilera odora*.

Espécie	Bandas de vibração/estrutura*	Madeira Xiloteca				Madeira Caída				
		λ -(cm ⁻¹)								
<i>Couratari stellata</i>	ν (O-H); δ (O-H); ν (C-H) = celulose	4.238, 7.772, 7.863, 7.917, 8.218, 9.236	4.746, 7.809, 7.884, 8.020, 9.178, 9.275	5.190, 7.785, 7.895, 8.195, 9.190, 9.359	6.781, 7.849, 7.911, 8.213, 9.205, 9.359	4.746, 7.850, 7.912, 9.190, 9.406	5.191, 7.865, 7.923, 9.207, 9.229	7.772, 7.888, 8.196, 9.310	7.809, 7.896, 8.219, 9.330	7.835, 7.903, 9.179, 9.330
	ν (C-O-C); δ (C-H) = hemicelulose	4.398, 7.730	5.865, 7.742	7.670, 7.749	7.705, 7.705	4.399, 7.730	5.866, 7.750	7.673, 7.685	7.706, 7.706	7.706, 7.750
	δ (C-H) = celulose/ hemicelulose	5.357, 5.438, 5.501, 7.276	5.380, 5.455, 5.516, 7.276	5.401, 5.470, 5.530, 7.276	5.421, 5.482, 5.592, 7.276	5.379, 5.470	5.401, 5.482, 5.502	5.422, 5.593	5.439, 6.810	5.455, 6.810
	ν (C-H); ν (C-H) + C-H ₂ ; ν (C-H) anel aromático; ν (C=C) anel aromático = lignina	4.201, 8.817	4.277, 8.889	5.794, 5.973	5.973, 5.973	4.199, 8.236, 8.890, 9.059	4.278, 8.272, 8.914, 9.097	5.798, 8.302, 8.927, 9.121	5.972, 8.819, 8.958, 9.152	8.228, 8.870, 8.971, 9.152
	ν (O-H) =lignina/ extrativos	7.185, 7.265, 7.349	7.208, 7.300, 7.385	7.236, 7.316	7.248, 7.332	7.236, 7.348	7.248, 7.300	7.316, 7.332	7.332, 7.332	7.332, 7.332
	ν (O-H) = água	5.181								
	não atribuído	9.545	9.606, 9.701	9.708	9.708	9.417, 9.746, 9.945	9.480, 9.808	9.622, 9.826	9.645, 9.870	9.707, 9.870, 9.945
Carga espectral = 70,31%										
<i>Eschweilera odora</i>	ν (O-H); δ (O-H); ν (C-H) = celulose	4.741, 7.850, 7.927	5.193, 7.865, 8.219	6.812, 7.887, 9.309	7.811, 7.896, 9.309	4.748, 7.809, 7.927	5.191, 7.849, 8.220, 9.244	6.783, 7.864, 9.191, 9.329	6.790, 7.886, 9.206, 9.360	6.807, 7.897, 9.212, 9.430
	ν (C-O-C); δ (C-H) = hemicelulose	4.400, 7.685	7.257, 7.705	7.639, 7.750	7.678, 7.750	4.400, 7.670	7.670, 7.706	7.706, 7.750	7.750, 7.750	7.750, 7.750
	δ (C-H) = celulose/ hemicelulose	5.359, 5.401, 5.455, 5.530, 6.837, 7.277	5.367, 5.402, 5.470, 5.591, 6.818, 7.277	5.381, 5.421, 5.501, 6.818, 6.827	5.387, 5.438, 5.515, 6.827	5.355, 5.455, 5.593	5.379, 5.470, 5.864	5.401, 5.482, 5.501	5.421, 5.532	5.439, 5.532
	ν (C-H); ν (C-H) + C- H ₂ ; ν (C-H) anel aromático; ν (C=C) anel aromático = lignina	4.010, 5.801, 8.742	4.200, 6.875, 8.818	4.206, 8.233, 8.889	4.279, 8.240, 9.059	4.201, 8816, 9.136	4.206, 8.888, 9.058	4.277, 9.081, 9.143	5.798, 9.081, 9.097	8.224, 9.097, 9.143
	ν (O-H) =lignina/ extrativos	6.899, 7.209, 7.300, 7.385	6.922, 7.236, 7.316, 7.385	7.172, 7.248, 7.332, 7.349	7.186, 7.266, 7.349, 7.385	7.207, 7.332, 7.347	7.236, 7.248	7.248, 7.299	7.316, 7.316	7.316, 7.316
	ν (O-H) = água	5.198	5.211							
	não atribuído	9.544, 9.745	9.567, 9.769	9.575, 9.623	9.623, 9.623	9.267, 9.513, 9.699, 9.839	9.277, 9.532, 9.753, 9.783	9.417, 9.580, 9.783, 9.814	9.459, 9.660, 9.814, 9.814	9.490, 9.660, 9.814, 9.839
Carga espectral = 53,00%										

*Literatura: Kelley et al. (2004); Donald and Burns (2007); Workman and Weyer (2007); Schwanninger et al. (2011); Abe et al. (2013); Sandak et al. (2017); Varga, et al. (2017); Fahey et al. (2018).

Esses resultados podem estar relacionados com a eficácia da classificação das madeiras ao nível de gênero, como apresentado na Tabela 3, onde foram utilizadas amostras da Xiloteca. No entanto, essa mesma avaliação, quando realizada ao nível de espécie com amostras da Xiloteca, resultou em índices de identificação baixos, conforme mostrado na Tabela 4.

As atribuições das bandas NIR para madeira podem ser confirmadas por outras metodologias analíticas como GC/MS, HPLC, RMN entre outras (Tsuchikawa e Kobori 2015; Yeon et al. 2019; Park et al. 2021). Em estudos anteriores, foram descritas as localizações das bandas em relação ao número de onda, e o componente que foi provavelmente absorvido nessa localização da banda e a vibração da ligação ou estrutura associada aos componentes químicos da madeira (Kelley et al. 2004; Donald e Burns 2007; Schwanninger et al. 2011; Sandak et al. 2017).

Teye et al. (2013) indicaram que na região de $9.000 - 5.000 \text{ cm}^{-1}$, os grupos carbonila, $\nu(\text{C}=\text{O})$ e as $\delta \text{ C-H}$, S-H , N-H , $-\text{CH}_2$ and $-\text{CH}_3$, correspondentes às ligações das estruturas polifenólicas, alcalóides e terpenos (extrativos). Souza et al. (2017) confirmaram a eficácia da análise de agrupamento por meio da ferramenta NIR, sendo possível associar a separação de três espécies vegetais a bandas características de compostos fenólicos e flavonoides na região $8.663 - 3.757 \text{ cm}^{-1}$. Em estudos de quimiosistemática, a presença de determinada classe química pode explicar os agrupamentos botânicos associados a fatores ambientais e evolutivos (Simões et al. 2017; Nascimento et al. 2019b).

Schwanninger et al. (2011) identificaram as principais bandas na região do infravermelho próximo para a madeira, destacando que a região de 6.717 e 6.060 cm^{-1} está relacionada ao primeiro harmônico $\nu(\text{O-H})$, enquanto os picos em 4.237 e 4.167 cm^{-1} correspondem a $\delta(\text{C-H})$, o que pode estar relacionado à estrutura da celulose. As bandas em torno de 4.750 , 5.780 e 7.812 cm^{-1} são atribuídas principalmente ao primeiro harmônico de grupos $\delta(\text{C-H})$ presentes na celulose e na hemicelulose. Para os compostos aromáticos, as bandas em 5.793 e 4.524 cm^{-1} são atribuídas a $\nu(\text{C-H})$ da lignina. A maioria dessas bandas foi confirmada nos espectros das amostras da Xiloteca, como apresentado na Tabela 5.

Xie et al. (2015) investigaram o espectro infravermelho de madeiras antigas e associaram bandas $\nu(\text{C}=\text{C})$ ao anel aromático da lignina com maior intensidade (concentração). No presente estudo foi observado comportamento similar as bandas de lignina para a assinatura da árvore caída de *C. guianensis*, e para *E. odora*, bandas

$\nu(\text{C-H})$ associadas a celulose e hemicelulose foram observadas em maior número para madeiras caídas.

A eficiência da espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) demonstrou ser uma ferramenta eficaz na discriminação de madeiras caídas naturalmente da família Lecythidaceae. Este estudo revelou a capacidade de separar os grupos ao nível de gênero e espécie usando uma abordagem estatística multivariada, aproveitando as bandas de absorção características na região NIR. Isso destaca que os agrupamentos observados são influenciados pelas propriedades químicas e físicas das amostras, sendo que a análise discriminante atua como uma ferramenta eficaz para o reconhecimento de padrões.

CONCLUSÃO

A espectroscopia no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) mostrou-se eficiente na discriminação de madeiras provenientes de árvores caídas, tanto em gênero (*Couratari*, *Eschweilera*, *Holopyxidium* e *Lecythis*) como em espécie (*Couratari guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, e *Lecythis usitata* e *Holopyxidium* sp.) pertencentes à família Lecythidaceae. O algoritmo de distância Mahalanobis, aplicado na análise discriminante, identificou de maneira precisa as madeiras caídas com base na similaridade e dissimilaridade das assinaturas espectrais NIR. Isso se mostrou particularmente valioso, uma vez que, na coleta de campo, a identificação baseava-se apenas nas denominações populares, como matá-matá (*Eschweilera* sp.) e tauari (*Couratari* sp.). A análise comparativa das assinaturas espectrais de amostras, árvores caídas e Xiloteca, revelou que mesmo após exposição às intempéries por algum tempo, a madeira de árvores caídas ainda preservava aproximadamente 50% das bandas originais, o que, por sua vez, favoreceu a discriminação ao nível de gênero. A precisão dos modelos NIR indicam a aplicabilidade dessa ferramenta de forma integrativa em estudos de taxonomia de materiais lenhosos provenientes de florestas tropicais, que são de difícil identificação. Isso se deve à capacidade de analisar um grande número de amostras de maneira rápida e eficaz, eliminando a necessidade de destruir amostras, como ocorre nas técnicas tradicionais.

APLICAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA INFRAVERMELHA NA DISCRIMINAÇÃO DE UCUÚBAS (MYRISTICACEAE) CAÍDAS NATURALMENTE NA AMAZÔNIA CENTRAL**

RESUMO

O espectro infravermelho carrega a chamada assinatura digital da planta, informação importante para estudos de taxonomia integrativa. O reconhecimento taxonômico de árvores caídas encontradas naturalmente no solo de florestas tropicais é bastante complexo, dada a falta de flores, frutos e folhas na coleta de campo. O estudo validou a capacidade da espectroscopia FT-NIR (Infravermelho próximo com transformada de Fourier) em identificar e caracterizar madeiras de árvores caídas naturalmente de *Virola* e *Iryanthera* (Myristicaceae) da Amazônia Central. Foram identificadas árvores encontradas no solo da floresta (Amazonas/Brasil) e oito troncos foram selecionados para o estudo. As amostras foram retiradas do tronco para identificação anatômica e obtenção de espectros NIR (10.000 a 4.000 cm^{-1}). Um total de 1.080 espectros foram coletados e utilizados na análise multivariada. A investigação das bandas de absorção na região NIR e o uso da quimiometria ajudaram na interpretação dos espectros, indicando tendências de similaridade ao nível de gênero e espécie. A análise discriminante linear foi capaz de diferenciar *Iryanthera ulei* e *Virola* (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 e *Virola* sp.2) que foram erroneamente classificadas em campo como uma única espécie (*Virola* sp.). A precisão desses resultados favorece a robustez dos modelos. Pode ser utilizado como uma nova ferramenta na taxonomia integrativa para material vegetal de florestas tropicais de difícil identificação, tendo a vantagem de analisar inúmeros testes de forma rápida, eficiente e sem a necessidade de destruição das amostras quando comparado com técnicas tradicionais.

Palavras-chave: árvore caída, taxonomia botânica, FT-NIR, características químicas, Myristicaceae, floresta tropical

**Artigo aceito para publicação na *Forest Science* (12/2023), Qualis A2 (Biodiversidade)

APPLICATION OF INFRARED SPECTROSCOPY IN THE DISCRIMINATION OF NATURALLY FALLEN UCUÚBA TREES (MYRISTICACEAE) FROM THE CENTRAL AMAZON

ABSTRACT

The infrared spectrum carries the so-called digital signature of the plant, important information for integrative taxonomy studies. The taxonomic recognition of fallen trees naturally found on the floor of tropical forests is quite complex, given the lack of flowers, fruits, and leaves in the field collection. Fourier transform near-infrared spectroscopy (FT-NIR) was evaluated for its potential use in the discrimination and characterization of wood from naturally fallen ucuúba trees (Myristicaceae) in Central Amazonia. Trees found on the forest floor (Amazonas/Brazil) were surveyed, and eight individuals were selected for the study. The material was removed from the trunk for anatomical identification and obtaining NIR spectra (10,000 to 4,000 cm^{-1}). A total of 1,080 spectra were collected and used in the multivariate analysis. Investigating the absorption bands in the NIR region and using chemometrics helped interpret the spectra, indicating trends of similarity at the level of genus and species. Linear discriminant analysis was able to differentiate *Iryanthera ulei* and *Virola* (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 and *Virola* sp.2) that were misclassified in the field as a single species (*Virola* sp). The accuracy of these results favors the robustness of the models. It can be used as a new tool in the integrative taxonomy for plant material from tropical forests that are difficult to identify, having the advantage of analyzing numerous tests quickly, efficiently, and without the need for the destruction of the samples when compared with traditional techniques.

