UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

Prospecção de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* L. por meio de análises não destrutivas

Bianca Cerqueira Martins

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

PROSPECÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE OLEORRESINA DE *Copaifera* L. POR MEIO DE ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS

BIANCA CERQUEIRA MARTINS

Sob a Orientação do Professor
Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca

Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ
Dezembro de 2021

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379p

Martins, Bianca Cerqueira,
Prospecção de reservatórios de oleorresina de Copaifera L. por meio de análises não destrutivas / Bianca Cerqueira Martins. - Seropédica, 2021.
182 f.: il.

Orientador: João Vicente de Figueiredo Latorraca.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, 2021.

1. Biotecnologia. 2. Deep learning. 3. Tecnologia de produtos florestais. 4. Tomografia de impulso.. 5. Copaifera. I. Latorraca, João Vicente de Figueiredo , 1962-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

BIANCA CERQUEIRA MARTINS

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM 03/12/2021

_____
João Vicente de Figueiredo Latorraca (Dr.) UFRRJ
(Orientador)

_____
Carlos Roberto Sanquetta (Dr.) UFPR

_____
Demóstenes Ferreira da Silva Filho (Dr.) Esalq/USP

_____
Graziela Baptista Vidaurre (Dra.) UFES

_____
Mario Tommasiello Filho (Dr.) Esalq/USP

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

BIANCA CERQUEIRA MARTINS

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM 03/12/2021

(Assinado digitalmente em 13/12/2021 21:52)
JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.00.30)
Matrícula: 1216943

(Assinado digitalmente em 13/12/2021 22:01)
MARIO TOMMASIELLO FILHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 716.082.908-59

(Assinado digitalmente em 13/12/2021 23:10)
DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 150.761.448-90

(Assinado digitalmente em 14/12/2021 07:52)
GRAZIELA BAPTISTA VIDAURRE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 078.905.237-77

(Assinado digitalmente em 14/12/2021 06:08)
CARLOS ROBERTO SANQUETTA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 565.053.539-68

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **338**, ano: **2021**, tipo: **ATA DE DEFESA DE TESE**, data de emissão: **13/12/2021** e o código de verificação: **ba19ceb0f6**

Dedico
Aos meus avós:
Olivia Maria da Silva e José Teixeira Martins
Flauzina Izolina de Melo e José Cerqueira de Melo

Aos meus pais:
Maria Bernadete Cerqueira Martins e Alverino Silva Martins

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho de pesquisa é a realização de um sonho que nasceu no ano de 2014, e só se tornou realidade devido à confiança, o encorajamento e o apoio de várias pessoas que foram fundamentais ao longo deste processo. A eles faço meu sincero agradecimento.

Aos meus ex-alunos e orientados de Pibic e monografia, Alex Moraes dos Santos e Antonio Uelisson Lima do Nascimento, que aceitaram o desafio e muito me ajudaram no amadurecimento da ideia de realizar pesquisas voltadas para a busca de alternativas tecnológicas para a prospecção de oleorresina de árvores de *Copaifera*.

À professora Raquel Gonçalves (Feagri/Unicampi), primeira a me apoiar e incentivar a seguir com o propósito desta pesquisa.

Ao meu orientador, prof. João Vicente de Figueiredo Latorraca, pela confiança, pela oportunidade e acolhimento no Laboratório de Qualidade da Madeira.

Aos colegas de laboratório e parceiros da vida acadêmica, Glaycianne Christine V. dos Santos, José Henrique Pace, Carlos Eduardo da Silveira, Thayanne dos Santos, Jonnys P. Castro, Poliane P. de Souza, Fábio Henrique do Carmo, Wayka Preston, Norma Maciel, Lilian G. Mariano, Luciana L. Sodré e Augusto C. G, Nagy, sempre presentes e fortalecendo nesta jornada.

Aos escaladores Adriano da Silva Lima, Adenor da Silva Lima e Almir da Silva Lima, por terem sido meus "anjos da guarda" no campo e pelo feito incrível de realizar a tomografia acústica na floresta amazônica acreana, a 30 metros do solo.

Aos colaboradores, Prof. Bruno A. F. de Mendonça, pela disponibilidade e ensinamentos relacionados à análise de imagem; Giampiero Bini (Tecnal) e ao prof. Lourenço P. Perlin (UFSC), por todas as conversas e trocas de informações que permitiram ampliar minha compreensão à cerca da tomografia acústica; Às parceiras e incentivadoras, Francesca Salla e Glória da Silva A. Leal; Diogo Mendes e Daniel B. Binotti, pelo apoio e pelos esclarecimentos fundamentais relacionados às Redes Neurais Artificiais; e Marcos Fattibene, importantíssimo apoio para dirimir dúvidas relacionadas à estatística multivariada.

Ao setor de transportes da Universidade Federal do Acre (UFAC), pela disponibilização da logística para a realização das atividades de campo, no PAE São Luis do Remanso/AC. À Coordenação (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da bolsa Pró-Doutoral, que garantiu o custeio de todo o material e mão de obra imprescindíveis para a realização desta pesquisa.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

RESUMO GERAL

MARTINS, Bianca Cerqueira. **Prospecção de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* L. por meio de análises não destrutivas.** 2021. 182p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

O oleorresina de copaíba (*Copaifera* L.) é uma matéria-prima potencial para diversos segmentos da indústria, devido às suas múltiplas propriedades. Porém, a identificação da localização dos reservatórios desta substância nos troncos das árvores é um obstáculo à previsibilidade de seu abastecimento continuado, afetando a comercialização sustentável do produto. Em um ambiente de elevada heterogeneidade entre os indivíduos arbóreos, torna-se um desafio constante na busca de métodos não invasivos para a prospecção do oleorresina. Neste trabalho, por meio de revisão bibliográfica e experimentação, buscou-se: i) revisar aspectos gerais à respeito do gênero *Copaifera* L. e de pesquisas que reforçam o seu potencial, da demanda por tecnologias para produtos florestais não madeireiros, das principais tecnologias disponíveis, além dos principais aspectos entendidos como desafios para este empreendimento; ii) analisar o potencial da tomografia de impulso (TI) para a prospecção de reservatórios de oleorresina no tronco de árvores de *Copaifera* sp.; iii) verificar a relação entre variáveis dendrométricas, meteorológicas e fenológica (presença/ausência de folhas) com a velocidade de propagação de ondas mecânicas (VPOM) e com as VPOM médias (VmPOM); iv) avaliar diferentes configurações de Redes neurais artificiais (RNA) e indicar o modelo mais apropriado para a predição do volume oleorresina de *Copaifera* sp., com base em variáveis dendrométricas, acústicas e sazonais. As tomografias foram realizadas em seções transversais, em 35 árvores, na altura do diâmetro à altura do peito (DAP ou 0%) e, entre essas, em 18 nas alturas a 25%, 50%, 75% e 100% (1ª bifurcação), sendo obtidas as variáveis: VmPOM, VPOM mínima, VPOM máxima, altura de prospecção em porcentagem (Hp%), altura total da árvore, diâmetro em Hp% e porcentagem de área da seção afetada por velocidades baixas. Investigou-se a interferência de diferentes períodos sazonais nos resultados tomográficos, por meio de variáveis acústicas, dendrométricas, meteorológicas (temperatura mínima e máxima, umidade relativa do ar), além da condição da fenologia foliar, em dois grupos de árvores: a) grupo A = 14 árvores – período sazonal transição para chuvoso (2018); b) grupo B = 14 árvores – período sazonal seco (2019). Além disso, foram testadas diferentes configurações de redes neurais artificiais (RNA), visando a predição do volume de oleorresina, nas quais empregou-se a arquitetura geral de aprendizado supervisionado *Multilayer Perceptron* (MLP). Para todas as análises, utilizou-se tetes estatísticos descritivos, experimentais e estatística multivariada. É possível prospectar reservatórios com uma quantidade significativa de oleorresina utilizando-se TI, mas, principalmente, indicar a exclusão de árvores, necessariamente, sem reservatório ou outras descontinuidades. A TI é sensível para captar mudanças no tronco das árvores, em função de períodos sazonais. A indicação de uma RNA de alta precisão (correlação treinamento = 0.994 e validação = 0.996) aproxima o manejo de oleorresina de outras tecnologias interessantes para seu planejamento e gestão, como aplicativos para melhorar a interface RNA-usuário, de modo a otimizar a etapa de inventário e, principalmente, a análise do custo-benefício associado à uma área de manejo.

Palavras-chave: Biotecnologia, *Deep learning*, Tecnologia de produtos florestais, Tomografia de impulso.

GENERAL ABSTRACT

MARTINS, Bianca Cerqueira. **Prospection of oleoresin reservoirs from *Copaifera* L. by non-destructive analysis.** 2021. 182p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forest Sciences) – Forest Institute, Department of Forest Products, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Copaíba oleoresin (*Copaifera* L.) is a potential raw material for several industry segments, due to its multiple properties. However, identifying the location of the reservoirs of this substance in tree trunks is an obstacle to the predictability of its continued supply, affecting the sustainable commercialization of the product. In an environment of high heterogeneity among arboreal individuals, it becomes a constant challenge in the search for non-invasive methods for prospecting for oleoresin. In this work, by means of literature review and experimentation, we aimed to: i) review general aspects concerning the genus *Copaifera* L. and researches that reinforce its potential, the demand for technologies for non-timber forest products, the main technologies available, besides the main aspects perceived as challenges for this enterprise; ii) analyze the potential of impulse tomography (IT) for the prospection of oleoresin reservoirs in the trunk of *Copaifera* sp. trees; iii) verify the relationship between dendrometric, meteorological and phenological variables (presence/absence of leaves) with the speed propagation of mechanical waves (VPOM) and with the average VPOM (VmPOM); iv) evaluate different configurations of artificial neural networks (ANN) and indicate the most appropriate model for predicting the oleoresin volume of Copaifera sp., based on dendrometric, acoustic and seasonal variables. The tomographies were performed in cross sections, in 35 trees, at diameter height at breast height (DBH or 0%) and, among these, in 18 at heights of 25%, 50%, 75% and 100% (1st bifurcation), obtaining the variables: VmPOM, minimum VPOM, maximum VPOM, prospecting height in percentage (Hp%), total tree height, diameter in Hp% and percentage of area of the section affected by low velocities. At this site, we also investigated the interference of different seasonal periods on tomographic results, through acoustic, dendrometric and meteorological (minimum and maximum temperature, relative humidity), in addition to the leaf phenology condition, in two groups of trees: a) group A = 14 trees – seasonal transition to rainy period (2018); b) group B = 14 trees – seasonal dry period (2019). In addition, different artificial neural networks (ANN) configurations were tested, aiming at the prediction of oleoresin volume, in which the general Multilayer Perceptron (MLP) supervised learning architecture was employed. For all analyses, descriptive, experimental and multivariate statistical tests were used. It is possible to prospect reservoirs with a significant amount of oleoresin using IT, but mainly to indicate the exclusion of trees, necessarily without reservoirs or other discontinuities. IT is sensitive to capture changes in the trunk of trees as a function of seasonal periods. The indication of a high-accurate ANN (training correlation = 0,994 and validation = 0,996) brings oleoresin management closer to other interesting technologies for its planning and management, such as applications to improve the RNA-user interface, so as to optimize the inventory stage and, mainly, the cost-benefit analysis associated with a management area.