Keywords: fallen wood, botanical taxonomy, FT-NIRS, chemical traits, Myristicaceae, tropical forest

INTRODUÇÃO

A Amazônia é a floresta tropical com maior biodiversidade na Terra e fornece uma riqueza de bens e serviços ecossistêmicos de reconhecida importância global (De Salles et al. 2020). Sua diversidade vegetal reflete em 11.676 espécies arbóreas

(1.225 gêneros e 140 famílias) com traços específicos em suas madeiras, como a densidade, cor, textura, resistência mecânica e biológica, caracteres importantes para indicação de uso no campo da botânica econômica (Costa et al. 2021; Prance 1989; ter Steege et al. 2016).

As espécies madeireiras encontradas no bioma amazônico estão agrupadas nas principais famílias botânicas: Fabaceae, Lauraceae, Sapotaceae, Lecythidaceae, Moraceae, Myristicaceae dentre outras (INPA/CPPF 1991; Cysneiros et al. 2018). Myristicaceae apresenta distribuição Pantropical e suas espécies são encontradas no dossel e sub dossel das florestas. A família é constituída por 20 gêneros, onde cinco são endêmicos na América (58 espécies), sendo que *Virola* e *Iryanthera* apresentam ampla distribuição na bacia Amazônica (Vicentini e Rodrigues 1999; Brito et al. 2023). Em levantamentos florísticos o nome popular ainda causa grandes confusão para identificação botânica, e na Amazônia é muito comum a designação do nome “virola” e “ucuúba” para mesma espécie, entretanto, essa nomenclatura é enganosa, visto que, na verdade, podem ser diferentes espécies e até mesmo gênero, como os indivíduos de *Iryanthera*, *Osteophloeum* e *Virola* (Rodrigues 1980; Vicentini e Rodrigues 1999; Martins-da-Silva et al. 2014).

Árvores caídas naturalmente registradas em inventários florestais são classificadas como uma necromassa lenhosa, e essa variável pode ser aplicada em equações de volume para estimativa da biomassa em florestas tropicais (Higuchi et al. 2015; Freitas et al. 2019). A queda dessas árvores na floresta está associada principalmente a ventos intensos, raios, idade avançada, competição, ocorrência de ocos e ataque de organismos xilófagos, nas quais as madeiras dessas árvores são significativamente alteradas em suas propriedades física, mecânica, química e biológica (Harmon et al. 1986; Stokland et al. 2012; Ramos et al. 2021). Quanto à parte de estudos taxonômicos, econômicos e tecnológicos dessa matéria-prima pouco se conhece sobre essa “madeira morta”. Portanto, a identificação botânica desses indivíduos, é fundamental para auxílio de estudos ecológicos de mortalidade de árvores nativas, biomecânica, manejo florestal, economia, bem como no campo da tecnologia da madeira, para destinação sustentável dessa biomassa (Aleixo et al. 2019; Costa et al. 2021; Ramos et al. 2021; Dionísio et al. 2022).

A identificação botânica padrão de espécies vegetais considera a filogenia, biogeografia baseadas na comparação de características fenológicas a partir de material fértil (flores e frutos) ou estéril (folhas) da amostra, produção de exsicata,

registro e depósito do material em herbário ou coleções botânicas (Vicentini e Rodrigues 1999; Di Domenico et al. 2012), entretanto, essa amostragem não tem aplicação para identificação de árvores caídas naturalmente na floresta. A anatomia comparativa da madeira é a principal ferramenta aplicada para amostras dessas árvores, porém esse método é complexo, e requer alto nível de prática para identificação correta ao nível de gênero e espécie (Freitas e Vasconcellos 2019; LPF/SFB 2023), considerando ainda a questão que as amostras geralmente apresentam características anatômicas alteradas em determinado nível em função da biodegradação acelerada no chão da floresta, dificultando a identificação por métodos convencionais.

Técnicas não invasivas vem sendo utilizadas nos últimos anos nos estudos de taxonomia botânica, visto que podem auxiliar processos de discriminação de agrupamentos ao nível de família, gênero, espécies e até morfotipos de parte vegetais tais como folhas, frutos, semente e tecido xilemático, de forma rápida e confiável a taxonomia tradicional (Zhao et al. 2015; Musse e Van As 2018; Nascimento et al. 2022; Nguyen et al. 2022). Prata et al. (2018) em seus estudos botânicos sobre Rubiaceae, aplicaram a taxonomia integrativa, que reuni informações da morfologia, ecologia e espectroscopia da planta, indicando o monofiletismo de *Pagamea guianensis* (14 espécies e uma subespécie).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é uma técnica analítica não destrutiva, fundamentada na espectroscopia vibracional, medindo a interação da radiação eletromagnética com os componentes químicos presentes na amostra (Lang et al. 2015; Hein et al. 2017; Pasquini 2018). O espectro NIR cobre a faixa de comprimento de onda de $12.000 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$ (750 - 2.500 nm), sendo considerado uma “assinatura espectral” ou “impressão digital” da amostra, que carrega informações químicas importantes sobre o caráter e o número de grupos funcionais, com ligações químicas C–H, N–H e O–H (Durgante et al. 2013; Jouquet et al. 2014; Tang et al. 2018).

A extração de informações do espectro infravermelho é obtido a partir da quimiometria (estatística e química), que correlaciona as informações de referência (biblioteca) a bandas químicas a fim de responder às características quantitativas/qualitativas do material orgânico, onde os dados são calibrados e criados modelos de classificação (discriminação) e caracterização (Horikawa et al. 2015; Hein et al. 2017; Nascimento et al. 2021). No Brasil são poucos os bancos de espectros

NIR de madeiras tropicais nativas, existe registro de depósito no Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF-SFB, Brasília), Universidade Federal de Lavras (UFLA, Minas Gerais), e no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA, Amazonas). Essas bibliotecas digitais de madeira são fundamentais na modelagem NIR de identificação botânica correta, de forma rápida e eficaz (Pace et al. 2019; Nascimento e Cruz 2020; LPF/SFB 2023).

Utilizando a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Buoso et al. (2016) confirmou a eficiência da ferramenta no agrupamento de madeiras de coníferas e folhosas. Resultados semelhantes foram encontrados por Yang et al. (2015) que testaram a viabilidade do sistema NIR para identificação das madeiras dos gêneros *Pometia*, *Instia* e *Couratari*, adquiridas no mercado de Dongba (Pequim/China), onde obtiveram precisão do conjunto de testes de 90%. Soares et al. (2017) utilizando a análise discriminantes aos espectros NIR de espécies de madeira tropical (*Carapa guianensis*, *Cedrela odorata*, *Erismia uncinatum*, *Hymenaea courbaril*, *Micropholis melinoniana* e *Swietenia macrophylla*), obtiveram taxas de eficiência superiores a 90%.

Outros estudos apresentaram também alto desempenho para classificação de espécies de madeiras brasileiras, como, por exemplo, pesquisas de Nisgoski et al. (2018) para madeiras da Caatinga, Pace et al. (2019) da mata atlântica e Santos et al. (2021) da região da Amazônia brasileira. A eficiência da ferramenta NIR não fica apenas nas análises qualitativas, estudos desenvolvidos por Fernandes et al. (2017), Mancini et al. (2020), Ma et al. (2018), Nascimento et al. (2021) entre outros, apresentaram potencial para caracterização das propriedades tecnológicas da madeira. Apesar da existência destes estudos de identificação taxonômica, ainda existe uma lacuna no conhecimento sobre a identificação do tecido xilemático de árvores caídas naturalmente, em especial com aplicação da tecnologia NIR. Diante disso, o presente estudo possui as seguintes questões norteadoras: Como diferenciar madeiras de árvores caídas de ucuúba? A espectroscopia NIR pode ser utilizada como ferramenta alternativa para solução dessa questão? Tentando responder essa pergunta, o objetivo do estudo foi validar a capacidade da espectroscopia FT-NIR (Infravermelho próximo com transformada de Fourier) em identificar e caracterizar madeiras de árvores caídas naturalmente de *Virola* e *Iryanthera* (Myristicaceae) da Amazônia Central.

MATERIAL E MÉTODOS

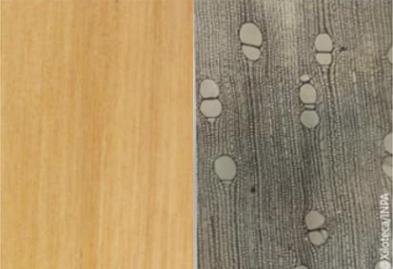
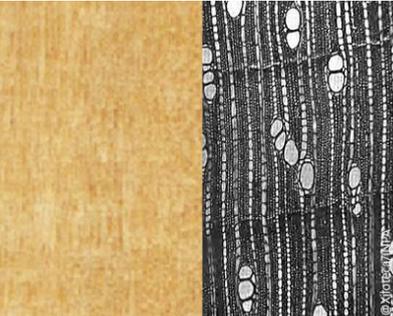
Área de coleta e preparação das amostras

A pesquisa foi realizada com amostras coletadas em floresta madura de terra firme localizadas nos municípios de Jutai (comunidades de Bacabal, Monte Tabor, Nova Esperança e Piranha) e Atalaia do Norte (comunidades de Adolpho, Pau Mari, Pedro Castilho e São Rafael) no estado do Amazonas/Brasil (Amazônia Central). A região apresenta clima tropical chuvoso (precipitação média anual ~ 2.600 mm) e temperatura média anual de 29 ± 2 °C, tendo altitude média de 65 m acima do nível do mar. Predominam terrenos semiplanos com solos do tipo latossolo amarelo, de natureza argilosa, baixo índice de permeabilidade e fertilidade. Quanto à vegetação da região é classificada como floresta ombrófila densa aluvial (Cardona-Calle et al. 2014; Saldanha et al. 2018). As árvores caídas foram inicialmente inspecionadas quanto a possível degradação (estado de fitossanidade), e efetuada sua medição (altura total, diâmetro da altura do peito - DAP e azimute).

Árvores de diferentes famílias botânicas foram encontradas no solo da floresta, com a copa destruída e a maioria com raízes expostas. Myristicaceae assinalou entre as famílias de maior frequência (Fabaceae, Lauraceae, Lecythidaceae, Moraceae), e oito árvores foram selecionadas para o estudo, ressaltado que a identificação de campo pelos parataxobotânicos (FQ Reis e GA Mota) indicavam como sendo árvores de ucuúba (*Virola* sp.).

De cada árvore foram retirados discos de 10 cm de espessura no DAP com auxílio de uma motosserra. Esse material foi numerado e transportado para o laboratório de engenharia e artefatos de madeira (LEAM/COTEI/INPA). Para identificação anatômica, foi retirada uma cunha (1/4 do disco) do disco em serra-fita (Videira), e enviada para o laboratório de identificação e anatomia da madeira (LIAM/COTEI/INPA) que por meio da técnica de confrontamento (Xiloteca INPA/MCTI) foram identificadas (Tabela 1). O restante do disco foi fracionado em corpos de prova (20 x 20 x 30 mm) na seção transversal, totalizando nove repetições por árvore para obtenção dos dados espectrais.

Tabela 1. Resumo das características de campo e laboratório das madeiras de Ucuúba.