Keywords: Biotechnology, Deep learning, Forest products technology.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Produção da extração de oleorresina de *Copaifera* em três décadas (1986-2018). 31

Figura 2. Número de publicações científicas, por categoria, disponíveis na plataforma indexadora *ScienceDirect*, entre 2011 e 2021.....36

Figura 3. Exemplo de tomogramas obtidos por meio de tomografia de impulso e respectivos cortes transversais de troncos de *Micrandopsis scleroxylon* W. Rodr.....39

Figura 4. Exemplo de tomograma obtido por técnica de *stress wave* e *laser* acústico (a) e por ultrassom (b).....40

Figura 5. Exemplo de tomografia feita por Radar de penetração no solo: (a) amostra original, (b) dados de varredura do defeito (linha vermelha), (c) resultados do *TreeWin* e da (d) rotina de análise imagens reconstruídas por algoritmos.....41

Figura 6. Exemplo de imagens de RMN da árvore em crescimento, esquema das estruturas anel-porosas de madeiras precoces, tardias e do floema secundário.....43

Figura 7. Exemplo de imagem por RMN. A. Representação digital 3D da amostra de rocha *Desert Pink* (uma formação carbonática com dimensão 0,4×0,4×0,444) com resolução de 1 μm/voxel, e de duas camadas (B e C) do processo de segmentação do espaço de poro.....43

CAPÍTULO 2

Figure 1. Population site of *Copaifera* sp. prospected using impulse tomography…….75

Figure 2. Biplot analysis of main components (PC1 and PC2) and grouping by tomograms of the cross-sections of *Copaifera* sp. trees similarities……..84

Figure 3. Tomogram of transversal sections along the trunk of *Copaifera* sp. trees, in which oleoresin reservoirs were identified…… 86

CAPÍTULO 3

Figura 1. A. Variabilidade I de chuvas no leste do estado do Acre. B. Capixaba/AC, município de localização do sítio da pesquisa, Projeto de Assentamento Extrativista São Luís do Remanso……..107

Figura 2. Representação das matrizes de VPOM obtidas para a comunicação entre pares de sensores, para cada árvore de *Copaifera* sp. da região *do* município de Capixaba, estado do Acre, nas diferentes Hp% de realização da TI, nos distintos períodos de sazonalidade……..……...111

Figura 3. Situação das variáveis do clima referentes ao sítio (PAE São Luís do Remanso, estado do Acre) e fenologia das árvores de *Copaifera* sp., da região *do* município de Capixaba, estado do Acre, referentes aos dias de realização da TI…….113

Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP): plano com 43,5 % de explicação da variabilidade dos dados e de semelhanças relativas dos grupos de árvores de *Copaifera* sp., em função das variáveis dendrométricas, acústicas, meteorológicas e fenológica, características dos períodos de realização da tomografia de impulso…….....….....115

CAPÍTULO 4

Figura 1. Localização dos sítios originários das árvores de *Copaifera* sp. das quais se obtiveram os tomogramas analisados…….131

Figura 2. Representação da configuração das camadas de neurônios das RNA treinadas para a predição de reservatórios de oleorresina de *Copaífera* sp……135

Figura 3. Representação gráfica das configurações de RNA adotadas nas etapas de treinamento e validação das RNA desta pesquisa.....136

Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP) representativa do plano com 46,21 % de explicação da variabilidade dos dados e de semelhanças entre tomogramas de árvores de *Copaifera* sp.....138

Figura 5. Representação gráfica de parâmetros estatísticos (de qualidade) médios dos tipos de configuração de RNA ensinadas para a predição de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* sp…….....143

Figura 6. Representação gráfica de parâmetros estatísticos (de qualidade) médios dos tipos de configuração de RNA ensinadas para a predição de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* sp…….....144

Figura 7. Dispersão dos erros percentuais das estimativas de conteúdo de oleorresina por Redes Neurais Artificiais (y), em função dos valores observados do volume de oleorresina (x)……..149

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Principais componentes dos óleos essenciais de espécies do gênero *Copaifera* L..……...34

CAPÍTULO 2

Table 1. Categorization criteria for the condition of the cross-sections of the trunks of *Copaifera* sp.…78

Table 2. Dendrometric and mechanical wave propagation speed parameters in the DBH of trunks of copaíba trees (*Copaifera* sp.), transversal plane…….....81

Table 3. Proportion of the total variance explained by the compensations between components of interest from the ITP, eigenvalues (λi), and loads in explanatory percentages (%) of the PCA axes……83

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Categorias de variáveis (intrínsecas e extrínsecas) adotadas para examinar a diferença nas VPOM e VmPOM obtidas com TI, de árvores nativas de *Copaifera* sp., realizadas em dois períodos sazonais distintos.....108

Tabela 2. Caracterização descritiva dos grupos A e B, de árvores de *Copaifera* sp. da região *do* município de Capixaba, estado do Acre, em função de parâmetros dendrométricos e acústicos obtidos em dois diferentes períodos sazonais.....110

Tabela 3. Significância dos testes de *Kruskal-Wallis* para as medianas das VPOM em cada Hp%, para os grupos A e B de árvores de *Copaifera* sp. da região *do* município de Capixaba, estado do Acre....112

Tabela 4. Teste de correlação linear de *Pearson,* entre VmPOM e variáveis dendrométricas, acústicas, meteorológicas e fenológica, de árvores de *Copaifera* sp. da região do município de Capixaba, estado do
Acre.....114

Tabela 5. Sumário da Análise de Componentes Principais de onze dimensões, analisadas para a determinação da influência sazonal sobre as VmPOM, obtidas por Tomografia de Impulso, de árvores de *Copaifera* sp.....116

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Descrição dos sítios de localização, quantificação de indivíduos arbóreos de *Copaifera* sp. estudados e de tomografias realizadas em 2018 e 2019.....132

Tabela 2. Definição de variáveis utilizadas para a configuração das RNA para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp.....133

Tabela 3 – Critérios de qualidade para avaliação e seleção de RNA para a estimação do volume de oleorresina em *Copaifera* sp.....137

Tabela 4. Sumário da Análise de Componentes Principais de 12 dimensões, analisadas para a determinação relação de árvores de *Copaifera* sp.....140

Tabela 5. Parâmetros de qualidade médios dos tipos de configuração de RNA ensinadas para a predição de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* sp.....142

Tabela 6. Critérios de qualidade de aprendizado de dez tipos de configuração de RNA com arquitetura 13x4x1(5000 ciclos), utilizados para a estimativa da ocorrência de reservatórios de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.....145

Tabela 7. Critérios de qualidade de aprendizado de dez tipos de configuração de RNA com arquitetura 13x16x1(3000 ciclos), utilizados para a estimativa da ocorrência de reservatórios de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.....146

Tabela 8. Critérios de qualidade de aprendizado de dez tipos de configuração de RNA com arquitetura 13x30x1(5000 ciclos), utilizados para a estimativa da ocorrência de reservatórios de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.....147

Tabela 9. Critérios de qualidade de aprendizado das Redes Neurais Artificiais (RNA) finalistas (13x4x1 – 5000 ciclos; 13x16x1 – 3000 ciclos; 13x30x1 – 5000 ciclos), utilizadas para a estimatimação da ocorrência de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.....148

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 16
1.1 O contexto da procura por tecnologias 16
1.2 Objetivos 19
1.2.1 Objetivo geral 19
1.2.2 Objetivos específicos 19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 20

CAPÍTULO 1: TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS PARA A PROSPECÇÃO DO OLEORRESINA DE *Copaifera* L. 22
1 INTRODUÇÃO 25
2 DESENVOLVIMENTO 28
2.1 Demanda por tecnologias para produtos florestais não madeireiros 28
2.2 Aspectos gerais do gênero *Copaifera* e seu potencial 29
2.3 Tecnologias com potencial para a prospecção de reservatórios de oleorresina 37
2.3.1. Propagação acústica 37
2.3.2 Propagação de ondas eletromagnéticas 40
2.3.3. Redes Neurais Artificiais 47
2.4. Desafios inerentes à pesquisa sobre prospecção de reservatórios de oleorresina em árvores de copaíba 48
2.4.1 Características intrínsecas das árvores 49
2.4.2 Aspectos práticos 51
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

CAPÍTULO 2: OLEORESIN PROSPECTION IN *Copaifera* sp. TREES BY USING IMPULSE TOMOGRAPHY 70
INTRODUCTION 73
MATERIAL AND METHODS 75
Characterization of the site 75
Data acquisition 76
Data analysis 77
RESULTS 80
DISCUSSION 87
CONCLUSIONS 91
REFERENCES 92

CAPÍTULO 3: INTERFERÊNCIA DA SAZONALIDADE NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MECÂNICAS EM SEÇÕES TRANSVERSAIS DO TRONCO DE ÁRVORES DE *Copaifera* sp... 101
1 INTRODUÇÃO 104
2 MATERIAL E MÉTODOS 107
2.1 Caracterização do sítio 107
2.2 Aquisição de dados 108
2.3 Análise dos dados 109
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 110
4 CONCLUSÕES 120

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 121

CAPÍTULO 4: USO DE REDES NEURAIS ARTIFICAIS NA PREDIÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE OLEORRESINA DE *Copaifera* sp. 126
1 INTRODUÇÃO 129
2 MATERIAL E MÉTODOS 131
2.1 Caracterização dos sítios, aquisição e definição dos dados 131
2.2 Domínio do problema 133
2.3 Configuração, treinamento e validação das Redes Neurais Artificiais 134
2.4 Definição dos critérios de qualidade 137
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 138
4 CONCLUSÕES 151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 152

CONCLUSÃO GERAL 158

ANEXOS 161

1 INTRODUÇÃO GERAL

O presente trabalho "Prospecção de oleorresina de *Copaifera* L. por meio de análises não destrutivas" apresenta os primeiros resultados obtidos de investigações realizadas, visando reunir informações que subsidiem o desenvolvimento de métodos práticos para determinação da existência e quantificação do conteúdo de oleorresina no tronco de árvores vivas.

O Capítulo 1, "Tecnologias e métodos de análises não destrutivas para a prospecção do oleorresina de *Copaifera* L.: Estado da Arte", contextualiza a complexidade de aspectos relacionados à questão. São apresentadas as principais características das árvores e do óleo de copaíba, incluindo o potencial de aplicação desta matéria-prima em diferentes segmentos industriais, reúne algumas das principais tecnologias (métodos de análise não destrutiva) disponíveis e com potencial para o estabelecimento de um método eficiente de prospecção, aborda aspectos relacionados à heterogeneidade anatômica do tecido lenhoso das árvores e suas diferentes estratégias evolutivas, que interferem e modificam a estrutura interna dos troncos.

Em seguida, são apresentados três capítulos que demonstram os resultados de experimentos práticos. No Capítulo 2 "Oleoresin prospection in *Copaifera* sp. trees by using impulse tomography", verificou-se o potencial da tomografia por propagação de ondas mecânicas, aplicada diretamente à campo, para indicar a exclusão de árvores que não apresentam reservatórios de oleorresina, identificar árvores ocas e indicar a ocorrência de reservatórios.

Em função dos resultados obtidos com a experimentação apresentada por Martins, Santos e Latorraca (2021), verificou-se que, para uma melhor compreensão do fenômeno que envolve a propagação de ondas mecânicas em árvores, seria importante a realização de uma análise abordando a influência que fatores relacionados às condições ambientais podem exercer sobre a propagação acústica.

Dessa forma, o Capítulo 3 "Interferência da sazonalidade na propagação de ondas mecânicas em seções transversais do tronco de árvores de *Copaifera* sp." trata da sensibilidade da tomografia de ondas mecânicas às mudanças do conteúdo de água nos troncos, em função do período sazonal em que foi realizada e da fase fenológica foliar dos indivíduos arbóreos estudados.

Por fim, no Capítulo 4 "Uso de redes neurais artificiais na predição de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* sp." é apresentada a primeira proposta de Rede Neural Artificial, construída com base em variáveis obtidas a partir da tomografia de ondas mecânicas, de variáveis dendrométricas e do período sazonal, visando a predição de reservatórios de oleorresina, em função do volume esperado de oleorresina.

1.1 O contexto da procura por tecnologias

De acordo com Silva (2003), há pelo menos cinco séculos os produtos florestais não madeireiros (PFNMs) da Região amazônica são alvo do interesse econômico global. Mas,

considera-se que, o estabelecimento de um modelo de desenvolvimento sustentável para a Amazônia, com base no uso racional dos recursos naturais, ainda hoje (ano 2021), é um desafio.