Observação geral e traços anatômicos da madeira	Plano tangencial/transversal 50X
<p><i>Iryanthera ulei</i> Warb. X5021 4°34'40"S 70°43'7"W; 4°24'37"S 70°12'34"W Sin. <i>Iryanthera hostmannii</i> (Benth.) Warb. 3°16'13"S 67°19'21"W</p> <p>Madeira de densidade média a alta, cerne difere do alburno pela coloração castanha escuro, alburno em tons mais claros, textura fina e grã direita. Parênquima axial (apotraqueal terminal em linhas ou pouco), vasos em disposição uniforme, frequente, solitários e múltiplo de 2 ($\varnothing = 90-150 \mu\text{m}$), e raios dispostos irregularmente (bisseriados). DAP = 18,5-20,5 cm; H = 13-23,5 m; AZ³ = 54°, 275° e 325°</p>	
<p><i>Virola elongata</i> Warb. X6185 3°34'8"S 67°32'28"W Sin.: <i>Myristica elongata</i> Benth.; <i>Palala elongata</i> Kuntze; <i>Virola cuspidata</i> Warb.; <i>Virola elongata</i>; var. <i>longicuspis</i> Warb.; var. <i>punctata</i> Warb.</p> <p>Madeira de densidade média a alta, cerne e alburno indistinto com coloração creme uniforme e textura fina com grã direita. Parênquima axial (paratraqueal escasso), vasos em disposição uniforme, solitários e múltiplos de dois ($\varnothing = 90-145 \mu\text{m}$), e raios dispostos irregularmente. DAP = 26,5 cm; H = 33 m; AZ³ = 230°</p>	
<p><i>Virola pavonis</i> (A.DC.) A.C.Sm. X2959 3°6'39"S 67°7'14"W Sin.: <i>Myristica pavonis</i> A.DC.; <i>Palala pavonis</i> (A.DC.) Kuntze; <i>Virola elliptica</i> A.C.Sm.; <i>Virola venosa</i>; var. <i>pavonis</i> Warb.</p> <p>Madeira de densidade moderadamente alta, cerne e alburno indistintos, de cor creme-claro, textura média e superfície lustrosa com grã direita. Parênquima axial (paratraqueal escasso e apotraqueal marginal em linhas), vasos em distribuição difusa uniforme, solitários e múltiplos de 2 e 3 com agrupamentos radiais ($\varnothing = 80-160 \mu\text{m}$) e raios irregular (unisseriados). DAP = 24 cm; H = 21 m; AZ³ = 16°</p>	
<p><i>Virola surinamensis</i> Warb. X710 4°35'43"S 70°12'21"W Sin.: <i>Myristica surinamensis</i> Rottb; <i>Palala surinamensis</i> (Rottb.) Kuntze</p> <p>Madeira de densidade baixa, cerne se distingue do alburno por uma coloração creme, alburno mais claro, textura fina a média e grã regular. Parênquima axial (paratraqueal escasso). Vasos em distribuição difusa uniforme, solitários e múltiplos de 2 e 3 ($\varnothing = 90-180 \mu\text{m}$) e raios irregulares (uni e bisseriados). DAP = 24 cm; H = 23,3 m; AZ³ = 200°</p>	
<p><i>Virola</i> sp.1 X552 4°18'15"S 70°17'24"W</p> <p>Madeira de densidade de baixa a média, cerne e alburno pouco diferenciado de cor creme-claro, textura fina e grã direita. Parênquima axial (paratraqueal e/ou apotraqueal marginal). Vasos em distribuição difusa uniforme, às vezes apresenta resinas/tilos, são do tipo solitários, múltiplos de 2 e 3, e raríssimos de 5 ($\varnothing = 90-180 \mu\text{m}$), os raios apresentam disposição irregular (bisseriados, raros unisseriados). DAP = 23 cm; H = 22,40 m; AZ³ = 115°</p>	
<p><i>Virola</i> sp.2 X550 3°07'22"S 67°07'17"W</p> <p>Madeira de densidade média, cerne indistinto, de cor creme amarelado brilhante, textura média, grã direita, superfície lustrosa; gosto levemente pronunciado. Parênquima axial (paratraqueal escasso, vasicêntrico e apotraqueal marginal). Vasos em distribuição difusa uniforme, solitários, múltiplos de 2 e 3, e esporadicamente múltiplos em agrupamentos radiais de 5, raros em arranjos racemiformes ($\varnothing = 70-140 \mu\text{m}$). Raios irregulares (unisseriados, bisseriados trisseriados e raramente tetras seriados). DAP = 28cm; H = 25 m; AZ³ = 343°</p>	

DAP = diâmetro da altura do peito; H = altura total; AZ³ = azimute

Obtenção dos espectros NIR e análise de dados

Antes da obtenção dos espectros, as amostras das árvores caídas, foram aclimatadas por um período de sete dias (20 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$) e a seguir, os espectros infravermelho foram obtidos dos corpos-de-prova utilizando um espectrômetro de infravermelho próximo com transformada de Fourier - FT-NIR (Thermo Fisher Scientific, model Antaris II). O sistema utiliza o software Result Integration que opera no comprimento de onda de 10.000 a 4.000 cm^{-1} , com resolução de 8 cm^{-1} , 96 varreduras - espectro/amostra de 16 scan (cada espectro carrega 750 pontos de informação) (Torralvo et al. 2020; Nascimento et al. 2022). Em cada amostra foram obtidos cinco espectros em cada plano (planos radial, tangencial e transversal) o n amostral do experimento (calibração e validação independente) foi composto de 1.080 espectros (8 árvores x 9 amostras x 3 planos x 5 leituras) que foram usados para análise multivariada (análise de componentes principais - PCA; análise discriminante linear – LDA). De amostras de madeiras do gênero *Iryanthera* e *Virola* depositadas na coleção da Xiloteca/INPA/Brasil foram obtidos 180 espectros utilizados na validação cruzada *leave-one-out* (LOO).

O software TQ Analyst™ foi usado na análise multivariada. Antes desse procedimento, para reduzir a influência de várias fontes não relacionadas às informações físicas ou químicas transportadas pelos espectros brutos, foi aplicada a técnica de pré-processamento, correção de dispersão multivariada (MSC). Posteriormente, os dados foram explorados por meio da PCA, para observação inicial dos espectros, e para avaliar se havia semelhança entre eles e possível comportamento de agrupamento. Nesta análise, considerou toda a extensão do espectro NIR.

Na montagem do modelo preditivo (LDA) as variáveis dependentes são categóricas (gênero/espécie) e as variáveis independentes da função são a absorbância e o comprimento de onda do espectro NIR. Cada categoria dependente é codificada como um grupo e o resultado é uma função discriminante que melhor distingue entre os grupos com base em uma combinação das variáveis independentes (Hair Jr. et al. 2009). Nesse sentido, nosso estudo investigou dois níveis de classificação botânica para as árvores caídas: 1 – gênero e 2 – espécie, a partir de modelos quimiométricos eficientes (Tabela 2).

Utilizou-se o método Holdout (70-30) para validação dos modelos e LOO para

classificação de amostras fora do conjunto de calibração e validação interna. Uma matriz de confusão foi criada a partir dos resultados do LOO e a acurácia do modelo foi determinada pela equação (Faceli et al. 2011): $\text{Precisão} = \frac{VP}{VP+FP}$, onde VP = Verdadeiro positivo (classe correta) e FP = Falso positivo (classe incorreta).

Os softwares PAST Versão 4.08 (Hammer et al. 2001) e Minitab® 21.1 foram utilizados na análise multivariada dos espectros NIR, que auxiliaram as análises de similaridade das amostras.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos usados na modelagem FT-NIR.

Método quimiométrico	Região espectral analisada	Tratamento matemático	Suavização	Conjunto de dados*
Holdout LOO	9.881 – 4.119 cm ⁻¹	Sem; 1ª derivada; 2ª derivada	MSC; Savitzky-Golay (7 pontos; 3ª polinômio); Norris (5 segmentos, 5 intervalos)	Calibração = 630 Validação = 270 Teste = 360

* número de espectros; MSC = correção de dispersão multivariada; LOO = *leave-one-out*

Na segunda parte do estudo, as propriedades das madeiras caídas foram estimadas a partir de modelos PLS (*Partial Least Squares regression*) desenvolvidos por Nascimento et al. (2019a) e Nascimento e Cruz (2020) para prever traços químicos, físicos e mecânicos de madeiras tropicais amazônicas utilizando referência de ASTM (2021), NBR (2022) e COPANT (1973) para determinação do teor de extrativos totais, taninos e polifenóis totais, lignina Klason, umidade, densidade básica, poder calorífico superior e módulo de elasticidade. Esses modelos são baseados na correlação dos espectros NIR (madeira) com resultados dos testes destrutivos (via úmida), utilizando o software TQ Analyst™. Assim, todos os resultados obtidos posteriormente para as propriedades da madeira tornam-se não destrutivos (estimativa), ou seja, o espectro NIR da madeira é obtido e correlacionado com os dados quimiométricos, onde a assinatura do espectro é correlacionada ao conjunto de dados. A Tabela 3 mostra os parâmetros quimiométricos utilizados nos modelos preditivos de traços da madeira, a partir de 1.200 amostras distribuídas em 40 espécies de madeira da floresta amazônica, onde cada espécie é representada por três indivíduos e 10 amostras.

Tabela 3. Modelos NIR utilizados para estimativa das propriedades tecnológicas de madeira de Ucuúba.

Modelos	Tratamento /filtro	Banda espectral (cm ⁻¹)	Nº de amostras	Rc ²	RMSEC	RMSEP	RPD	Incerteza %	Faixa padrão
Extrativos totais (%)	1ª derivada/ Norris	7.308–4.238	120	0,94	0,73	0,42	3,66	1,62	1,08–17,30
Taninos e polifenóis (%)	2ª derivada/ Norris	6.036–4.315	120	0,97	2,00	5,18	4,10	5,18	0,13–13,60
Lignina (%)	2ª derivada/ Norris	7.332–5.187	120	0,99	0,49	0,84	3,52	1,15	21,56–44,35
Umidade (%)	2ª derivada/ Norris	6.070–5.500	60	0,99	0,15	1,30	3,53	1,40	10,14–15,51
Poder calorífico superior (cal/g)	1ª derivada/ Savitzky-Golay	7.450–4.090	90	0,94	49,30	62,40	3,99	4,01	4.000–5.263
Densidade básica (g/cm ³)	Sem tratamento	10.000–4.000	64	0,91	0,07	0,10	3,69	11,02	0,40–1,00
Módulo de elasticidade (MPa)	1ª derivada/ Savitzky-Golay	5.360–4.000	120	0,90	1.250	1.910	4,09	4,36	7.060–19.420

Rc² = Coeficiente de determinação da calibração; RMSEC = Erro quadrado médio de calibração, RMSEP = Erro quadrado médio de predição; RPD = Desempenho/Performance.

RESULTADOS

Espectros NIR e Classificação botânica de Myristicaceae

O principal desafio para o reconhecimento taxonômicos da madeira de árvores caídas naturalmente no chão da floresta foi a inexistência de material fértil (flores e frutos) e não fértil (folhas) para um pareamento com amostras referências de coleção botânica (herbário). A assinatura espectral na região do infravermelho próximo (NIR) é um recurso valioso na classificação correta de material vegetal e o estudo apresenta modelos preditivos para classificação de madeiras de árvores caídas de Myristicaceae. O universo espectral das madeiras estudadas são apresentados nas Figuras 1 e 2. A faixa de 6.000 a 4.000 cm⁻¹ compreende uma região onde se encontram bandas de combinação. Enquanto a faixa de 9.000 a 5.000 cm⁻¹ engloba o 1º e 2º *overtone*, região que carrega informações importantes sobre os componentes

do tecido xilemático, e, em geral, nesta faixa espectral encontra-se baixo ruído.