A compilação de definições do que são os PFNMs, feita por Salimon e Martins (2015, p. 376), mostrou que esse conjunto de produtos florestais contém "todos os produtos de origem vegetal, animal ou paisagístico, incluindo-se a madeira (exceto a madeira destinada à serraria, movelaria e a construção civil), que podem ser extraídos de florestas nativas ou plantadas, ambientes alterados e sistemas agroflorestais, além dos serviços ambientais mantidos por tais ambientes".

O uso equilibrado dos PFNMs é um compromisso reestabelecido como política pública do Brasil, pela instituição da Lei Nº 12.651 de 2012, que pautou as normas gerais sobre a proteção da vegetação, exploração, suprimento e controle da origem dos produtos e da matéria-prima florestal (BRASIL, 2012), sendo essas determinadas de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável. Este marco legal implica no manejo florestal sustentável que, por sua vez, se fundamenta na capacidade de quantificar o volume e projetar o valor da matéria-prima, e de seus múltiplos produtos, adequadamente. Isso envolve todas as fases da cadeia produtiva, mas além disso, de acordo com Brasil (2012), é necessário:

> I – Não descaracterizar a cobertura vegetal e não prejudicar a conservação da vegetação nativa da área;
> II – Assegurar a manutenção da diversidade das espécies;
> III – Conduzir o manejo de espécies exóticas com a adoção de medidas que favoreçam a regeneração de espécies nativas.

As pesquisas no âmbito da tecnologia florestal têm foco, principalmente, nas demandas de segmentos ligados aos produtos madeireiros, que são oficialmente mais relevantes para a economia. Além disso, as pesquisas dedicadas à tecnologia e uso de PFNMs (6,72%) e floresta/silvicultura (3,95%) estão em desvantagem, com relação à porcentagem de pesquisas relacionadas a conservação (35,97%), economia, administração, legislação e fiscalização (28,06%) e dos 25,30% ao manejo de florestas nativas e plantadas (SILVA *et al*., 2020).

Um aspecto que deve ser considerado é a discrepância entre o potencial de produtos da biodiversidade e os PFNMs que são efetivamente utilizados. Tomando como base as políticas públicas do Brasil até 2013, um total de 17 linhas de financiamento se destinam ao setor florestal como um todo, atendendo à diversas finalidades (SILVA *et al*., 2018). Os autores verificaram que, apenas um número reduzido de cadeias produtivas (dendê, seringa, erva-mate, pequi, castanha-do-Brasil, mangaba, cupuaçu, araticum e açaí) possui linhas de financiamento específicos e, além disso, os setores de extração vegetal e de silvicultura apresentaram queda de produção (tonelada/ano) entre 1986 e 2017.

De modo geral, ampliar o conhecimento e as oportunidades relacionadas ao uso eficiente dos PFNMs é o objetivo de pesquisadores de diversas áreas. Entretanto, algumas espécies florestais nativas possuem condições de aproveitamento pouco viáveis, em função das lacunas de entendimento existentes sobre elas, e mesmo após diversas iniciativas de organização e fortalecimento das cadeias produtivas, muitos são os aspectos que necessitam de soluções ligadas à ciência, tecnologia e inovação.

A Política de Desenvolvimento da Biotecnologia Brasileira (Decreto Nº 6.041 de 2007) apoia a ideia de que, atualmente, a biotecnologia é uma das ferramentas tecnológicas mais importantes para o desenvolvimento nacional, com base no conhecimento e na inovação, devido às contribuições econômicas e sociais que suas aplicações têm proporcionado, pois pesquisas aplicadas podem contribuir para o alcance da redução dos custos de produção (BRASIL, 2007).

Dentre as essências florestais arbóreas que têm recebido diferentes formas de apoio para a consolidação da cadeia produtiva, por possuir um produto com potencial diversificado e por ter relação com a subsistência de inúmeras populações tradicionais e cooperativas, destaca-se a copaíba, gênero *Copaifera* L., conhecida por secretar e acumular um oleorresina com propriedades especiais, passível de ser aproveitado economicamente para diversos fins.

Segundo Rigamonte-Azevedo *et al.* (2006), a exploração do oleorresina tem um importante papel para a manutenção do extrativismo e da conservação da biodiversidade amazônica. De acordo com Acre (2010), a renda complementar obtida pelos produtores rurais com a extração do oleorresina de copaíba advém do comércio do referido produto no estado do Acre, sendo esse um produto estratégico devido à grande aceitação nas indústrias de cosméticos e fármacos.

Mas, a produtividade obtida por árvore de copaíba é relativa, pois não há uma média de referência para todas as árvores, o que torna a atividade de alto risco econômico (VEIGA JUNIOR; PINTO, 2002), considerando o investimento necessário para o manejo sustentável, seja ele em floretas nativas ou plantadas.

Prospecção (latim tardio *prospectio*, *-ions*) é a ação de prospectar (DPLP, 2021) e significa "explorar uma região à procura de reservas de minério, de petróleo, de água e de materiais apropriados ao aproveitamento de energia atômica", bem como "fazer sondagens ou ensaios nessas reservas para determinar o seu provável valor econômico" (MICHAELIS, 2021). Considerando o valor econômico e as condições dos depósitos de oleorresina de *Copaifera*, adotou-se o termo prospecção para designar os procedimentos exploratórios dos reservatórios, que se localizam nos troncos das árvores.

Nesse sentido, para a prospecção de oleorresina propõem-se utilizar os Métodos Não Destrutivos (MND) de análises e ferramentas estatísticas para mapear, de modo não invasivo e previamente, o interior dos troncos, considerando-se que esses possuem características físicas e químicas indicadoras da presença desta substância, em quantidade suficiente para ser classificada como reservatório, visando uma maior viabilidade para a extração deste capital natural. É estratégico o desenvolvimento de métodos capazes de reduzir danos as matrizes produtoras de oleorresina e, ainda, otimizar o tempo investido na etapa de extração da substância.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Contribuir para desenvolver o potencial de aplicação de MND utilizados na avaliação da qualidade da madeira, para a prospecção de reservatórios de oleorresina, tendo como objeto de estudo árvores nativas de *Copaifera* sp., do estado do Acre, Brasil.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar um contexto atual acerca da conjuntura do oleorresina e dos métodos não destrutivos de análises de materiais disponíveis e promissores, além dos principais desafios concernentes à prospecção do oleorresina em árvores de *Copaifera* L.;

- Testar o potencial da tomografia de impulso para a prospecção de reservatórios de oleorresina no caule de árvores de *Copaifera* sp.;

- Verificar a interferência de diferentes períodos de sazonalidade na propagação de ondas mecânicas através de seções transversais do tronco de árvores de *Copaifera* sp.;

- Treinar diferentes modelos de Redes Neurais Artificiais, e indicar uma rede apropriada para a predição da ocorrência de reservatórios de oleorresina no fuste de árvores de *Copaifera* sp.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE – Governo do Estado do Acre. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. 2. ed. Rio Branco: Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), 356 p., 2010. Disponível em: http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Documento_Sintese.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

BRASIL. Decreto Nº 6.041, de 8 de fevereiro de 2007. Institui a Política de Desenvolvimento da Biotecnologia, cria o Comitê Nacional de Biotecnologia e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 2007. Disponível em: https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=6041&ano=2007&ato=31eQTQE9ENRpWT147. Acesso em: 11 set. 2021.

BRASIL. Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 2012. Disponível em: https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12651&ano=2012&ato=a48QTVU1kMVpWT59b. Acesso em: 11 set. 2021.

PROSPECÇÃO. *In*: Dicionário Priberam da Língua Portuguesa – DPLP. 2021. Disponível em: https://dicionario.priberam.org/PROSPEC%C3%87%C3%95ES. Acesso em: 11 set. 2021.

PROSPECTAR. *In:* Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa – MICHAELIS. Editora Melhoramentos Ltda. 2021. Disponível em: https://michaelis.uol.com.br/palavra/2aeQA/prospectar/. Acesso em: 11 set. 2021.

RIGAMONTE-AZEVEDO, O., C.; WADT, S., P., G.; WADT, L., H., O. Potencial de produção de óleo-resina de copaíba (*Copaifera* sp.) de populações naturais do sudoeste da Amazônia. **Rev. Árvore**, v. 30, n. 4, 2006. DOI 10.1590/S0100-67622006000400011.

SALIMON, C. I.; MARTINS, B. C. Uso de sementes de palmeiras na produção de artesanato no Acre. *In*: SANTOS, R. C. dos; SIVIERO, A. (org.), **Agroecologia no Acre**. 1. ed. Rio Branco: IFAC, 2015. cap. 17, p. 371-388.

SILVA, T. C.; ARAUJO, E. C. G.; LINS, T. R. S.; REIS, C. A.; SANQUETTA, C. R.; ROCHA, M. P. Non-timber forest products in Brazil: A bibliometric and a state of the art review. **Sustainability,** 2020, v.12, n.17, 7151; DOI 10.3390/su12177151.

SILVA, N. M.; MARTINS, B. C.; NAGY, A. C. G.; MACIEL, N. S. R. Políticas públicas do Brasil para produtos florestais não madeireiros. *In:* PINA, F.; MARTINS, F. (Eds.) **The**

overarching issues of the european space: A strategic (re)positioning of environmental and socio-cultural problems? Porto, Fac. Letras Univ. Porto: 2018. p. 255-273. DOI 10.21747/9789898969149/polit.

SILVA, J. A. **Quebrando a castanha e cortando seringa**. Seropédica, RJ: Edur, 2003. 136p.

VEIGA JUNIOR, V., F.; PINTO, A., C. O gênero *Copaifera* L. **Quím. Nova**, v. 25, n. 2, p. 273-286, 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/qn/v25n2/10455.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

CAPÍTULO I:

TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS PARA A PROSPECÇÃO DO OLEORRESINA DE *Copaifera* L.: ESTADO DA ARTE

RESUMO

O oleorresina é um tipo especial de extrativo secretado por árvores do gênero *Copaifera* L. (copaíba). Esta substância possui um extraordinário potencial relacionado aos diversos compostos químicos que o constitui e os diversos fins os quais têm sido identificados, tais como: farmacológicos, cosméticos, energéticos e outros. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo abordar aspectos gerais a respeito das copaibeiras, dos avanços de pesquisas que reforçam o potencial desta substância, do contexto da demanda por tecnologias para produtos florestais não madeireiros, das principais tecnologias que apresentam potencial para a prospecção de reservatórios de oleorresina, além de um compilado de aspectos entendidos como desafios para este empreendimento. Pretendeu-se apresentar uma compreensão objetiva à cerca de tecnologias atuais, visando estimular novas colaborações e pesquisas. Constatou-se que, diversas tecnologias e métodos, com maior ou menor grau de complexidade e precisão, estão disponíveis e podem ser utilizados em testes laboratoriais e à campo, para tornar possível responder aos questionamentos sobre a ocorrência e a localização dos reservatórios de oleorresina, bem como sobre o volume de produto armazenado e sua capacidade futura. Os desafios para este empreendimento envolvem aprofundar os conhecimentos sobre a ecologia e a fisiologia das árvores, nas diferentes etapas de seu desenvolvimento, pois entender a sua estrutura lenhosa nos sentidos radial e longitudinal pode levar à detecção precoce de regiões intra-tronco acometidas por fungos ou outras injúrias, que poderão dar início a novos reservatórios.

Palavras-chaves: Árvore, Métodos Não Destrutivos, Produtos Florestais Não Madeireiros, Tecnologia de produtos florestais.

ABSTACT

Oleoresin is a special type of extractive secreted by trees of the genus *Copaifera* L. (copaiba). This substance has an extraordinary potential related to the various chemical compounds that constitute it and the various purposes for which it has been identified, such as pharmacological, cosmetic, energetic and others. The purpose of this literature review is to address general aspects about the copaibeiras trees, the advances in research that reinforce the potential of this substance, the context of the demand for technologies for non-timber forest products, the main technologies that have potential for the prospection of oleoresin reservoirs, as well as a compilation of aspects perceived as challenges for this enterprise. However, it is not intended to provide an exhaustive review of the technologies, but rather to present an objective understanding of the current technological advances in order to stimulate new collaborations and research. It is intended to present an objective understanding of current technologies, with varying degrees of complexity and precision, are available and can be used in laboratory and field tests to make it possible to answer questions about the occurrence and location of oleoresin reservoirs, as well as the volume of stored product and its future capacity. The challenges for this enterprise involve deepening the knowledge of the ecology and physiology of trees at different stages of their development, because understanding their woody structure in radial and longitudinal directions can lead to early detection of intra-stem regions affected by fungi or other injuries, which may initiate new reservoirs.

Keywords: Tree, Non-Destructive Methods, Non-Timber Forest Products, Forest Products Technology.

1 INTRODUÇÃO

Árvores do gênero *Copaifera* L. (copaíba) secretam um extrativo natural, o oleorresina, um produto com qualidade comprovada por inúmeras pesquisas, cujos resultados abrangem o uso tradicional, a ecologia e o manejo, além de indicarem o potencial extraordinário dos seus compostos químicos para diversos usos farmacológicos e energéticos.

O potencial de aproveitamento deste extrativo tem sido cada vez mais, objeto de pesquisa, em função das diversas propriedades que possui. Ao longo do tempo, foram elucidados e descobertos novos componentes, testada sua capacidade de alterar a percepção da dor em situações de emergência, avaliada sua atividade anti-inflamatória e antileishmaniose, a atuação no controle de células cancerígenas e sobre células de defesa do organismo (macrófagos); testada a ação antioxidante *in vitro,* a toxidade no desenvolvimento fetal e a influência sobre o desempenho reprodutivo; além da avaliação de faixas de concentração seguras para o consumo, concentração antimicrobiana ideal e, ainda, a capacidade de dotar de resistência à tração filmes de verniz dental, dentre outras inúmeras aplicações.

No entanto, o fornecimento do oleorresina não é contínuo e há incompleta compreensão dos fatores que interferem na produção, o que prejudica o mercado deste produto florestal não madeireiro (MARTINS *et al*., 2016). Para aprofundar a compreensão, ou a superação de tais condicionantes, é oportuno estudar as características da madeira de árvores deste gênero, para viabilizar novas alternativas produtivas.

O estudo da madeira, por si só, é uma atividade que envolve muitas etapas, procedimentos e conhecimentos. Significando que, devido à variabilidade intraespecífica de aspectos bióticos, químicos, anatômicos, estruturais, físicos e mecânicos de árvores vivas, esta compreensão representa um desafio adicional, porque as árvores são seres incríveis, capazes de modificar seu organismo para viverem em variadas condições ambientais. Arciniegas *et al*. (2014) consideram que as árvores, por adaptarem seu crescimento às condições ambientais, apresentam características que variam com a idade.

A madeira é um tecido biológico, estruturalmente complexo, fibroso e composto por milhões de células, que constituem os caules, os ramos e as raízes das árvores (BUCUR, 2006). Ao longo de inúmeras gerações esses organismos evoluíram, se aperfeiçoaram e desenvolveram novos componentes histológicos e polimorfismo, por meio de modificações e adaptações (CARLQUIST, 2012). Características e variações estruturais do lenho, relacionadas às dimensões dos elementos celulares, têm relação com fatores ambientais que afetam o crescimento, tais como: localização geográfica, qualidade do sítio, tipo de solo e disponibilidade de água (MARCATI; ANGYALOSSY-ALFONSO; BENETATI, 2001).

Desse modo, o estudioso de árvores vivas deve considerar que ocorrem defeitos devido às irregularidades inerentes aos padrões naturais de crescimento, característicos pelo desvio da grã, da presença de nós e outros, além do resultado de ataques de microrganismos e insetos (BUCUR, 2005).

De acordo com Zhang *et al*. (2015), existem Métodos Não Destrutivos (MND) de análise usados para o conhecimento de diferentes propriedades físicas, mecânicas e químicas

dos materiais. Espinosa *et al.* (2020) citam MND utilizados em diversas pesquisas de detecção de decomposição em árvores vivas (radiação ionizante, técnicas térmicas, microondas, elétrica, radar, além de perfis de perfuração) e afirmam que, tais técnicas são adequadas para avaliação da existência de ocos, ataques fúngicos e outros defeitos. Arciniegas *et al*. (2014) forneceram uma revisão de técnicas atuais de propagação acústica e imagiologia da madeira, discutindo o alcance prático das mesmas.

O oleorresina pode ser encontrado em todas as partes da planta, mas acumula-se mais intensamente no tronco da árvore (MARTINS-DA-SILVA, 2008; MEDEIROS, 2016). O volume acumulado que pode ser extraído de um tronco é variável. Acredita-se que, em alguns casos, é formado um reservatório, ou fenda, no tronco de algumas árvores, com conteúdo expressivo (MARTINS *et al*., 2016; MEDEIROS, 2016; MARTINS-DA-SILVA, 2008), sendo possível, teoricamente, determinar sua localização, por meio de MND de análise indicados para o estudo da qualidade da madeira.

Determinar um MND eficiente para a prospecção do oleorresina pode aumentar a confiabilidade da perfuração do tronco para acesso aos reservatórios e, por conseguinte, da produção e da proteção às árvores, que são manejadas por vários ciclos, seja em povoamentos nativos ou, futuramente, plantados. Antecipa-se que, o desenvolvimento dessa linha de pesquisa (prospecção de oleorresina) busca responder a diversas questões, de distintas naturezas, entre as quais pelo menos:

a) Há um reservatório de oleorresina?
b) Onde o reservatório está localizado?
c) Existem reservatórios ao longo de todo o tronco?
d) Qual o volume de substância armazenada?
e) Qual a capacidade de armazenamento do reservatório?
f) É possível induzir a formação de um reservatório?
g) Existe uma espécie mais apropriada para a domesticação?
h) Qual é o modelo silvicultural mais apropriado para a implantação de florestas de produção?
i) É possível reduzir a idade produtiva?

A lógica adotada para o raciocínio a respeito desse processo de desenvolvimento, aplicando-se MND e técnicas estatísticas preditivas, se assemelha àquela considerada nos métodos sísmicos de prospecção de petróleo e gás natural, utilizando modelagem de imagem digital, obtida com base na impedância acústica, no eletromagnetismo, na densidade, na porosidade, na permeabilidade dos materiais e outras características.

A prospecção geoquímica de superfície para hidrocarbonetos inclui um conjunto de técnicas capazes de indicar acumulações de subsuperfície e, embora muitas técnicas apresentem limitações, é possível aumentar as chances de perfurar um poço de produção, permitindo estimar o potencial valor comercial e auxiliar programas de exploração racional em qualquer bacia do mundo (JONES *et al*., 1989). Ashraf *et al.* (2019) avaliaram o campo de gás de Sawan, no Paquistão, um reservatório de constituição heterogênea e considerado de difícil prospecção.

Os autores supracitados analisaram dados históricos de produção e distintos atributos sísmicos, representados em 3D, utilizando uma técnica de interpretação de características estruturais e estratigráficas, e ressaltaram que as propriedades mais críticas para a questão são a impedância acústica, as diferenças na elasticidade das rochas-subsuperficiais e a interpretação validada cruzada.

Presume-se que na atualidade existem tecnologias que podem ser empregadas isoladamente, ou associadas, para localizar reservatórios de oleorresina no interior do tronco das árvores, sendo este, um esforço com potencial para revolucionar sua cadeia produtiva.

Esta revisão aborda aspectos gerais a respeito das copaíbas e os avanços de pesquisas que reforçam o grande potencial do oleorresina, o contexto do setor de Produtos Florestais Não Madeireiros quanto a demanda por tecnologias, além das principais tecnologias disponíveis e que apresentam potencial para a prospecção de reservatórios de oleorresina, além de um compilado de aspectos entendidos como desafios para este empreendimento.

Não há pretensão, entretanto, de fornecer uma revisão exaustiva sobre as tecnologias, mas sim apresentar uma breve compreensão acerca do potencial de aplicação, das técnicas e métodos disponíveis atualmente e que podem ser aplicados para a prospecção de oleorresina em árvores de *Copaifera* L., para assim estimular novas colaborações e pesquisas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Demanda por tecnologias para produtos florestais não madeireiros

Existe uma discrepância entre o potencial de produtos da biodiversidade e os Produtos Florestais Não Madeireiros – PFNM que são de fato utilizados de modo eficiente. Apesar da importância dos PFNM, há carência de informações que vão desde as quantidades produzidas, preços de venda, etapas do processo produtivo, manejo, industrialização e comercialização (PEDROZO *et al*., 2011). Fiedler *et al.* (2008) defendem o uso de tecnologias industriais para melhorar a lucratividade por entenderem que, entre todos os potenciais PFNM, somente alguns têm valor agregado.

Há uma lacuna de tecnologias adequadas à produção de PFNM, representada por problemas relativos ao transporte até a falta de informações sobre as regiões produtoras, restando a necessidade de diversificação, modernização e agregação de valor à produção (CALDERON, 2013).

A incorporação de novas tecnologias às cadeias produtivas atende a relação de interesse entre as atividades de Ciência e Tecnologia (C&T) e de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), em função de exigências do mercado. Assim, a pesquisa científica e a tecnologia são propulsoras das inovações tecnológicas e da expansão das atividades desenvolvidas por arranjos comunitários e sistemas produtivos de recursos florestais na Amazônia (COSTA, 2010). A modernização da indústria de base florestal deve ser priorizada, adotando-se um programa de desenvolvimento tecnológico para a consolidação dos PFNM no mercado nacional e internacional (CGEE, 2002). O investimento em C&T, no Brasil, é estimulado pelo apoio à formação universitária e à pós-graduação, em instituições públicas governamentais e privadas, por meio de subsídios, auxílios e bolsas de estudo (CGEE, 2007).

A biotecnologia aplicada é considerada fundamental para proporcionar ganhos de produtividade e elevação dos padrões de qualidade dos processos e dos produtos (COSTA, 2010), e o desenvolvimento de novas técnicas de manejo e de coleta de matéria-prima em povoamentos florestais plantados e nativos, de novos produtos e usos (CGEE, 2002). Contudo, as pesquisas em tecnologia florestal são focadas, principalmente, nas demandas de segmentos ligados aos produtos madeireiros, que são oficialmente mais relevantes para a economia.

Segundo Mattoso (2005), em 2002 o mercado global de aromas e fragrâncias (A&F) movimentou, cerca de, US$ 15,1 bilhões, sendo que US$ 1,8 bilhões se devem ao mercado de óleos essenciais e extratos naturais. Além disso, no mesmo período, as exportações brasileiras de óleos essenciais, extratos vegetais para perfumaria e oleorresinas somaram US$ 50,8 milhões, aproximadamente 2,8 % do mercado global, e US$ 340 mil em exportações brasileiras de bálsamo de copaíba.

De acordo com CGEE (2007), pelo menos, 22 empresas comercializavam o óleo de copaíba nos mercados local, regional e externo, seja ele bruto, refinado ou o produto final. Algumas comercializavam no exterior, como: Natura, Boticário, Beraca Sabará, Chamma da Amazônia, Juruá, Magia dos Aromas, Farmaervas, Valmari, Crodamazon e Yves Rocher. Além

disso, os produtos (sabonete, shampoo, óleo *in natura*, balsamo, máscaras, sal para banho, pós-barba, entre outros) alcançavam consumidores em diversos países (Argentina, Chile, Peru, Bolívia, México, Cabo Verde, Suriname, Nicarágua, El Salvador, Venezuela, Uruguai, Paraguai, Estados Unidos da América (EUA), Canadá, Japão, Suíça, Alemanha, Grécia, França, Portugal, Austrália, Israel, Turquia, Indonésia, Tailândia, China, Coréia, Rússia, Emirados Árabes, Arábia Saudita, África do Sul, Egito, Moçambique, Angola e Ilha da Madeira), com expectativa de que alcançasse, ainda, outros países.