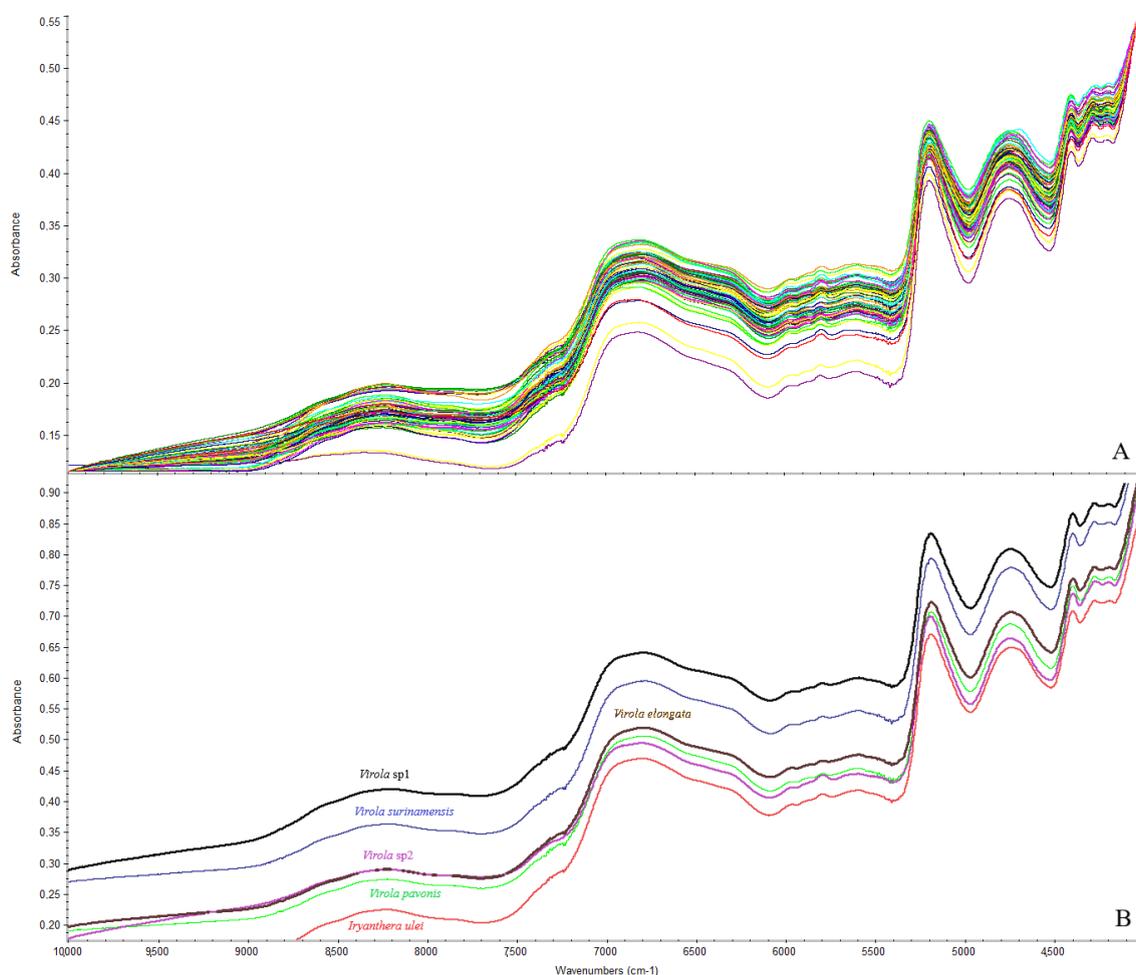


Figura 1. Espectros NIR de madeira de árvores caídas: A – Conjunto de espectros sem tratamento; B – Espectro representativo de cada espécie.

Os espectros NIR obtidos com resolução de 8 cm^{-1} pode carregar cerca de 750 tipos de informações, caracterizadas principalmente pelas ligações CH, OH e CO que representa bandas específicas de compostos como lignina, carboidratos (celulose e hemiceluloses) e ainda metabólitos secundários (taninos, alcaloides, terpenos, saponinas entre outros), onde essas bandas contribuem para elucidação de estudos de reconhecimento botânico. Uma análise visual rápida dos espectros NIR (Figura 1A) indicam que a maioria das espécies estudadas apresentam possível similaridade, o que dificulta a diferenciação visual. As bandas na região de $5.000\text{-}4.000$ e $7.100\text{-}6.500 \text{ cm}^{-1}$ são responsáveis por alta absorbância, e a região de 10.000 a 8.500 cm^{-1} apresentam menor intensidade, possivelmente isso ocorre pela diferença de concentração química e/ou tecido degradado. O espectro médio original de *Iryanthera*

ulei (Figura 1B) traçado na cor vermelha, foi localizado na região mais baixa do conjunto espectral, onde essa informação pode indicar a distinção dos demais indivíduos de *Virola*.

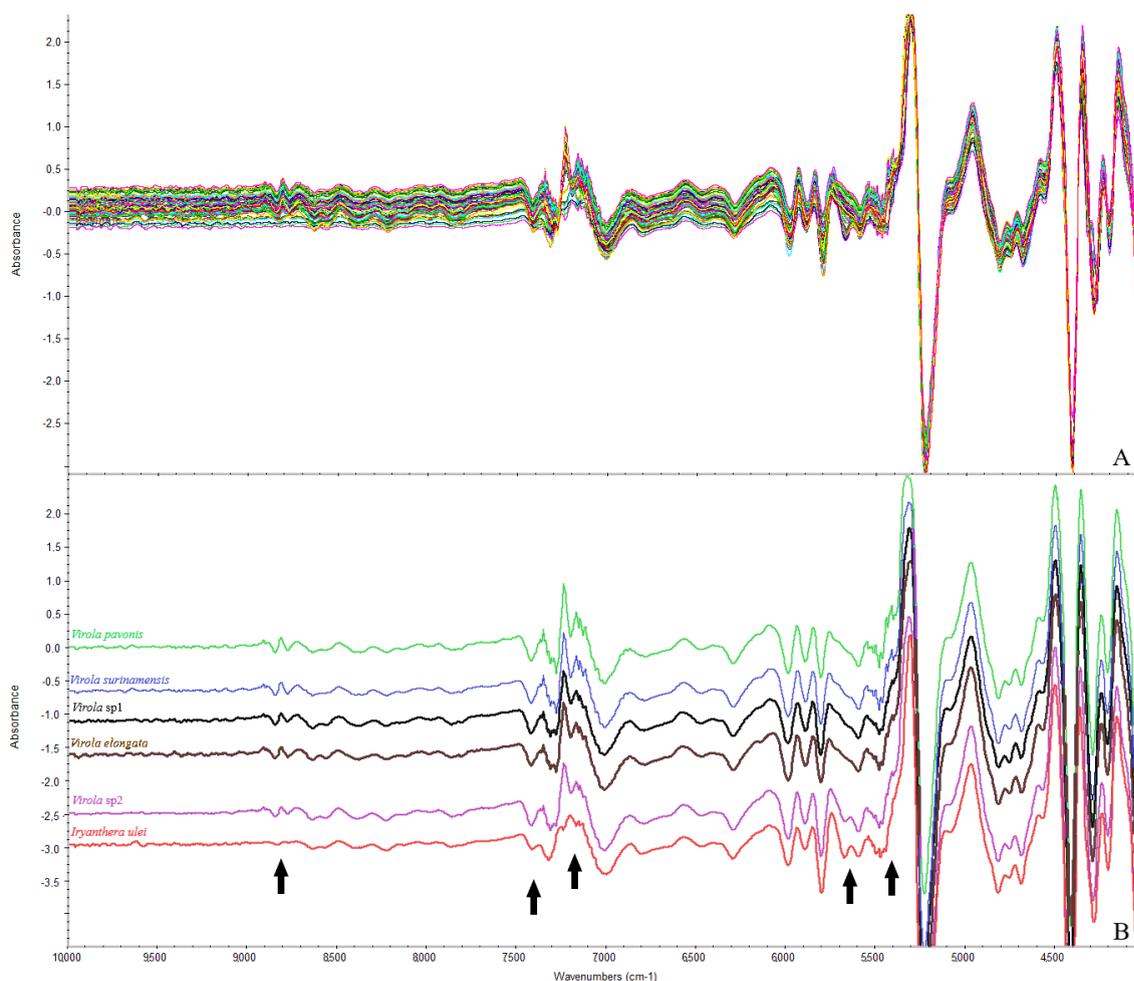


Figura 2. Espectros NIR com tratamento matemático de madeira de árvores caídas: A – conjunto de espectros NIR 2ª derivada e aplicação do filtro Norris; B – Espectros derivados de cada espécie e possíveis bandas características.

Apenas com auxílio de ferramentas quimiométricas (química + estatística) é possível detectar/confirmar possíveis diferenças nos espectros, como pode ser observado na Figura 2 (espectros derivados). Bandas na região de 9.000-8.500, 7.500-7.000 e 5.800-5.300 cm^{-1} evidenciam regiões que podem implicar na assinatura espectral ao nível de gênero e/ou espécie das árvores caídas. Por isso, a escolha da faixa espectral é um passo importante quando pretende-se utilizar os espectros NIR em modelos multivariados (calibração/validação), pois cada região pode responder de forma satisfatória a variável de interesse. A região de 9.881 – 4.119 cm^{-1} foi

selecionada para o estudo, pois acreditamos que essa faixa é representativa para bandas de classificação de madeiras.

Os espectros NIR das amostras (originais e tratados) foram decompostos e uma análise exploratória (componente principal, PCA) foi realizada para avaliar a tendência dos scores em indicar agrupamento. Na PCA gênero, os scores dos espectros originais (Figura 3A) apresentaram mais dispersos quando comparados com a PCA para espécies, mas esse comportamento descreveu 86,41% das variações das informações dos espectros (PC1 e PC2), indicando possível classe em grupo de *Iryanthera* e *Virola*.

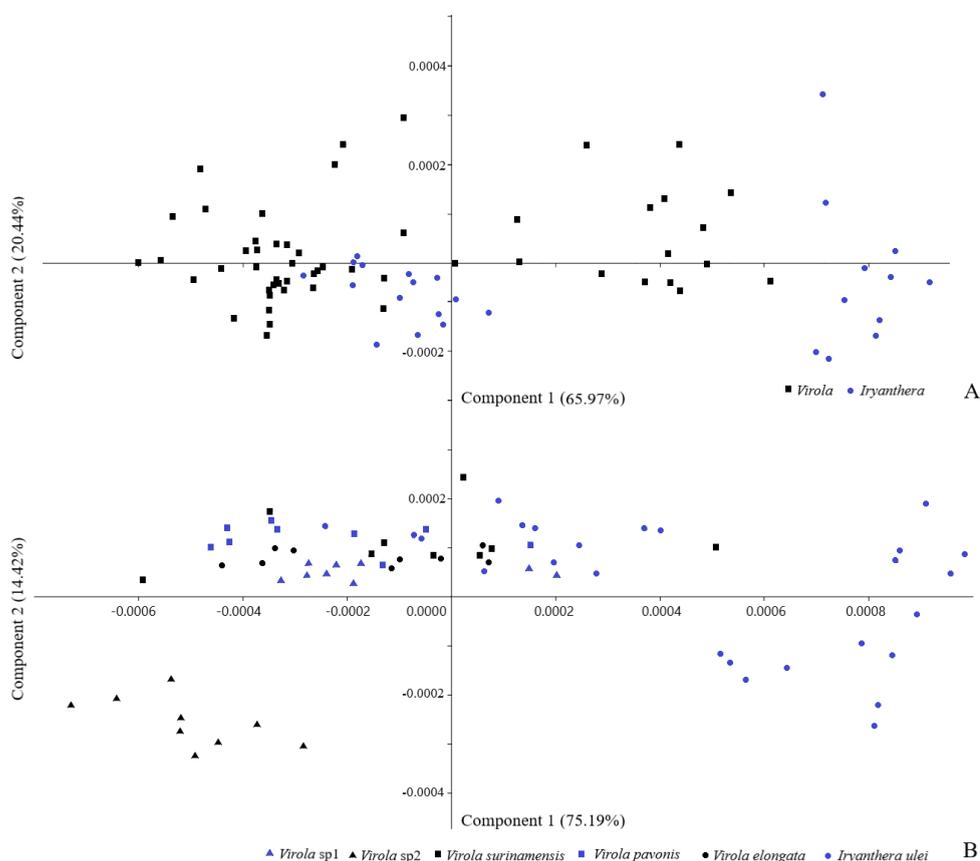


Figura 3. Análise do componente principal de espectros de árvores caídas naturalmente: A – PCA de espectros NIR originais; B – PCA de espectros NIR tratados.

Na PCA espécies realizadas com dados derivados (Figura 3B), os scores apresentam comportamento de distribuição próximo ao eixo central, indicando separação das classes botânicas: 1 – *Iryanthera ulei*; 5 – *Virola* sp. – *V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp1 e *Virola* sp2, onde essa distribuição explicou 75,19 e 14,42% da variabilidade total (89,61%).

Esses resultados indicaram que os dados espectrais originais e tratados apresentam potencial de aplicação em modelos multivariados, portanto foram estabelecidos 14 modelos (espectros com/sem tratamento) para predição de madeira de árvores caídas de Myristicaceae, visando testar a capacidade de classificação dos modelos NIR.

Na análise discriminante linear (LDA) dos dados espectrais NIR das madeiras caídas de Myristicaceae foi aplicado a técnica Holdout (70-30) e apresentou desempenho satisfatório para classificação de madeiras de *Iryanthera* e *Virola* (Tabela 4).

Tabela 4. Modelos multivariado NIR (análise discriminante) desenvolvidos para classificação de árvores caídas de Myristicaceae.

Classificação	Modelo	Tratamento matemático	Filtro	Acertos (%)		Precisão (%)
				Calibração	Validação	
Gênero	1	Sem	-	80	85	89,43
	2		Sem	90	86	
	3	1ª derivada	Savitzky-Golay	95	90	
	4		Norris	92	90	
	5		Sem	79	75	
	6	2ª derivada	Savitzky-Golay	92	100	
	7		Norris	99	100	
Espécie	8	Sem	-	92	87	82,86
	9		Sem	83	83	
	10	1ª derivada	Savitzky-Golay	83	83	
	11		Norris	92	83	
	12		Sem	75	67	
	13	2ª derivada	Savitzky-Golay	81	78	
	14		Norris	100	99	

Os modelos multivariados 1, 5, 9, 10, 12 e 13 apresentaram classificação correta $\geq 75\%$ (amostras calibradas), entanto, que os modelos 1, 2, 5, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 um índice de acerto de $\geq 67\%$ (amostras validadas), mas os modelos mais robusto no estudo foram os tratados com 2ª derivada e aplicação de filtro Norris (7 e 14) com acerto de 99 e 100% tanto ao nível de gênero, como em espécies de Myristicaceae.