Araújo *et al.* (2018) verificaram que, o Brasil e os EUA são os países com o maior número de patentes no sistema de base de dados patentários *Questel Orbit*. Ao todo, 190 publicações relacionadas à copaíba foram encontradas para o período entre 1996 e 2016, a maioria classificada na subclasse A61K (preparações para finalidades médicas, odontológicas e higiênicas).

Isso torna mais relevante o que ressaltaram Santos *et al.* (2001) quanto à necessidade de pesquisas científicas e inovações tecnológicas voltadas para estudos de genética, identificação botânica e determinação de produtividade, como sendo as demandas tecnológicas necessárias para a implementação do sistema produtivo do oleorresina da copaíba.

Em 2020, foi lançado o Projeto "Amazônia 4.0: Definindo uma terceira via para a Amazônia". Sobre a proposta, Nobre e Nobre (2019, p. 15) argumentam que, a Indústria 4.0 engloba "sistemas ciberfísicos, internet das coisas, redes de comunicação, Inteligência Artificial, convergência de tecnologias biológicas computacionais, digitais e de materiais", assim propõem utilizar tais tecnologias para desenvolver cadeias de valor de base local, agregando as novas tecnologias da Quarta Revolução Industrial.

2.2 Aspectos gerais do gênero *Copaifera* e seu potencial

Árvores do gênero *Copaifera* L. subdividem-se em inúmeras espécies da família botânica Leguminosae Juss. Engler e subfamília Detarioideae Burmeist (LPWG, 2017), essas estão distribuídas por diversos países da África e da América do Sul (INZUNZA, 1992; VEIGA JUNIOR; PINTO, 2002; PLOWEN, 2004), além de Estados Unidos e França (GBIF, 2019).

De acordo com o banco de dados do Herbário do Jardim Botânico do Rio de Janeiro – JBRJ, foram catalogadas 32 espécies de copaíba, que ocorrem nas diferentes regiões do Brasil (JBRJ, 2020), dentre as quais, *C. arenico, C. cordifolia, C. glycycarpa e C. rigida* se distinguem das 77 espécies do gênero *Copaifera* catalogadas no *Global Biodiversity Information Facility* – GBIF até 2019 (GBIF, 2019).

A descrição geral adotada para a caracterização do gênero *Copaifera* é, de acordo com Veiga Junior e Pinto (2002), a descrição feita por Linneu para à espécie *Copaifera officinalis* em 1762, que a considerou uma planta arbórea muito resistente, de desenvolvimento lento, longevidade de até 400 anos e grande porte, podendo chegar de 25 a 40 metros de altura e diâmetro entre 0,4 a 4,0 metros.

Estudos sobre a anatomia de *C. langsdorffii* Desf. (MARCATI, ANGYALOSSY-ALFONSO; BENETATI, 2001; CARVALHO *et al*., 2018) e *C. multijuga* Hayne (MEDEIROS, 2016) encontraram camadas de crescimento delimitadas por faixas de parênquima axial

marginal e canais secretores inseridos nas faixas de parênquima. Medeiros (2016) verificou, também, um conteúdo oleoso em abundância nas células de raio.

Embora seja reconhecida a intercomunicação entre os canais que armazenam o oleorresina (secretores), há uma teoria de que este pode ser armazenado em "bolsões" isolados, em diferentes partes do tronco (MEDEIROS, 2016), mas o sistema vascular apresenta características estruturais complexas e situações que poderiam limitar o fluxo através desta estrutura. Sendo este, o argumento para a necessidade da proposição de métodos de avaliação que ajudem a prever o local em que ocorre o acúmulo de oleorresina.

De acordo com Ascensão (2007, p. 24), "a formação do lúmen das cavidades e dos canais é concomitante com o ínicio do processo secretor". Complementarmente, o autor sugere que, a pressão exercida pelo acúmulo de secretado leva à deformação plástica do lúmen das células epiteliais dos canais secretores. Desse modo, nesta pesquisa, definiu-se reservatório (bolsão ou veio) como uma deformação ou descontinuidade no interior do tronco, especialmente na região próxima à medula, que pode assumir formas variadas, e que armazena uma quantidade significativa de oleorresina. Também, faz-se distinção de deformidades internas chamadas de fissuras (Anexo VII), as quais apresentam pequena dimensão, não sendo consideradas reservatórios significativos, embora tenha sido verificada a acumulação de oleorresina. Em alguns casos, as fissuras apresentam pigmentação escura.

De modo geral, estudos sobre o rendimento da produção de oleorresina se dedicam a demonstrar as quantidades, total e média, extraídas por árvore e por sítio de coleta. Mas, do ponto de vista da viabilidade produtiva, considera-se a proporção entre árvores com produção maior que um litro (MEDEIROS, 2016), a proporção de árvores efetivamente produtivas e o volume de produto obtido em determinado período de tempo após a furação (MARTINS *et al*., 2016), o que demonstra a dependência de um ciclo de manejo prévio, que representa um investimento arriscado. Newton, Watkinson e Peres (2011) estudaram 179 árvores, com diâmetro à altura do peito (DAP) maior que 25 centímetros, empregando uma perfuração por tronco, na direção casca-medula, e concluíram que o tamanho da árvore e o tipo de ambiente influenciam a produtividade de oleorresina, e que em uma segunda coleta a produção alcança apenas 35% do volume original.

De acordo com dados do IBGE (2020), a série temporal (32 anos) da produção I de oleorresina de copaíba demonstra que a relação entre a quantidade produzida e o valor da produção pode ser separada em três momentos principais: Baixo valor da produção em comparação ao volume produzido (1986 a 1993); Aumento considerável do volume produzido e crescente aumento do valor da produção (1994 a 2010); e Redução da quantidade produzida e valorização do produto (2011 a 2018). Não obstante, após atingir o ápice da produção em 2010, houve uma brusca redução da quantidade I produzida e, também, do valor da produção. No entanto, em 2012 ocorreu uma reação positiva, fazendo com que o valor da produção se equiparasse ao mesmo patamar de quando o volume de produção era muito superior (Figura 1).

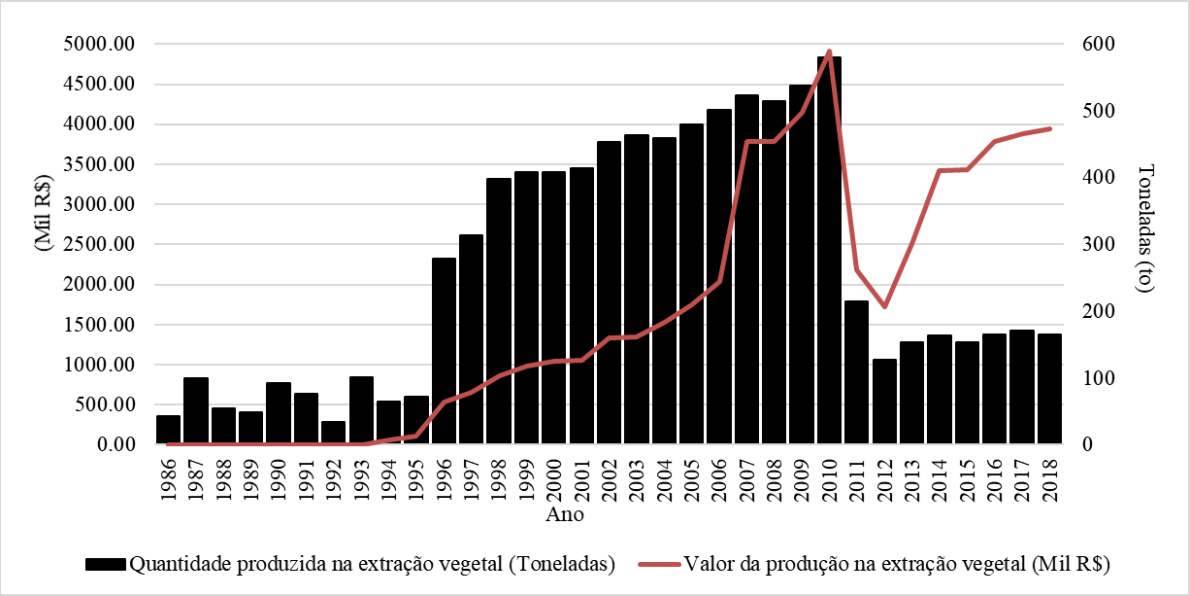


Figura 1. Produção da extração de oleorresina de *Copaifera* em três décadas (1986-2018). Fonte: IBGE, 2020. https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#notas-tabela

É evidente que, após atingir o ápice da produção em 2010, ocorreu uma brusca redução da quantidade produzida anualmente e, também, do valor da produção. No entanto, em 2012 observa-se uma reação positiva ascendente fazendo com que o valor da produção se equiparasse ao mesmo patamar de produção de volumes muito superiores.

À respeito de tais variações, restam perguntas a serem respondidas: Políticas de valorização do produto surtiram o efeito desejado? Empresas e consumidores passaram a valorizar e pagar mais pelo produto? A produção de base voltou para a informalidade e o volume comercializado é maior que o declarado? A remuneração do produtor também aumentou? Considera-se que, essas mudanças, também, podem refletir um período em que planos de manejo foram estimulados por Ongs e Governos estaduais em estados amazônicos.

O Decreto Estadual N˚ 25.044/2005, do estado do Amazonas, "proíbe o licenciamento do corte, transporte e comercialização de madeira das espécies de andirobeiras e copaibeiras e dá outras providências" (AMAZONAS, 2005), e as Instruções Normativas MMA nº 5/2006 e SDS/IPAAM nº 005/2008 determinam que associações comunitárias, empresas, proprietários ou possuidores rurais, que querem extrair o óleo de copaíba para a comercialização, devem realizar o cadastro técnico federal do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e informar ao Órgão ambiental estadual sobre espécies, quantidades extraídas, produtos e atividades a serem realizadas (LIMA *et al*., 2011).

Devido ser, muitas vezes, uma atividade informal pode ocorrer uma subestimativa do volume de material extraído anualmente, significando que as organizações que compõem os arranjos produtivos locais (APL) não têm recebido o apoio tecnológico necessário para melhor desenvolver as cadeias produtivas (CP), comprometendo a extração e a qualidade do produto, resultando em menor valor agregado.

No sudoeste amazônico, entre 2004 e 2012, foram mapeadas 3,4 mil árvores copaibeiras, abrangendo, aproximadamente, 42 mil hectares de florestas nas Unidades de Conservação:

Reserva Extrativista Chico Mendes, Reserva Extrativista Cazumbá-Iracema, Floresta Nacional Macauã, Floresta Nacional São Francisco e Projeto de Assentamento Agroextrativista São Luiz do Remanso. Por meio desta iniciativa de apoio a cadeia produtiva do óleo de copaíba, sua extração e comércio foram intensificados, resultando em uma melhor economia para as famílias envolvidas, devido a agregação de valor alcançada, passando dos R$ 15,00/kg recebidos em 2007 para R$ 20,00/kg recebidos em 2008, tendo sido ofertada mais de 1 tonelada de óleo no período (WWF-Brasil, 2017). O Manejo Florestal Comunitário de Uso Múltiplo e a certificação *Forest Stewardship Council* (FSC) constituíram a estratégia de Apoio, visando sensibilizar para o manejo, treinar, disponibilizar equipamentos de extração e segurança, definir e aprovar padrões de certificação para os produtos não madeireiros como copaíba e outros (WWF-Brasil, 2017). De acordo com Braga e Feijó (2009), os preços dos óleos de copaíba oriundos de florestas manejadas e certificados pelo FSC, nos estados do Amapá e Acre foram, em 2009, respectivamente, R$ 32,00 e R$ 30,00.

Conforme considerado por Lima *et al*. (2011), é importante a adoção de algumas boas práticas no manejo do óleo de copaíba, como a utilização de um trado de ¾" de 1,20m de comprimento, cano de ½", 1,5m de mangueira transparente de ¾", vasilhames individuais (corote) de 20 e 50 litros de plástico, e uma lima triangular. As árvores devem ser selecionadas e furadas com o trado, que deve ser girado nos sentidos horário e anti-horário, até atingir o centro do tronco, não deve haver extração nas épocas de floração e frutificação, assim como em árvores que apresentem danos no tronco e/ou na copa, além disso, deve-se seguir um ciclo de extração que respeite um tempo mínimo de pausa de pelo menos três a quatro anos.

O oleorresina é um tipo de metabólito secundário e, segundo Raven, Evert e Eichhorn (2001), este tipo de substância é um lipídio, triglicerídeo terpenóide armazenador de energia, hidrofóbico e insolúvel, formado por três moléculas de ácidos graxos e uma de glicerol. O constituem os ácidos diterpenos e sesquiterpenos, resina e óleo essencial volátil, respectivamente (PIERI; MUSSI; MOREIRA, 2009). De acordo com Raven, Evert e Eichhorn (2001), os triglicerídios, além de terpenóides, também, podem ser alcalóides e substâncias fenólicas, mas essas irão constituir metabólitos secundários com outras características.

Com relação a biossíntese, Bastos (2013) confirmou que plantas jovens de *Copaifera multijuga* expressam os genes responsáveis pela produção de óleo, resina e hormônios, verificando que, o córtex é constituído por canais secretores (formados durante a instalação dos tecidos primários), células de parênquima (com paredes primárias espessadas de diferentes formatos e tamanhos), idioblastos (contendo cristais poliédricos de oxalato de cálcio), periciclo (constituído de fibras gelatinosas e esclereides), e o floema menos desenvolvido que o xilema. Além disso, por meio de testes histoquímicos, Bastos (2013) identificou substâncias lipídicas somente no lume dos canais secretores da casca e do xilema secundário, que possuiam como um dos componentes óleos essenciais, especialmente sesquiterpenos.

A relevância do oleorresina no mercado brasileiro tem uma estreita relação com o uso de plantas medicinais para a cura de enfermidades (ARAÚJO *et al*., 2018). A indústria química de oleaginosas utiliza muitos produtos amazônicos para a elaboração de cosméticos e medicamentos, mas, também, para conferir um *marketing* positivo para determinados empreendimentos (MORAIS; GUTJAHR, 2012).

Trindade, Silva e Setzer (2018) apresentaram uma revisão da fitoquímica e da farmacologia dos principais componentes dos óleos essenciais de 12 espécies de *Copaifera* (*C. cearenses, C. duckei, C. langsdorffii, C. lucens, C. martii, C. multijuga, C. officinalis, C. paupera, C. piresii, C. publflora, C. reticulata e C. trapezifolia*), demonstrando haver pelo menos 41 componentes: trans-β-bergamotene, trans-β-guaiene, I-β-farnesene, 3-acetoxycopalic acid, allo-aromadendrene, bicyclogermacrene, caryophyllene oxide, copalic acid, coumarin, cyclosativene, eremophilone, germacrene D, hardwickiic acid, humulene epoxide II, iso-spathulenol, kaur-16-en-19-oic acid, kaurene, kovalenic acid, methyl oleate, polyalthic acid, spathulenol, trans-α-bergamotene, zingiberene, α-cadinene, α-cadinol, α-copaene, α-cubebene, α-guaiene, α-himachalene, α-humulene, α-muurolol, α-selinene, β-bisabolene, β-caryophyllene, β-elemene, β-gurjunene, β-selinene, β-sesquiphellandrene, γ-muurolene, δ-cadinene e τ-muurolol.

Na Tabela 1 são apresentados os principais componentes já identificados (TRINDADE; SILVA; SETZER, 2018) para o oleorresina de copaíba, de acordo com diferentes espécies. O número de compostos não é igual para todas as espécies, mas sua constituição deve conter, cerca de, 72 sesquiterpenos/hidrocarbonetos e 28 diterpenos/ácidos carboxílicos (MORAES; GUTJAHR, 2012). Segundo Moreira (2018), isso é esperado, pois a composição pode variar entre espécies e de árvore para árvore. Há que se considerar, também, que *C. langsdorffii, C. multijuga* e *C. reticulata* são algumas das espécies mais estudas.

Tabela 1. Principais componentes dos óleos essenciais de espécies do gênero *Copaifera* L.

Espécie	Componentes	Número de componentes
C. cearensis	clorechinic acid, hardwickiic acid, α-copaene, β-bisabolol, β-caryophyllene, δ-cadinene	6
C. duckei	I-β-farnesene, hardwickiic acid, kaur-16-en-19-oic acid, polyalthic acid, trans-α-bergamotene, α-selinene, β-bisabolene, β-caryophyllene, β-elemene, β-selinene.	9
C. guianensis	trans-α-bergamotene, caryophyllene oxide, kaur-16-en-19-oic acid, polyalthic acid, hardwickiic acid,	5
C. langsdorffii	β-caryophyllene, bicyclogermacrene, caryophyllene oxide, copalic acid, coumarin, cyclosativene, eremophilone, germacrene D, hardwickiic acid, humulene epoxide II, iso-spathulenol, kaurene, kaurenoic acid, methyl oleate, spathulenol, trans-α-bergamotene, α-cadinol, α-copaene, α-himachalene, α-muurolol, β-elemene, β-selinene, γ-muurolene, δ-cadinene, τ-muurolol.	25
C. lucens	polyalthic acid, copalic acid.	2
C. martii	allo-aromadendrene, kaurenoic acid, zingiberene, α-copaene, β-bisabolene, β-elemene, δ-cadinene.	7
C. multijuga	copalic acid, trans-β-bergamotene, 3-acetoxycopalic acid, caryophyllene alcohol, germacrene D, trans-α-bergamotene, α-copaene, α-humulene, β-bisabolene, β-caryophyllene, β-gurjunene, β-sesquiphellandrene, δ-cadinene.	13
C. officinalis	allo-aromadendrene, germacrene B, trans-α-bergamotene, α-cadinene, α-humulene, β-bisabolene, β-caryophyllene, hardwickiic acid.	8
C. paupera	copalic acid, kaurenoic acid, zingiberene, α-copaene, α-cubebene, β-bisabolene, β-caryophyllene, δ-cadinene.	8
C. piresii	α-copaene, β-caryophyllene, δ-cadinene.	3
C. publflora	β-caryophyllene, α-humulene, β-selinene, α-selinene.	4
C. reticulata	trans-α-bergamotene, trans-β-guaiene, α-humulene, caryophyllene oxide, copalic acid, germacrene D, hardwickiic acid, kaurenoic acid, α-copaene, α-guaiene, α-humulene, α-selinene, β-bisabolene, β-caryophyllene, β-elemene, β-selinene.	16
C. trapezifolia	β-caryophyllene, α-humulene, germacrene D, spathulenol.	4

Fonte: Adaptado de Trindade, Silva e Setzer (2018).

Verifica-se que, o β-caryophyllene, ou β-cariofileno, é um componente que está presente nos oleorresinas, exceto em *C. guianensis*, *C. lucens* e *C. martii*. Trindade *et al*. (2018) afirmam que este é um hidrocarboneto sesquiterpênico e, de acordo com Galúcio *et al*. (2016, p. 800), "é um dos principais constituintes bioativos encontrados no óleo-resina de copaíba", representando 63,63% da composição, mais os diterpenos que totalizaram 36,38% (GALÚCIO *et al*., 2016). Além desses, também, ocorrem ácidos diterpênicos ou ésteres metílicos como: clerodane, kaurane, triterpenóides labdane, além de ácido copálico e ácido caurenóico.

Como exemplo de resultados de pesquisas obtidos ao longo dos anos, citam-se: os testes de amostras de oleorresinas de *C. multijuga* e de *C. reticulata*, quanto a atividade de redução da capacidade de percepção da dor em situações de emergência (*antinociceptive*), administradas

puras e por via oral, realizados por Gomes *et al*. (2007), para os quais foi constatado o desenvolvimento de atividades antinociceptivas periféricas e centrais.

Basile *et al*. (1988) estudaram a ação farmacológica do oleorresina de *Copaifera* sp. do Brasil puro, com relação à sua atividade anti-inflamatória, toxicidade e efeito, quando administrado por via oral em diferentes animais, constatando sua atividade anti-inflamatória. Santos *et al.* (2008) investigaram a ação farmacológica (atividade antileishmaniose) de óleos puros de oito espécies de copaíba (*C. reticulata, C. martii, C. cearensis, C, paupera, C. langsdorfii, officinalis, C. multijuga e C. lucens*), identificando que o óleo com maior ação contra protozoários do gênero *Leshimania* foi *C. reticulata*. Neste mesmo ano, outro resultado significativo foi obtido por Rosário *et al.* (2008), que verificaram a ação de xiloglucanos de armazenamento, obtido de sementes de *C. langsdorffii, Himenaea courbaril e Mucuna sloanei,* sobre a ação de macrófagos, obtendo resultados que confirmam a ação de xiloglucanos de sementes de *C. langsdorffii* como imunomoduladores.

De acordo com Valadas *et al*. (2019), o verniz dental composto com oleorresina de *C. langsdorffii* possui atividade antimicrobiana contra *Streptococcus mutans,* nas concentrações estudadas, sendo utilizado para a prevenção de cáries em crianças. Para Debone *et al*. (2019), o oleorresina de *Copaifera* sp. e quitosana, melhorou as propriedades mecânicas, químicas e de barreira, em filmes para curativos de ferimentos e queimaduras na pele, formando um filme mais resistente, melhorando as propriedades de barreira e proporcionando ação hidrofóbica.

Resultados positivos também têm sido observados como alternativa para o tratamento de câncer. Senedese *et al.* (2015) identificaram a capacidade de proteção contra a carcinogênese do cólon (quimioprevenção), utilizando o oleorresina puro de *C. reticulata,* em lesões de criptas aberrantes (ACF) em ratos, efeito do resíduo do óleo -1,2 dimetil-hidrazina (DMH). Andreassi *et al.* (2017) estudaram a ação farmacológica do oleorresina de *C. langsdorffii* (puro) e de *Eugenia caryophyllata* (óleo essencial), realizaram a caracterização química e verificaram a ação antioxidante de proteção das células HaCat, *in vitro,* contra danos causados pela radiação UV.

Enquanto Silva *et al.* (2017) identificaram derivados de compostos isolados de diterpenos (ácido copálico, ác. 3β-acetoxicopálico, ác. 3β-hidroxi-copálico e ác. ent-agático) do oleorresina de *C. langsdorffii,* que foram submetidos a modificações estruturais, e obtiveram resultados positivos para dois derivados ativos com capacidade comparável à dois medicamentos (estreptomicina e pirazinamida), usados em testes *in vitro* contra *Mycobacterium turbeculosis,* para o tratamento de tuberculose.

Algumas pesquisas avaliaram a segurança da utilização do oleorresina como medicamentos. Lima *et al.* (2011) avaliaram os efeitos do oleorresina, veiculado na forma de I, sobre o desempenho reprodutivo de ratas, concluindo que a formulação contendo 2,5% de oleorresina de copaíba é seguro durante a gestação das ratas. Outro exemplo é o trabalho de Furtado *et al*. (2018) que analisaram a citotoxidade e genotoxidade de oleorresinas (puro e extratos de folhas) de espécies de copaíba (*C. duckei, C. multijuga, C. paupera, C. pubiflora, C. reticulata, C. trapezifolia)* e constataram que para o uso humano os oleorresinas e extratos das folhas são considerados seguros nas faixas de concentração avaliadas.