O método *leaves-one-out* (LOO) foi aplicado aos resultados das previsões (modelos 7 e 14) que analisou conjunto de amostras novas de madeiras caídas e amostras de coleção de madeira (Xiloteca/INPA/Brasil). A validação LOO apontou uma precisão na identificação de gênero de 93% e para espécie de 66% (Figura 4). Ao nível de espécies (Figura 4B) a validação da espécie *Virola* sp2 teve uma classificação correta de 80%, sendo 20% indicando que as amostras poderiam ser de árvores de *V. elongata*. Para *V. surinamensis* a validação foi baixa, 13% de acerto, onde 40% de erro ou classificação incorreta indicavam como indivíduos de outro gênero (*Iryanthera*).

	<i>Virola</i>	<i>Iryanthera</i>	CC %
<i>Iryanthera</i>	6	129	95
<i>Virola</i>	203	22	90
Precisão = 93%			

A

	Iry	V.elo	V.pav	V.sur	V.sp1	V.sp2	CC %
V.sp2		6				24	80
V.sp1	4				26		87
V.sur	30	10		10	5		13
V.pav			40		35		53
V.elo		75					100
Precisão = 66%							
Iry	45	20	5	5			60

B

Figura 4. Matriz de confusão (LOO) reunindo todas as previsões de madeiras de árvores caídas e madeira de Xiloteca: A – Gêneros *Iryanthera* e *Virola*; B – Espécies *Iryanthera ulei*, *Virola elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1* e *Virola* sp.2*. Somente espectros de madeira de árvores caídas. Valores diagonais são previsões corretas e valores fora da diagonal são previsões incorretas.

Caracterização NIR de traços de árvores caídas

A caracterização por NIR apresentou estimativas precisas e rápidas. Na tabela 5 são apresentados os resultados por meio dos modelos PLS para alguns traços químicos, físicos e mecânicos das madeiras de árvores caídas. Em geral, a concentração de extrativos e polifenóis de *Virola* (média) ficam < 3% e lignina ~30%. Amostra da madeira de *Iryanthera* apresenta valores superiores de densidade básica (0,60 g/cm³) e módulo de elasticidade (12.686 MPa) quando comparados às madeiras

de *Virola*. Enquanto, que para as variáveis físicas umidade e poder calorífico, não foi apontada diferença estatística entre as diferentes espécies.

Tabela 5. Estimativa das propriedades tecnológicas das madeiras de árvores caídas naturalmente por modelos quimiométricos.

Ucuúba	Extrativos ¹	Polifenóis ¹	Lignina ¹	DB ²	Umidade ¹	PCS ³	MOE ⁴
<i>Iryanthera ulei</i>	3,86a	1,89a	28,67bc	0,60a	12,53a	4.706a	12.686a
<i>Virola elongata</i>	3,10ab	2,16a	30,65ab	0,47b	12,28a	4.692a	10.637b
<i>Virola pavonis</i>	2,64b	1,50b	31,66a	0,47b	12,51a	4.747a	8.458c
<i>Virola surinamensis</i>	3,02ab	0,58c	31,35ab	0,50b	12,78a	4.248a	9.013bc
<i>Virola</i> sp.1	1,70c	1,31b	29,89ab	0,51b	12,56a	4.617a	13.192a
<i>Virola</i> sp.2	3,82a	2,19a	27,41c	0,35c	12,29	4.477a	8.863c
Média <i>Virola</i>	2,86	1,55	30,19	0,46	12,48	4.557	10.210
<i>Virola surinamensis</i> *	2,93	1,07	30,50	0,44	11,40	4.609	9.530
<i>Iryanthera</i> sp.*	4,89	1,88	30,11	0,69	12,18	4.756	13.900

*dados da literatura: INPA/CPPF (1991); Mota (2012), e Nascimento e Cruz (2020); 1 = %; 2 = densidade básica (g/cm³); 3 = poder calorífico superior (cal/g); módulo de elasticidade (MPa); médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade

Na Figura 5, são apresentados a PCA dos traços estimados (Figura 5A) e o agrupamento das madeiras de árvores caídas, elaborado a partir do algoritmo *K-means* que utilizou os dados da predição das madeiras, a esses resultados foi aplicada a linha de “Fenelon” que indicou a formação de três grupos (G1: *I. ulei* e *Virola* sp1.; G2: *V. pavonis* e *Virola* sp.2; G3: *V. surinamensis* e *V. elongata*). Possivelmente o G1 foi formado por valores de maior resistência mecânica (MOE) e o G2 pelos menores valores. Enquanto, que o G3 está associado a alta concentração de extrativos e um MOE de ~ 9,500 MPa.

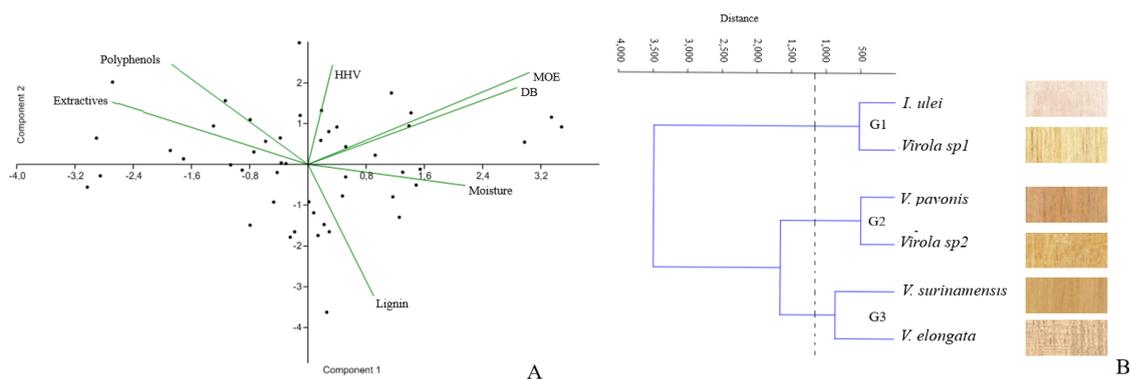


Figura 5. Análise de agrupamento das madeiras estudadas: A – PCA dos traços das madeiras; B – Cluster das madeiras

DISCUSSÃO

Aqui registramos pela primeira vez a aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) para avaliar modelos multivariados que discrimine madeiras de árvores caídas. No campo da ecologia e manejo florestal, essa serapilheira grossa é relegada apenas para fins de estimativa de biomassa, e a identificação taxonômica desse matéria vegetal poderia agregar vários resultados a essas pesquisas, bem como fortalecer estudos no campo da botânica taxonômica, econômica e outras pesquisas florestais como a biomecânica e dendrologia (Prance 1989; Higuchi et al. 2015; Ribeiro et al. 2016; McDowell et al. 2018; Castro-Fonseca et al. 2020).

O reduzido conhecimento taxonômico do tecido xilemático compromete substancialmente estudos rigorosos em todos os campos da biodiversidade ou biogeografia (Smith e Figueiredo 2009; Pyšek e Richardson 2010). Mudanças globais têm influenciado com fortes ventos e derrubadas de árvores em florestas tropicais (Paz et al. 2018; Rader et al. 2020), e o reconhecimento ao nível de gênero e espécie é um grande desafio para os estudos botânicos (Lang et al. 2015; Prata et al. 2018; Pace et al. 2019). Devido à similaridade das madeiras de Myristicaceae, uma diversidade de informações complexas precisa ser treinada para diferenciar o lenho desta família, e nos levantamentos bibliográficos realizados, nenhuma tentativa foi feita para diferenciar madeiras de árvores caídas naturalmente.

No grupo de *Virola* e *Iryanthera*, várias espécies já foram registradas, e esses

exemplares são de difícil identificação tanto da madeira, como do material de herbários que são distintos a partir de conjunto de características morfológicas (Lisboa et al. 1984; Loureiro et al. 1989; Quintanilha e Lobão 2017). Rodrigues (1980) já trazia esse debate quando registrou a confusão morfotipagem lectotipificação entre indivíduos de Ucuúba (*Virola* e *Iryanthera*). A identificação anatômica das madeiras foi validada pela espectroscopia NIR quando esta ferramenta conseguiu distinguir as árvores de ucuúba em dois gêneros (*Virola* e *Iryanthera*) e seis espécies (*I. ulei*, *Virola elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp1 e *Virola* sp2) associada claramente a impressão digital NIR (Figuras 1, 2 e 4), sendo que esses resultados respondem a principal questão do estudo que foi “diferenciar madeiras de árvores caídas de ucuúba”.

Na Figura 1B, os espectros originais se distanciam pela absorvância x comprimento de onda do NIR, onde a classificação correta do modelo 1 (acerto de 80% para calibração e 85% para validação) foi possivelmente explicada pelos picos (bandas) que estão relacionados à similaridade ou dissimilaridade das substâncias químicas (qualitativa e quantitativa) da amostra (Sandak et al. 2010). Espectro de *Iryanthera ulei* (vermelho) está disposto na região mais baixa. Posteriormente na parte mediana ocorre um entrelaçamento dos espectros de *V. elongata*, *V. pavonis* e *Virola* sp2 (marrom, verde e roxo), enquanto na parte superior, segue o espectro de *V. surinamensis* (azul) e no topo *Virola* sp1 (preto).

Quanto a avaliação dos espectros tratados, 2ª derivada com filtro Norris (Figura 2B), bandas na região de 8.900-8.800, 7.400-7.300 e 7.300-7.200 cm^{-1} foram registradas para as árvores de *Virola*, e nessas faixas as ligações químicas podem ser relacionadas a lignina ($\text{C}_{\text{ar}}\text{-H}_{\text{str}}$), celulose (C-H_{str}) e hemicelulose (C-H_{def}), respectivamente. A banda na região de 5.450-5.300 cm^{-1} foi assinalada apenas nos espectros das madeiras de *V. pavonis* (verde) e *V. surinamensis* (azul), e neste comprimento de onda ocorrem ligações de C-O associados a monossacarídeos (hemicelulose). Para *I. ulei* (vermelho), a banda característica observada foi na faixa de 5.700-5.600 cm^{-1} associada às ligações $\text{C}_{\text{ar}}\text{-H}_{\text{str}}$ e C-H_{str} (compostos aromáticos e fenólicos associados à lignina, e extrativos fenólicos como flavonóides e taninos). Todas as atribuições de bandas apresentadas são baseadas em observações de madeiras de coníferas e folhosas, estudadas por Watanabe et al. (2006), Schwanninger et al. (2011), Leblon et al. (2013), Buoso et al. (2016) e Grasel e Ferrão (2016), e essas relações se justificam porque a FT-NIR apresenta potencial de captar

as cargas de absorvância (tratamento matemático) e transformar em informações sobre a composição química da amostra (Workman e Weyer 2012).

Alguns estudos de discriminação botânica de espécies de madeiras tropicais utilizando a espectroscopia NIR, tem encontrado resultados de classificação correta acima de 90% (Soares et al. 2017; Pace et al. 2019; Santos et al. 2021). Estudos de discriminação de espécies madeireiras comerciais com a tecnologia NIR a partir de espectros originais conseguiram reconhecer diferentes indivíduos ao nível de gênero da família Lauraceae (Santos et al. 2021). Semelhante resultado foi observado por Soares et al. (2017), avaliando espécies nativas da Amazônia, indicando a necessidade de aplicação de quimiometria para melhor distinção das madeiras. O tratamento matemático (1ª e 2ª derivada) e aplicação de filtros (Savitzky-Golay/Norris) ajuda a melhorar a resolução espectral suavizando os picos, mantendo sua forma e posição, eliminando efeitos do desvio e variabilidade do instrumento, aumentam a qualidade e a precisão dos resultados (Tang et al. 2018).

Na Tabela 4 os modelos quimiométricos 7 (gênero) e 14 (espécie) apresentaram os melhores desempenho de classificação quando utilizaram 360 espectros na validação LOO e obteve-se 7 e 33% de classificação incorreta, respectivamente. Vale ressaltar que a amostragem dos estudos de Soares et al. (2017), Pace et al. (2019) e Santos et al. (2021) são baseados em espécies depositadas em coleções ou coletas de áreas de exploração florestal de baixo impacto, onde a princípio as madeiras não apresentavam biodegradação. As amostras analisadas no presente estudo, oriundas de coletadas do chão da floresta, apresentavam algum nível de biodegradação, indicando que a assinatura espectral ao nível de espécie pode ter sofrido alterações.