Buscas pelo termo "*Copaifera*" na Plataforma *ScienceDirect* indicaram a existência de 133 trabalhos científicos específicos (artigo revisão, de pesquisa e comunicação curta)

produzidos entre 2011 e 2021, representando uma média de 12,09 pesquisas publicadas anualmente (*ScenceDirect*®, 2021). Este é um exemplo da produção I de *papers* científicos, pois existem muitas outras plataformas de comunicação científica, além de comunicações realizadas por meio da publicação em eventos científicos nacionais e internacionais. Na Figura 2, são apresentadas as principais categorias e sua incidência por ano. Além destes, inúmeros outros trabalhos, abordaram questões relacionadas à copaíba, porém não como o objeto principal. Foram, também, encontrados dois trabalhos com foco em Anatomia (2011 e 2019) e um em Fitopatologia (2012).

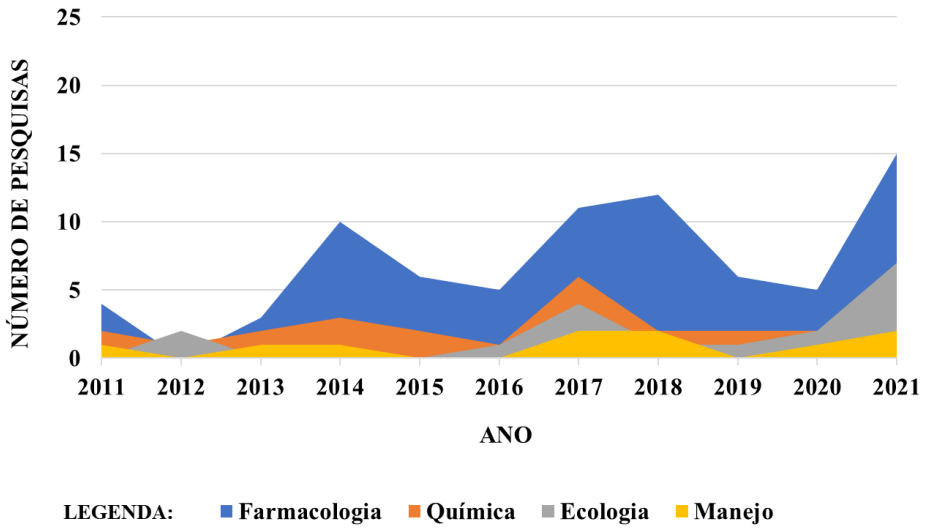


Figura 2. Número de publicações científicas sobre *Copaifera* spp., por categoria, disponíveis na plataforma indexadora *ScienceDirect*, produzidos entre 2011 e 2021. Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Entretanto, o potencial do óleo de copaíba extrapola o campo medicinal e farmacológico. Chen *et al.* (2009) chamaram *C. officinalis de "*a árvore do diesel", devido aos hidrocarbonetos sesquiterpênicos do oleorresina e seu potencial como bioenergia, pois foram detectados terpenóides na maioria dos órgãos da planta. Substâncias oleaginosas extraídas de partes de vegetais, ou biomassa, têm origem renovável e substancial potencial energético, embora benefícios ambientais favoráveis dependam de sistemas modernos e eficientes (PAZ, 2013). Além disso, para Koçar e Civaş (2013) e Koçar (2017), as oleaginosas não comestíveis (incluindo a copaíba) podem ser refinadas e convertidas em biodiesel, um combustível difundido na matriz energética mundial, com expectativa de maior crescimento, devido aos altos preços da energia obtida dos combustíveis fósseis e de uma maior consciência ambiental. A expectativa é que novas safras energéticas promissoras, utilizando esses outros tipos de biomassa, serão usadas no futuro (KOÇAR; CIVAŞ, 2013).

2.3 Tecnologias com potencial para a prospecção de reservatórios de oleorresina

Métodos de avaliação de estruturas e materiais inspiram novas aplicações e, se associadas a técnicas modernas, constantemente resultam em tecnologias que aprofundam o estudo das árvores, e nesse caso, em especial das copaíbas. Com as inovações desenvolvidas ao longo do tempo, novas tecnologias são cada vez mais empregadas no setor florestal e os métodos não destrutivos (MND) de análises, têm uma importância significativa nesse contexto.

A seguir são apresentados MND que são comumente utilizados para a avaliação da qualidade da madeira e na compreensão da estrutura e do funcionamento de árvores vivas, imprescindíveis para a concretização da prospecção tecnológica de reservatórios de oleorresina.

2.3.1. Propagação acústica

Técnicas de propagação de ondas de tensão são utilizadas em pesquisas relacionadas à madeira, tanto com o objetivo de determinar diferentes propriedades (ZIMMER; COST, 1970; BUCUR; ARCHER, 1984; BUCUR, 1985 *Apud* BUCUR, 2006; FRANÇOIS, 1995; KEUNECKE *et al.*, 2007; GONÇALVES *et al*., 2011; OZYHAR *et al*., 2013), quanto com o propósito de inspeção. No caso da inspeção, têm sido estudadas para aplicações em objetos, estruturas de madeira e em árvores, florestais e urbanas (TSEHAYE *et al*., 2000ª e b; WANG *et al*., 2004; GRABIANOWSKI *et al*., 2006; WALKER, 2006; GONÇALVES *et al*., 2011; WEHRHAUSEN *et al*. 2012; SECCO *et al*., 2012).

Perlin *et al.* (2015) apresentam os fundamentos matemáticos da tomografia acústica (TA), a Transformada de Radon – desenvolvida no início do século XX, que explicaram o processo de discretização do pulso ultrassônico, em diferentes tamanhos e localizações das trajetórias percorridas pela onda elástica. Arciniegas *et al*. (2014) esclarecem que, a utilização de ondas elásticas na gama de baixa frequência (tomografia acústica) ou na gama de alta-frequência (tomografia por ultrassons) é uma alternativa ao uso de ondas eletromagnéticas, e citam artigos que demonstraram bom equilíbrio entre precisão, invasão e facilidade de uso. De acordo com Bucur (2006), a frequência dos sinais da emissão acústica é de banda larga (kHz a MHz), entre 100 kHz e 1 MHz, e possui alta sensibilidade em torno de 500 kHz. A autora cita experimentos que empregaram diferentes faixas de frequência de ondas (20 KHz, 60 kHz, 150 kHz, 300 kHz e outras).

Consta que, o resultado da leitura e do registro das reações resultantes do estímulo de sensores gera uma representação gráfica (2D ou 3D) da velocidade de propagação das ondas (V), que é obtida por interpolação dada por um algoritmo, e que representa boa equivalência com as características físicas da madeira (PEREIRA *et al*., 2007; CASTRO, 2011; PERLIN *et al*., 2015), revelando padrões que resultam da combinação entre vários fatores, dentre os quais: densidade, módulo de elasticidade, umidade e anisotropia.

Conforme Arciniegas *et al*. (2014), é o trajeto percorrido pela onda de som, que pode ser prolongado dependendo da presença de defeitos internos ou heterogeneidades, e não a frequência que determina a velocidade do som, sendo esse o princípio dos métodos acústicos.

A velocidade de propagação pode ser calculada conforme a equação (V = L / t) indicada por Secco (2011) em que, V é a velocidade de propagação da onda, L é o comprimento do

percurso e t é o tempo de propagação. Palma *et al.* (2018) adotam as seguintes unidades: V em metros por segundo ($m.s^{-1}$), L em centímetros ou milímetros (cm e mm) e t em microssegundos (μs).

A TA é indicada, pela norma brasileira ABNT NBR 16246-3/2019, para avaliação do risco de queda de árvores urbanas, visando a verificação de aspectos da integridade estrutural, do nível de risco para terceiros, para propriedades e serviços públicos, e para prevenção de acidentes devido à queda das árvores ou de suas partes (ABNT, 2019).

Nesta categoria de MND, ultrassom e a tomografia de impulso (ondas mecânicas) são as técnicas mais difundidas, mas, embora funcionem com base em princípios semelhantes, guardam algumas particularidades. Sobre tais técnicas, Arciniegas *et al*. (2014) citaram pesquisas que indicam diferentes modos de geração de sinal (onda), por exemplo: martelo, martelo instrumentado, impulso ultrassônico, banda larga, banda estreita e onda quadrada.

Ultrassom e tomografia de impulso

O ultrassom é um aparelho que produz pulsos elétricos (impulso ultrassônico) que são conduzidos através de cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas, por cristais piezelétricos, que se localizam em dois transdutores, em que um emite o sinal e o outro capta, amplia e o envia novamente, sendo captado na forma de informações de tempo e distância, com as quais é calculada a velocidade de propagação (CALEGARI, 2006).

A tomografia ultrassônica é considerada uma técnica com grande potencial para detecção de espaços vazios e sua localização, a depender do número de sensores, mas a dimensão e a natureza da não homogeneidade afeta o resultado das leituras tomográficas, assim, a anisotropia e a higroscopicidade da madeira devem ser consideradas (PERLIN *et al*., 2015).

O primeiro ensaio de propagação acústica através de oleorresina puro indicou uma velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (VmPU) de 1422,75 m/s (MARTINS; ALVES; SANTOS, 2018) e, em associação com madeira de copaíba em diferentes condições {(madeira + cavidade) e (madeira + cavidade + oleorresina)}, com cavidades (reservatórios artificiais) de diferentes dimensões (32 mm, 44 mm e 64 mm de diâmetro), em comparação a VmPU na madeira íntegra, inferior (1293,82 m/s), as VmPU das cavidades de 44 mm, com e sem oleorresina, foram as mais baixas, apresentando redução da ordem de 18,9% e 22,6%, respectivamente (NASCIMENTO *et al*., 2020).

O princípio da tomografia de impulso (Figura 3) é a propagação de ondas mecânicas de tensão provocadas a partir de choques promovidos com a utilização de martelo (CARRASCO *et al.*, 2017). Com esse método é possível a visualização imediata da expectativa da condição interna do fuste, e seu uso se justifica por possibilitar avaliar árvores *in situ* com agilidade (CASTRO, 2011).

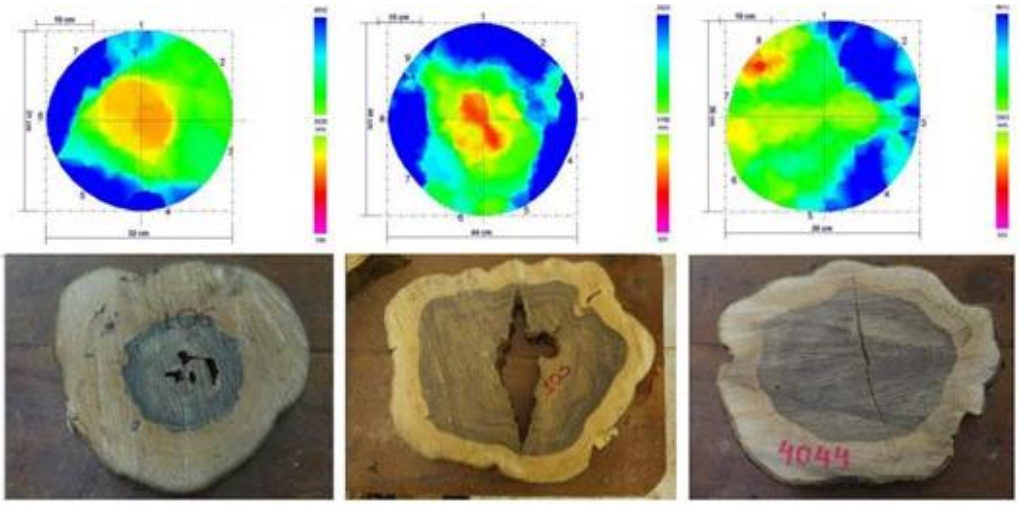


Figura 3. Tomogramas obtidos por meio de tomografia de impulso e respectivos cortes transversais de troncos de *Micrandopsis scleroxylon* W. Rodr. Fonte: Adaptado de MEDEIROS *et al*., (2017).