A madeira no chão da floresta sofre vários processos de intemperismo, o biológico ocorre principalmente por fungos de podridão (*Coniphora puteana*, *Gleophyllum trabeum*, *Pleurotus* sp., *Postia placenta* e *Trametes villosa*). Sandak et al. (2013) e Nascimento et al. (2023) utilizaram a espectroscopia NIR para monitorar a deterioração fúngica em madeira, verificaram que a biodegradação lignocelulolítica é afetada principalmente pelas alterações das bandas espectrais relacionadas à lignina e carboidratos. Esses resultados foram similares aos estudos de Vianez et al. (2012) quando aplicou a FT-NIR para avaliar os efeitos do intemperismo natural e artificial em madeiras tropicais amazônicas. Os espectros NIR coletados da madeira original e após exposição intensa de intempéries físicos (umidade, temperatura e radiação UV), indicou alterações profunda em várias bandas ligadas a carboidratos

(celulose e hemicelulose) compostos aromáticos (lignina).

Em geral, o tecido xilemático de árvores caídas apresenta alteração na composição química, Poorter et al. (2010) afirma que em madeiras mortas a quantidade de material de reserva, como carboidratos e certos extrativos apresentam baixos índices. Estas alterações foram observadas nas madeiras estudadas (Tabela 5) e avaliadas quanto a possíveis implicações nos agrupamentos (Figura 3 e 5). Para *Iryanthera ulei* foi observado redução no teor de extrativos, lignina e módulo de elasticidade (MOE), enquanto para *Virola* sp2, ocorreu o inverso, aumento dos metabólitos secundários (extrativos e polifenóis) e umidade, e ainda redução da concentração de lignina, densidade básica e MOE, quando comparados com dados da literatura (INPA/CPPF 1991; Mota 2012; Nascimento e Cruz 2020). A análise de Cluster baseada nos traços das madeiras, indicou a formação do G2 (Figura 5B), indicando similaridade entre *Virola* sp.2 e *V. pavonis*, que numa avaliação dos espectros originais dessas espécies (Figura 1B) indicam similaridade no comprimento de onda entre 4.500-4.000 cm^{-1} .

A robustez dos modelos desenvolvidos para classificação da madeira de árvores caídas (Tabela 4), respondeu ao objetivo do estudo, ressaltando que modelos quimiométricos sempre podem ser melhorados com a inclusão de novas amostras e inserção de novas informação ao conjunto de dados calibrados, e para estudos futuros de classificação de árvores caídas, outras abordagens podem ser incluídas como, por exemplo, o aprofundamento sobre a influência dos diferentes níveis de degradação da madeira na classificação correta. Em especial aos modelos LDA 7 e 14 (Tabela 4), eles foram qualificados em traduziu a grande capacidade que a espectroscopia NIR apresenta para ser utilizada na discriminação das madeiras de árvores caídas de Myristicaceae. Nosso estudo apresentou potencial semelhante a outras pesquisas na discriminação de material vegetal de difícil classificação oriundo da biota amazônica (Lang et al. 2015; Eugenio-da-Silva et al. 2018; Paiva et al. 2021; Nascimento et al. 2023).

CONCLUSÃO

A espectroscopia FT-NIR pode indicar informações importantes na discriminação de madeiras de árvores caídas naturalmente de Myristicaceae. Investigando as

bandas de absorção na região NIR e a aplicação da quimiometria foi possível interpretar os espectros, indicando tendências de similaridade ao nível de gênero e espécie. A LDA (2ª derivada com filtros Norris) conseguiu identificar *Iryanthera ulei* e *Virola* (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 e *Virola* sp.2) que foram classificados erroneamente no campo como sendo uma única espécie (*Virola* sp.) conhecida popularmente como ucuúba. No uso da ferramenta NIR para caracterização das propriedades da madeira, as estimativas foram precisas e rápidas, apesar do tecido xilêmico de árvores caídas apresentar alteração na composição química. Para *Iryanthera ulei* foi observado redução no teor de extrativos, lignina e módulo de elasticidade (MOE), enquanto para *Virola* sp.2, ocorreu o inverso, aumento dos metabólitos secundários (extrativos e polifenóis) e umidade, e ainda redução da concentração de lignina, densidade básica e MOE. A precisão desses resultados favorece a robustez dos modelos, podendo ser utilizado como nova ferramenta na taxonomia integrativa para material vegetal de florestas tropicais de difícil identificação, tendo a vantagem de analisar um número elevado de testes de forma rápida, eficaz e sem a necessidade de destruição das amostras quando comparadas com as técnicas tradicionais.

MATERIAL COMPLEMENTAR

Avaliação geral das árvores caídas no momento do registro em campo, Rio Solimões (Brasil).







SÍNTESE

A espectroscopia no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) demonstrou eficácia na diferenciação de madeiras de árvores caídas, tanto em relação ao gênero quanto às espécies pertencentes às famílias Lecythidaceae e Myristicaceae. A análise das bandas de absorção na região NIR e a aplicação da quimiometria permitiram interpretar os espectros, revelando tendências de similaridade ao nível de gênero e espécie. Análise comparativa das assinaturas espectrais de amostras de árvores caídas e da Xiloteca revelou que, mesmo após exposição às intempéries, a madeira das árvores caídas ainda preservava cerca de 50% das bandas originais, favorecendo assim a discriminação ao nível de gênero.

A aplicação do algoritmo “distância Mahalanobis” indicou discriminação de diferentes gêneros para madeiras de Lecythidaceae, distribuídos em sete espécies (*Couratari* sp., *C. guianensis*, *C. stellata*, *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *Holopyxidium* sp. e *Lecythis usitata*). Este método mostrou-se especialmente valioso, visto que, durante a coleta de campo, a identificação baseava-se exclusivamente em denominações populares, como matá-matá (*Eschweilera* sp.) e tauari (*Couratari* sp.).

A Análise Discriminante Linear aplicados aos dados das madeiras de Myristicaceae, identificou de maneira precisa *Iryanthera ulei* e *Virola* spp. (*V. elongata*, *V. pavonis*, *V. surinamensis*, *Virola* sp.1 e *Virola* sp.2), que foram erroneamente classificados no campo como uma única espécie (*Virola* sp.), conhecida popularmente como ucuúba. Ao utilizar a ferramenta NIR para caracterizar as propriedades da madeira, as estimativas foram precisas e rápidas, mesmo diante das alterações na composição química do tecido xilemático de árvores caídas.

A precisão desses resultados fortalece a robustez dos modelos, possibilitando sua utilização como ferramenta na taxonomia integrativa para materiais vegetais de florestas tropicais de difícil identificação. Além disso, destaca-se a vantagem de analisar um grande número de testes de maneira rápida e eficaz, sem a necessidade de destruir as amostras, quando comparado às técnicas tradicionais.

A aplicação da espectroscopia NIR, em conjunto com modelos multivariados, no tecido xilemático de árvores caídas, emerge como uma ferramenta valiosa para facilitar o reconhecimento botânico, especialmente em cenários nos quais a disponibilidade de material vegetal fértil é escassa. Esta abordagem não apenas se revela útil em estudos

florísticos, mas também desempenha um papel importante na caracterização das propriedades da matéria-prima da madeira, contribuindo assim para otimizar sua utilização, alinhada aos princípios da botânica econômica. Além disso, a integração dessas técnicas pode fornecer *insights* essenciais para a tomada de decisões nos planos de manejo florestais, oferecendo indicações de usos alternativos para esta biomassa que é negligenciada pelo setor florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe H, Murata Y, Kubo S, Watanabe K, Tanake R, Sulaiman O, et al. (2013) Estimation of the ratio of vascular bundles to parenchyma tissue in oil palm trunks using NIR spectroscopy. *BioResources* 8(2): 1573-1581. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1573-1581>
- Aleixo I, Norris D, Hemerik L, Barbosa A, Prata E, Costa F, et al. (2019) Amazonian rainforest tree mortality is driven by climate and functional traits. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0458-0>
- American Society for Testing and Materials – ASTM (2021) *Annual book of ASTM standards (Section 4 – Construction, Volume 04.10 – Wood)*. ASTM, West Conshohocken.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2022) *Projeto estrutura de madeiras - ABNT (NBR 7190)*. ABNT, Rio de Janeiro.
- Barbosa AP, Palmeira RCF, Nascimento CS, Feitoza D, Carneiro da Cunha MPS (2006) Leguminosas florestais da Amazônia Central. I. Prospecção das classes de compostos presentes na casca de espécies arbóreas. *Fitos* 1: 47-57. <https://doi.org/10.32712/2446-4775.2006.36>
- Barker J (2008) Disconnection and reconnection: misconceptions and recommendations pertaining to vouchers in wood science. *International Association of Wood Anatomists Journal* 29: 425-437. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000196>
- Batista JEG, Mori SA (2017) Two New Species of *Eschweilera* (Lecythidaceae) from rainforest on the Caribbean slope of Panama. *Phytotaxa* 296(1): 45-59. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.296.1.2>
- Bernal RA, Coradin V, Camargos J, Costa C, Pissarra J (2011) Wood Anatomy of Lecythidaceae species called “Tauari”. *International Association of Wood Anatomists Journal* 32(1): 97-112. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000046>
- BFG - The Brazil Flora Group (2015) Growing knowledge: an overview of seed plant diversity in Brazil. *Rodriguésia* 66: 1085-1113. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566411>
- BFG -The Brazil Flora Group (2018) Brazilian Flora 2020: Innovation and collaboration to meet Target 1 of the Global Strategy for Plant Conservation (GSPC).

- Rodriguésia* 69: 1513-1527. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201869402>
- Braga JWB, Pastore TCM, Coradin VTR, Camargo JAA, Silva AR (2011) The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla*. *International Association of Wood Anatomists Journal* 32: 285-296. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000058>
- Brito WRO, Dambros CS, Cardoso D, Scudeller VV, Zartman CE (2023) Divergent patterns of intraspecific trait variation among floral and vegetative characters in the hyperdominant dioecious Neotropical tree *Virola sebifera* (Myristicaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 202: 233–248. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boac069>
- Budinova G, Dominak I, Strother T (2008) FT-NIR Analysis of Czech Republic beer: A qualitative and quantitative approach. *Appl Therm Sci* 5172: 1-4.
- Buoso MC, De Poli M, Matthaes P, Silvestrin L, Zafiroopoulos D (2016) Nondestructive wood discrimination: FTIR – Fourier Transform Infrared Spectroscopy in the characterization of different wood species used for artistic objects. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1142/S201019451660212X>
- Cardona-Calle DA, Vieira G, Noda H (2014) Práticas de uso e manejo tradicional de *Carapa* spp. (andiroba) na Reserva Extrativista do Rio Jutai, Amazonas, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Ciência Humana)* 9: 519-540. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-81222014000200014>
- Cardoso D, Särkinen TE, Alexander S, Amorim AMA, Bittrich V, Celis M, et al. (2017) Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. *PNAS* 114: 10695-10700. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706756114>
- Castillo R, Contreras D, Freer J, Ruiz J, Valenzuela S (2008) Supervised pattern recognition techniques for classification of *Eucalyptus* species from leaves NIR spectra. *Journal of the Chilean Chemical Society* 53(4): 1709–1713. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072008000400016>
- Castro-Fonseca N, Jacqueline-Meunier I-M, Borges-Lins-e-Silva AC (2020) Can fallen trees enhance aboveground biomass estimation? A proposal for the Brazilian Atlantic Forest. *Revista de Biología Tropical* 68: 1284-1297. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i4.41299>
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas – COPANT (1973) *COPANT 555, Método de ensayo de flexión estática*. COPANT, Buenos Aires.

- Costa JEE, Nascimento CC, Araújo RD, Pacheco KMM (2021) Evaluation of the quality of wood from naturally fallen tree for the development of products in Design. *International Journal for Innovation Education and Research* 9:172-187. <https://doi.org/10.31686/ijer.vol9.iss1.2887>
- Cruz LL, Nakajima NY, Silva RM, Hosokawa RT, Jardim FCS, Corte APD (2021). Distribuição diamétrica de três espécies de Lecythidaceae após exploração de impacto reduzido na Amazônia Oriental. *Ciência Florestal* 31(1): 171-190. <https://doi.org/10.5902/1980509836011>
- Cysneiros VC, Mendonça Júnior JO, Lanza TR, Moraes JCR, Samor OJM (2018) Espécies madeireiras da Amazônia: riqueza, nomes populares e suas peculiaridades. *Pesquisa Florestal Brasileira* 38: e201801567. <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801567>
- Davrieux F, Rousset P, Pastore T, Macedo L, Quirino W (2010) Discrimination of native wood charcoal by infrared spectroscopy. *Química Nova* 33: 1093-1019. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000500016>
- De Salles F, Santiago T, Biggs TW, et al. (2020) Impacts of protected area deforestation on dry-season regional climate in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research* 125: e2020JD033048. <https://doi.org/10.1029/2020JD033048>
- DeZeeuw C, Mori S (1987) Wood anatomy. In: Rogerson CT, Buck WR (eds.), *The Lecythidaceae of a lowland Neotropical forest: La Fumée Mountain, French Guiana*. Memoir. New York Bot. Gard. 44: 100–112.
- Di Domenico M, Aguiar LM, Garraffoni ARS (2012) Desafios da taxonomia: Uma análise crítica. *Revista Orbis Latina* 2: 76-95. <https://revistas.unila.edu.br/orbis/article/view/477/426> Accessed 26 may 2023
- Diehl G (1935) A study of Lecythidaceae. *Tropical Woods* 43: 1-14.
- Dionísio LFS, Vaz MM, Carvalho JOP (2022) Volume of commercial timber found dead in managed Amazonian natural forests: Is it possible to take advantage? *Forest Ecology and Management* 521: 120441. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120441>
- Donald A, Burns EW (2007) *Handbook of near infrared analysis*. 3rd edn. Boca Raton FL, CRC Press.
- Durgante FM, Higuchi N, Almeida A, Vicentini A (2013) Species spectral signature: discriminating closely related plant species in the Amazon with NIR leaf-

- spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 291: 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.045>
- Eugenio-da-Silva C, Higuchi N, Nascimento CC, Costa SS, Brasil MM (2018) Near infrared (FT-NIR) calibration of seven species of the Moraceae family from the Central and West region of Amazonas – Brazil. *Review of Research* 7: 1-6. <http://oldror.lbp.world/UploadedData/4374.pdf> Acessado em 10 de maio de 2023.
- Faceli K, Lorena AA, Gama J, Almeida TA, Carvalho ACLF (2011) *Inteligência artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro, RJ, LTC.
- Fahey LM, Nieuwoudt MK, Harris PJ (2018) Using near infrared spectroscopy to predict the lignin content and monosaccharide compositions of *Pinus radiata* wood cell walls, *International Journal of Biological Macromolecules* <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.105>
- Fasciotti M, Alberici RM, Cabral EC, Cunha VS, Silva PRM, Daroda RJ, Eberlin MN (2015) Wood Chemotaxonomy via ESI-MS profiles of phytochemical markers: The challenging case of African versus Brazilian Mahogany woods. *Analytical Methods* 8576-8583. <https://doi.org/10.1039/C5AY01725D>
- Ferreira GC, Gomes JI, Hopkins MJG (2004) Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como "angelim". *Acta Amazonica* 34(3): 45-68.
- Fernandes A (1998) *Fitogeografia brasileira*. Fortaleza, CE, Multigraf.
- Fernandes C, Gaspar MJ, Pires J, Alves A, Simões R, Rodrigues JC, et al. (2017) Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal. *iForest* 10: 669-679. <https://doi.org/10.3832/ifer2254-010>
- Fidalgo O, Bononi VLR (1984) *Técnicas de coleta, preservação e herborização de material botânico*. São Paulo, SP, Instituto de Botânica.
- Freitas FC, Azevedo CP, Souza CR (2019) Estoque de necromassa em floresta não manejada e floresta manejada na Amazônia Central. *Scientia Forestalis* 47: 13-23. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n121.02>
- Freitas JA, Vasconcellos FJ (2019) *Identificação de madeiras comerciais da Amazônia*. INPA, Manaus
- Gonçalves FG, Santos JR (2008) Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. *Acta Amazonica*, 38: 229-244.

- Grasel FS, Ferrão MF (2016) A rapid and non-invasive method for the classification of natural tannin extracts by near infrared spectroscopy and PLS-DA. *Analytical Methods* 8: 644–649. <https://doi.org/10.1039/C5AY02526E>
- Hadlich H L, Durgante, FM, Santos J, Higuchi N, Chambers JQ, Vicentini A (2018). Recognizing Amazonian tree species in the field using bark tissues spectra. *Forest Ecology and Management* 427: 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.002>
- Hair Jr. JF, Black WC, Babin BJ et al (2009) *Análise multivariada de dados*. Bookman, Porto Alegre.
- Hammer O, Harper DA, Ryan PDA (2001) PAST: Paleontological static's software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4: 1-9. <http://palaeo-electronica.org/20011/past/issue101.htm> Acessado em 5 de maio de 2023.
- Harmon ME, Franklin JF, Swanson FJ, Sollins P, Gregory SV, Lattin JD, et al (1986) Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15: 133–302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(03\)34002-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(03)34002-4)
- Hein PRG, Pakkanen H, Santos AA (2017) Challenges in the use of near infrared spectroscopy for improving wood quality: A review. *Forest System* 26: eR03. <https://doi.org/10.5424/fs/2017263-11892>
- Higuchi FG, Nakajima NY, Machado SA, Santos J, Lima AJN, Higuchi N (2015) The use of natural fallen trees in mature tropical Amazonian forest for volumetric regression analysis and volume equations adjustment. *Australian Journal Basic and Applied Sciences* 9(3): 342-348.
- Hopkins MJG, SA Mori (1999) Lecythidaceae. In: Ribeiro JELS, et al. (eds.). *Flora da Reserva Ducke. Guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central*. Manaus, AM, INPA, pp 273-287.
- Hopkins MJG (2019) Are we close to knowing the plant diversity of the Amazon? *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 91: e20190396, <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920190396>.
- Horikawa Y, Tazuru SM, Sugiyama J (2015) Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar japanese diploxylons. *Journal of Wood Science* 61: 251–261. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1462-2>
- Hwang SW, Horikawa Y, Lee W-H, Sugiyama J (2016) Identification of *Pinus* species

- related to historic architecture in Korea using NIR chemometric approaches. *Journal of Wood Science* 62: 156-167. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1540-0>
- Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA/CPPF (1991) *Catálogo de madeiras amazônicas*. INPA, Manaus.
- Jouquet P, Capowiez Y, Bottinelli N, Traoré S (2014) Potential of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for identifying termite species. *European Journal of Soil Biology* 60: 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.11.004>
- Karlinasari L, Noviyanti N, Purwanto YA, Majiidu M, Dwiyantri FG, Rafi M, et al. (2021) Discrimination and determination of extractive content of ebony (*Diospyros celebica* Bakh.) from Celebes Island by near-infrared spectroscopy. *Forests* 12(6). <https://doi.org/10.3390/f12010006>
- Kelley SS, Rials TG, Snell R, Groom LH, Sluiter A (2004) Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology* 38: 257-276. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5>
- Laboratório de Produtos Florestais - LPF/SFB (2023). *Brazilian wood database*. <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/bd-madeiras-brasileiras>. Acessado em 15 Abril de 2023.
- Lang C, Almeida DRA, Costa FRC (2017) Discrimination of taxonomic identity at species, genus and family levels using Fourier-transformed near-infrared spectroscopy (FT-NIR). *Forest Ecology and Management* 406: 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.003>
- Lang C, Costa FRC, Camargo JLC, Durgante FM, Vicentini A (2015) Near infrared spectroscopy facilitates rapid identification of both young and mature Amazonian tree species. *Plos One* 10: e0134521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134521>
- Leblon B, Adedipe O, Hans G, Haddadi A, Tsuchikawa S, Burger J, et al (2013). A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. *The Forestry Chronicle* 89: 595-606. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-111>
- Lengowski EC, Muniz GIB, Klock U, Nisgoski S (2018) Potential use of NIR and visible spectroscopy to analyze chemical properties of thermally treated wood. *Maderas, Ciencia y Tecnologia* 20(4). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718->

[221X201800504100](#)

- Lisboa PLB, Loureiro AA, Silva JCA (1984) Identificação macroscópica do lenho das Myristicaceae da Amazônia Brasileira. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. 1(1/2): 37-65.
- Loureiro AA, Freitas MC, Vasconcellos FJ (1989) Estudo anatômico de 24 espécies do gênero *Virola* (Myristicaceae) da Amazônia. *Acta Amazonica* 19: 415-465. <https://doi.org/10.1590/1809-43921989191465>
- Ma Y, He H, Wu J, Wang C, Chao K, Huang Q (2018) Assessment of polysaccharides from mycelia of genus *Ganoderma* by mid-infrared and near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports* 8: 422-427. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18422-7>
- Maia MAM, Marmos JL (2010) *Geodiversidade do estado do Amazonas*. Manaus, AM, CPRM.
- Mancini M, Leoni E, Nocetti M, Urbinati C, Duca D, Brunetti M, et al. (2019) Near infrared spectroscopy for assessing mechanical properties of *Castanea sativa* wood samples. *Journal of Agricultural Engineering* 50(4): 191–197. <https://doi:10.4081/jae.2019.953>
- Martins-da-Silva RCV, Silva ASL, Fernandes MM, Margalho LF (2014) *Noções morfológicas e taxonômicas para identificação botânica*. Embrapa, Brasília.
- McDowell N, Allen AC, Anderson-Teixeira K, Brando P, Brienen R, Chambers J, et al. (2018) Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist* 219(3): 851-869. <https://doi.org/10.1111/nph.15027>
- Metcalf C, Chalk L (1950) *Anatomy of the dicotyledons*. Oxford, Clarendon Press.
- Minitab LLC (2022) *Minitab version 21.3*. <https://www.minitab.com>. Acessado 15 de Abril de 2023.
- Mori SA, Smith NP, Huang YY, Prance G, Kelly TLM, Matos CC (2015) Toward a phylogenetic-based generic classification of neotropical Lecythidaceae-II. Status of *Allantoma*, *Cariniana*, *Couratari*, *Couroupita*, *Grias* and *Gustavia*. *Phytotaxa* 203: 122–137. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.203.2.2>
- Morozova M, Elizarova T, Pleteneva T (2013) Discriminant analysis and Mahalanobis distance in the assessment of drug's batch-to-batch dispersion and quality threshold establishment. *European Scientific Journal* 9: 8-25.
- Mota AR (2012) *Análise das propriedades físicas e químicas de quatro espécies florestais*. Monografia, Universidade Federal do Amazonas.

- Musse M, Van As H (2018) NMR imaging of agar spaces and metabolites in fruits and vegetable. In: Webb GA (de) *Modern Magnetic Resonance*. Springer, pp 1765-1779. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28388-3_130
- Nascimento CS, Araújo RD, Silva CE, Nascimento CC, Menezes VS, Higuchi N (2022) Near infrared spectroscopy as a tool to discriminate tannin from Amazonian species. *Ciência e Agro tecnologia* 46: e001422. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246001422>
- Nascimento CS, Cruz IA (2020) *NIR models for predicting chemical and physical properties of Amazonian woods - LQM/INPA (version 1.0-14)*. <http://portal.inpa.gov.br/cotei/lqm>
- Nascimento CS, Nascimento CC, Araújo RD, Soares JCR, Higuchi N (2021) Characterization of technological properties of matá-matá wood (*Eschweilera coriacea* [DC.] S.A. Mori, *E. odora* Poepp. [Miers] and *E. truncata* A.C. Sm.) by near-infrared spectroscopy. *iForest* 14: 400-407. <https://doi.org/10.3832/ifor3748-014>
- Nascimento CS, Nascimento CC, Brasil MM (2019a) *NIR models for predicting physico-mechanical properties of Amazonian wood - LEAM/INPA (version 1.0-18)*. <http://portal.inpa.gov.br/cotei/leam>
- Nascimento CS, Nascimento CC, Cruz IA, Araújo RD (2019b) Perfil químico dos extrativos de espécies arbóreas da família Lecythidaceae. In: *Anais da Semana Florestal UFAM 2019*. Manaus. Semana Florestal UFAM 2019. Manaus, Brasil, pp 1-4.
- Nascimento CS, Sales-Campos C, Nascimento CC, Araújo RD, Cruz IA, Abreu RLS (2023) Use of NIR spectroscopy to monitor substrate biodegradation lignocellulosics by *Pleurotus*. *Comunicatta Scientia* 14: 1-6. <https://doi.org/10.14295/cs.v14.3305>
- Nguyen VD, Sarić R, Burge T, Berkowitz O, Trtiek M, Whelan J, et al. (2022) Noninvasive imaging technologies in plant phenotyping. *Trends in Plant Science* 27: 316-317. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.06.009>
- Nisgoski S, Batista FRR, Naide TL, Laube NCC, ACR, Muñoz, GIB (2018) Discrimination of wood and charcoal from six caatinga species by near-infrared spectroscopy. *Maderas, Ciencia y Tecnologia* 20(2): 199-210. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002401>
- Pace JHC, Latorraca JVF, Hein PRG, Castro JP, Carvalho AM, Silva CES (2019)

- Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectroscopy. *Forest System* 28: e015. <https://doi.org/10.5424/fs/2019283-14558>
- Paiva DNA, Perdiz RD, Almeida TE (2021) Using near-infrared spectroscopy to discriminate closely related species: a case study of neotropical ferns. *Journal of Plant Research* 134: 509–520. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01265-9>
- Park S-Y, Kim J-H, Yang S-Y, Yeo H, Choi I-G (2021) Classification of softwoods using wood extract information and near infrared spectroscopy. *BioResources* 16: 5301-5312. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5301-5312>
- Pasquini C (2018) Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives - a review. *Analytica Chimica Acta* 1026: 8-36. <https://doi.org/10.016/j.aca.2018.04.004>
- Paz H, Vega-Ramos F, Arreola-Villa F (2018) Understanding hurricane resistance and resilience in tropical dry forest trees: A functional traits approach. *Forest Ecology and Management* 426: 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.052>
- Poorter L, McDonald I, Alarcón A, Fichtler E, Licona J-C, Peña-Claros M, et al. (2010) The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist* 185(2): 481-92. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- Prades C, Gómez-Sánchez J, García-Olmo J, González-Adrados JR (2012) Discriminant analysis of geographical origin of cork planks and stoppers by NIR spectroscopy. *Journal of Wood Chemical and Technology* 32: 66-85. <https://doi.org/10.1080/02773813.2011.599697>
- Prance GT (1989) Botânica econômica, uma ciência importante para a região Amazônica. *Acta Botanica Brasileira* 2(1): 279-286. <https://doi.org/10.1590/S0102-33061988000300022>
- Prance GT, Mori SA (1979) Lecythidaceae. *Flora Neotropica* 21: 1-27.
- Prata EM, Sass C, Rodrigues DP, Domingos FMCB, Specht CD, Damasco G, et al. (2018) Towards integrative taxonomy in Neotropical botany: disentangling the *Pagamea guianensis* species complex (Rubiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 188(2): 213–231. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boy051>
- Procópio LC, Gayot M, Sist P, Ferraz ID (2010) As espécies de tauari (Lecythidaceae) em florestas de terra firme da Amazônia: Padrões de distribuição geográfica, abundâncias e implicações para a conservação. *Acta Botanica Brasileira* 24: 883-897. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000400002>

- Procópio LC, Secco RS (2008) The importance of botanical identification in forest inventories: the example of "tauari" - *Couratari* spp. and *Cariniana* spp., Lecythidaceae - in two timber areas of the State of Pará. *Acta Amazonica* 38(1): 31-44. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000100005>
- Pyšek, P, Richardson DM (2010) Invasive species, environmental change and management, and health. *Annual Review of Environment and Resources* 35: 25-55. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-033009-095548>
- Quintanilha LG, Lobão AQ (2017) Flora do Rio de Janeiro: Myristicaceae. *Rodriguésia* 68: 85-89. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201768115>
- Rader AM, Cottrell A, Kudla A (2020) Tree functional traits as predictors of microburst-associated tree falls in tropical wet forests. *Biotropica* 52: 410-414. <https://doi.org/10.1111/btp.12761>
- Ramalho FMG, Andrade JM, Hein PRG (2018). Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *Forest System* 27(2): e008. <https://doi.org/10.5424/fs/2018272-12075>
- Ramos AS, Nascimento CC, Nascimento CS, Araújo RD (2021) Influence of structural elements on the biomechanics of naturally fallen trees in Amazonian forests. In: *Anais do X CONIC*, INPA, Manaus, pp 156-160.
- Resex Rio Jutaí (2011) *Plano de manejo da reserva extrativista do rio Jutaí*. Tefé, AM, ICMBio – MMA.
- Ribeiro GHM, Chambers JQ, Peterson CJ, Trumbore SE, Marra DM, Wirth C, et al. (2016) Mechanical vulnerability and resistance to snapping and uprooting for Central Amazon tree species. *Forest Ecology and Management* 380: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.039>
- Ricci A, Parpinello GP, Olejar KJ, Kilmartin PA, Versaria A (2015) ATR-MID spectroscopy and chemometrics for the identification and classification of tannins. *Applied Spectroscopy* 69: 1243-1250. <https://doi.org/10.1366/15-07957>
- Rodrigues WA (1980) Revisão taxonômica das espécies de *Virola* Aublet (Myristicaceae) do Brasil. *Acta Amazonica* 10(1): 1-127. <https://doi.org/10.1590/1809-43921980101s003>
- Saldanha LS, Pinto MN, Almeida R, Santos VS, Lima RA, et al. (2018) Morphological characterization of bryophytes in the municipality of Benjamin Constant-AM. *Biota Amazônia* 8: 48-52. <http://periodicos.unifap.br/index.php/biota> Acessado em 20 de Maio de 2023.

- Sandak A, Ferrari S, Sandak J, Allegretti O, Terziev N, Riggio M (2013) Monitoring of wood decay by near infrared spectroscopy. *Advanced Materials Research* 778: 802–809. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.778.802>
- Sandak A, Sandak J, Waliszewska B, Zborowska M, Mleczek M (2017) Selection of optimal conversion path for willow biomass assisted by near infrared spectroscopy. *iForest* 10: 506-514. <https://doi.org/10.3832/ifor1987-010>
- Sandak A, Sandak J, Zborowska M, Prądzyński W (2010) Near infrared spectroscopy as a tool for archaeological wood characterization. *Journal of Archaeological Science* 37(9): 2093-2101. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.02.005>
- Santos JX, Vieira HC, Souza DV, Menezes MC, Muñiz GIB, 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. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01685-3>
- Schulman L, Toivonen T, Ruokolainen K (2007) Analyzing botanical collecting effort in Amazonia and correcting for it in species range estimation. *Journal of Biogeography* 34: 1388-1399. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01716.x>
- Schwanninger M, Rodrigues JC, Fackler K (2011) A review of band assignments in near-infrared spectra of wood and wood components. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19: 287–308. <https://doi.org/10.1255/jnirs.955>
- Severo RBO (2010) *Identificação de planta medicinal baseada em espectroscopia e lógica Fuzzy*. Tese de doutorado, Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.
- Simões CMO, Schenkel EPG, Mello JCP, Mentz LA, Petrovick PR (2017) *Farmacognosia: do produto natural ao medicamento*. Porto Alegre, RS, Artmed.
- Smith GF, Figueiredo E (2009) Capacity building in taxonomy and systematics. *Taxon* 58: 697-699. <https://doi.org/10.1002/tax.583001>
- Smith NP, Mori SA, Prance GT (2015) Lecythidaceae. In: *Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro*. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB145>. Acessado em 10 de Setembro de 2023
- Smith NP, Mori AS, Law W, Ribeiro M (2016) Conservation assessment of Lecythidaceae from eastern Brazil. *Kew Bull* 71(14): 150-165. <https://doi.org/10.1007/s12225-016-9627-8>

- Soares LF, Da Silva DC, Bergoa MCJ (2017) Evaluation of a NIR handheld device and PLS-DA for discrimination of six similar Amazonian wood species. *Química Nova* 40(4): 418-426. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170014>
- Souza M, Kuhnen S, Kazama DCS, Kurtz C, Trapp T, Müller Júnior V, et al. (2017) Predição dos teores de compostos fenólicos e flavonóides na parte aérea das espécies *Secale cereale* L., *Avena strigosa* L. e *Raphanus sativus* L. por meio de espectroscopia NIR. *Química Nova* 40: 1074-1081. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170120>
- Souza LAG (2012) Biodiversidade e importância madeireira das Fabaceae da Amazônia brasileira. In: Vianez BF, et al. (Orgs.). *Potencial tecnológico de madeiras e resíduos florestais da Amazônia Central*. Manaus: INPA, p.11-30.
- Souza MAR, Moutinho VHP, Silva SS (2007) Levantamento das espécies comercializadas vernaculamente como cumaru no Estado do Pará. *Revista Brasileira de Biociências*, 5: 81-83.
- Stokland JN, Siitonen J, Jonsson BG (2012) *Biodiversity in dead wood*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tang GQ, Cao QX, Wang D, Ji S (2018) Application of near-infrared spectroscopy in determination of schaftoside acid in *Desmodium styracifolium* (Osb.) Merr. *Spectral Analysis Review* 6: 33-42. <https://doi.org/10.4236/sar.2018.62003>
- ter Steege H, Pitman NCA, Sabatier D, Baraloto C, Salomão RP, Guevara JE, et al. (2013) Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science* 342: 325–334. <https://doi.org/10.1126/science.1243092>
- ter Steege H, Prado PI, Lima RAF, et al. (2020) Biased-corrected richness estimates for the Amazonian tree flora. *Scientific Reports* 10: 10130 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66686-3>
- ter Steege H, Vaessen R, Cárdenas-López D, et al (2016) The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports* 6: 29549. <https://doi.org/10.1038/srep29549>
- Teye E, Huang X, Dai H, Chen Q (2013) Rapid differentiation of *Ghana cocoa* beans by FT-NIR spectroscopy coupled with multivariate. *Spectrochimica Acta Part A: Espectroscopia Molecular e Biomolecular* 114: 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.05.063>
- Tong L, Zhang W (2016) Using Fourier transform near-infrared spectroscopy to predict the mechanical properties of thermally modified southern pine wood. *Applied*

- Spectroscopy* 70(10): 1676-1684. <https://doi.org/10.1177/0003702816644453>
- Torralvo K, Magnusson WE, Durgante FM (2020) Effectiveness of Fourier transform near-infrared spectroscopy spectra for species identification of anurans fixed in formaldehyde and conserved in alcohol: A new tool for integrative taxonomy. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 59: 1-14. <https://doi.org/10.1111/jzs.12442>
- Tsuchikawa S, Kobori H (2015) A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science* 61: 213-220. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>
- Varga D, Tolvaj L, Tsuchikawa S, Bejo L, Preklet E (2017) Temperature dependence of wood photodegradation monitored by infrared spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 348: 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.08.040>
- Vázquez C, Boeykens s, Bonadeo H (2002) Total reflection X-ray fluorescence Polymer spectra: classification by taxonomy statistic tools. *Talanta* 57: 1113-1117. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00152-2](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00152-2)
- Vianez BF, Campos-Sales C, Varejão MJC, Nascimento CS, Abreu RLS, Barbosa JS, et al. (2012) Effects of ultraviolet radiation on the main chemical components of three Amazon wood species. In: Caldeiras F (ed.). *Abstracts Book - 5th International Conference & Exhibition on Environmentally-Compatible Forest Products*. Porto, Universidade Fernando Pessoa, pp 48-58.
- Vicentini A, Rodrigues WA (1999) Myristicaceae. In: Ribeiro JELS et al. (eds.). *Flora da Reserva Ducke. Guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central*. INPA, Manaus, pp 136-145.
- Wang D, Wang Q, Wang H, Zhu H (2016) Experimental study on damage detection in timber specimens based on an electromechanical impedance technique and RMSD-based Mahalanobis distance. *Sensors* 16: 1765. <https://doi.org/10.3390/s16101765>
- Watanabe A, Morita S, Kokot S, Matsubara M, Fukai K, Ozaki Y (2006) Drying process of microcrystalline cellulose studied by attenuated total reflection IR spectroscopy with two-dimensional correlation spectroscopy and principal component analysis. *Journal of Molecular Structure* 799: 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2006.03.018>
- Wheeler EA, Baas P (1998) Wood identification – a review. *International Association*

- of Wood Anatomists Journal*. 19: 241-264. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001528>
- Workman JJ, Weyer L (2007). *Practical guide to interpretive near infrared spectroscopy*. Boca Raton, FL, CRC Press.
- Xie J, Qi J, Huang X, Zhou Ni, Hu Y (2015) Comparative analysis of modern and ancient buried *Phoebe zhennan* wood: surface color, chemical components, infrared spectroscopy, and essential oil composition. *Journal of Forestry Research* 26: 501–507. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0034-z>
- Yang Z, Liu Y, Pang X, Li K (2015) Preliminary investigation into the identification of wood species from different locations by near infrared spectroscopy. *BioResources* 10: 8505-8517. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8505-8517>
- Yeon S, Park S-Y, Kim J-H, Kim J-C, Yang S-Y, Yeo H, et al. (2019) Effect of organic solvent extractives on Korean softwoods classification using near-infrared spectroscopy. *Journal Korean of Wood Science and Technology* 47: 509–518. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2019.47.4.509>
- Zhao Y, Zhang J, Jin H, Zhang J, Shen T, Wang Y (2015) Discrimination of *Gentiana rigescens* from different origins by Fourier transform infrared spectroscopy combined with chemometric methods. *Journal of AOAC International* 98: 22–26. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.13-395>