Também, nesta técnica, a detecção de descontinuidade do material (oco) e "anomalias" no tronco das árvores se dá em função da redução da velocidade de propagação da onda mecânica, uma vez que essa, aparentemente, se propaga por um caminho que se desvia da área descontínua, e mesmo no caso de deteriorações (sem a comparência de oco), como por exemplo, ocasionadas por fungos, a velocidade de propagação acústica é afetada, pois, ao passar por materiais de diferentes impedâncias acústicas a onda experimenta desvios o que, como consequência, reduz a velocidade (SECCO *et al*., 2012).

Laser acústico

A técnica do *laser* acústico, chamada de "*An innovative tomographic technique integrated",* combina o uso da onda mecânica da tomografia de impulso (instrumento de tomografia sônica PiCUS, com 12 sensores de onda de estresse), que excita e faz vibrar o material, e da onda eletromagnética, das quais se medem os sinais de vibração. Ressalta-se que, a vibração é intensificada quando a rigidez à flexão é menor em determinada região do material, ou quando defeitos críticos associados à falha na flexão são observados (QIU *et al*., 2019). Nesta pesquisa, inspecionaram o tronco de uma árvore usando *stress wave* e *laser* acústico (Figura 4ª) para avaliar os defeitos internos, almejando uma detecção precisa e confiável, inclusive de orifícios com diâmetro de 50 mm e cavidades próximas à superfície com 5 a 20 mm de profundidade. De acordo com esses autores, o método apresentou uma detecção de defeitos mais eficaz e confiável do que a tradicional tomografia acústica.

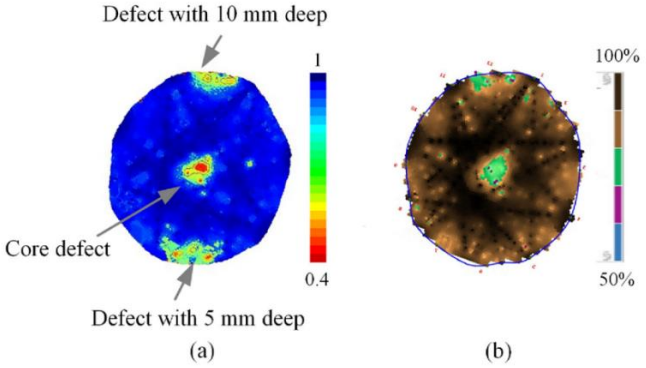


Figura 4. Exemplo de tomograma obtido por técnica que utiliza *stress wave* e *laser* acústico (a) e por ultrassom (b) (QIU *et al*., 2019).

2.3.2 Propagação de ondas eletromagnéticas

Pavia *et al*. (2015) abordam diversos métodos espectroscópicos, apresentando conceitos teóricos e ferramentas para interpretação de espectros, que ajudam a responder a diversos questionamentos sobre características de diferentes tipos de materiais. Silverstein, Webster e Kiemle (2015), por sua vez, detalharam os procedimentos e particularidades da identificação espectrométrica de compostos orgânicos. De acordo com Nascimento (2016, p. 12):

> "Espectroscopia é o estudo da interação entre a radiação eletromagnética (EM) e a matéria, em função do comprimento de onda (λ). A REM pode ser vista como a transmissão de energia na forma de ondas, com uma componente elétrica e uma magnética, perpendiculares entre si e à sua direção de propagação".

O comprimento de onda é inversamente relacionado à frequência (ν), isto é, ondas cujo comprimento de onda é longo apresentam baixa frequência, e com comprimento de onda curto apresentam alta frequência (MALAINEY, 2011; TODESCATTO, 2016).

De modo simplificado, "o espectro eletromagnético é um gráfico que mostra a sequência das ondas eletromagnéticas de acordo com sua frequência e comprimento de ondas" (TODESCATTO, 2016, p. 43), e engloba faixas de frequência (ondas) de diversos tipos, sendo esses distinguíveis em função do valor de frequência e do modo como são produzidas, além disso, no sentido da esquerda para a direita (frequência baixa → frequência alta), se encontram as ondas de rádio, microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios-X e raio gama (REIS; DICKMAN, 2019).

Essas distintas frequências de REM, que representam diferentes regiões no espectro, interagem de modos distintos com a matéria (NASCIMENTO, 2016). A REM que é absorvida ou emitida fornece informações sobre a composição elementar, configuração molecular ou outras características sobre uma determinada amostra (MALAINEY, 2011).

Radar de penetração no solo

O Radar de penetração no solo, ou *Ground penetration radar* (GPR), é um tipo de tomografia que emprega a propagação de ondas eletromagnéticas através de um objeto para, assim, inspecionar seu interior. Essas ondas são propagadas por meio de um sistema constituído de pares de antenas, em que uma é transmissora e a outra é receptora (JEŽOVÁ *et al*., 2016). Conforme Lorenzo *et al*. (2010, p. 6), o radar terrestre ou GPR "é um método de sensoriamento remoto e prospecção geofísica baseado na emissão de muitos pulsos eletromagnéticos de domínio de curto tempo (1-20 ns) e bandas de radar de frequência inferior (variando de 25 MHz a 2,5 GHz)".

Del Sole *et al*. (2020) compartilharam sua pesquisa de prospecção de reservatórios em arenitos porosos, nos quais bandas de deformação e nódulos conferem anisotropia à rocha hospedeira, subsistindo outros aspectos como permeabilidade, anisotropia, espessura, geometria, conectividade física e disposição na subsuperfície, que se concomitantes afetam as imagens 2D de GPR. Seus resultados incluem um recurso de grande importância que é a possibilidade de projetar um "análogo de reservatório melhorado" obtido com a integração dos dados baseados em afloramento e GPR (DEL SOLE *et al*., 2020).

No campo da Tecnologia Florestal, o GPR foi testado, com sucesso, por Li *et al*. (2018), para estimar a estrutura interna de troncos de árvores e determinar a posição, forma e tamanho de "alvos" internos, representados por imagens 3D (Figura 5). Os autores supramencionados constataram ser esse um método rápido, eficiente e não invasivo. Este resultado foi possível devido ao fenômeno de reflexão da onda eletromagnética, que se propaga dentro do tronco da árvore, ao interagir com a junção de camadas estruturais normais ou cavidades, decadência e outros defeitos (LI *et al*., 2018).

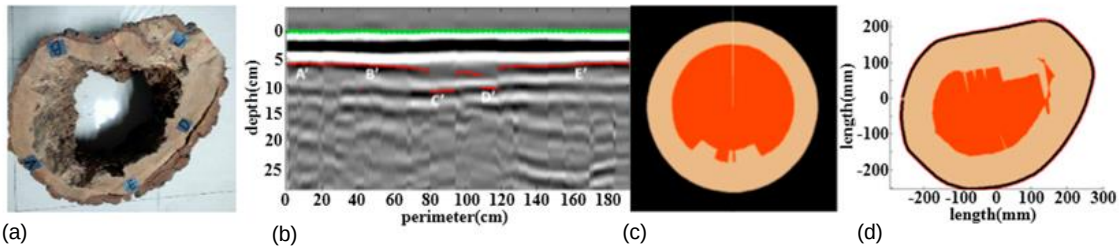


Figura 5. Exemplo de tomografia feita por Radar de penetração no solo: (a) amostra original, (b) dados de varredura do defeito (linha vermelha), (c) resultados do *TreeWin* e da (d) rotina de análise imagens reconstruídas por algoritmos (LI *et al*., 2018).

Ježová *et al*. (2016) investigaram o que chamaram de particularidades do GPR na inspeção de troncos de árvores, uma atividade que consideraram ser complexa devido aos inúmeros fatores que podem afetá-la como: forma circular do tronco, anisotropia, variação do teor de água, densidade, temperatura e a resposta das ondas eletromagnéticas às propriedades da madeira. A dificuldade percebida neste método se assemelha à tomografia acústica, na medida em que, para Ježová *et al*. (2016), nem sempre são perceptíveis contrastes dielétricos entre a madeira sadia e a acometida por alguma deterioração, além dos limites da resolução da

imagem gerada pelo GPR, a limitada capacidade de penetração das ondas no interior de troncos com diâmetro superiores a 1m e a necessidade de utilização de um "escudo" metálico para detecção da borda oposta.

Ressonância Magnética Nuclear

Ressonância Magnética Nuclear (RMN), ou *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR), é uma técnica espectroscópica empregada em inúmeras aplicações, relacionadas a pesquisas nas áreas da Química, Química Orgânica, Química Ambiental, Biologia, Medicina, Indústria Petrolífera, Indústria Alimentícia entre outras (NASCIMENTO, 2016; BRUKER, 2020), que fornece informações sobre as propriedades físicas de amostras vivas e não vivas, bem como, orgânicas ou não, de modo não destrutivo, por meio de imagens multidimensionais que podem ser interpretadas para que se possa compreender o funcionamento de processos que ocorrem em condição oculta, como processos fisiológicos, fluxos, temperatura e outros (BRUKER, 2020).

Há décadas, pesquisas com RMN vêm sendo desenvolvidas visando aperfeiçoar a aplicação desta tecnologia para aprofundar o conhecimento da dinâmica funcional dos vegetais.

Esse é um tipo de espectroscopia de absorção na faixa da radiofrequência, associada a um campo magnético externo, que possibilita a absorção por determinados núcleos de determinados elementos, sendo o espectro resultante um registro gráfico das frequências e da intensidade da absorção (HAGE; IWASAKI, 2009; SILVERSTEIN; WEBSTER; KIEMLE, 2015).

Song (2013) destacou a importância da RMN, associada à análise de imagens, para o estudo da microestrutura de meios porosos em escalas de milímetro (mm) a micrômetro (μm), porque o fluido de preenchimento de poros, geralmente, exibe um forte sinal de ressonância que permite a detecção através do *spin* de relaxação do fluido, difusão, fluxo e experimentos de imagem. Também, os tecidos biológicos apresentam estruturas complexas e aspectos semelhantes aos meios porosos inorgânicos, além disso, no caso de estrutura anisotrópica, a difusão das moléculas refletirá essa simetria de confinamento (SONG, 2013).

Esse tipo de RMN é denominado por Nascimento (2016) como Imagem por Ressonância Magnética (IRM). Hage e Iwasaki (2009) apresentaram de modo conciso as bases físicas desta modalidade de diagnóstico, por considerarem que são conhecimentos fundamentais para a interpretação das imagens. Além disso, os autores ressaltaram se tratar de um método não-invasivo.

Os diagnósticos por imagens de difusão, permitem o mapeamento do movimento dos prótons, em função da velocidade com que esses se movem (FUKUMORI, 2019). Nagata *et al*. (2016, p.132) desenvolveram um sistema de RMN, capaz de demonstrar as mudanças no transporte de água e outros processos fisiológicos no caule de árvores de *Zelkova serrata in situ*, de modo não destrutivo, por meio de imagens transversais bidimensionais geradas a partir de RMN (Figura 6), sendo possível "visualizar as estruturas anatômicas e os anéis de crescimento" dessa espécie, que apresenta porosidade em anel como característica anatômica". Benavides *et al*. (2017, 2019) formularam um método que utiliza a função de relaxividade de

superfície e imagem (Figura 7) para determinar com precisão a distribuição e o tamanho de poros, visando melhorar as predições de porosidade de material petrofísico.

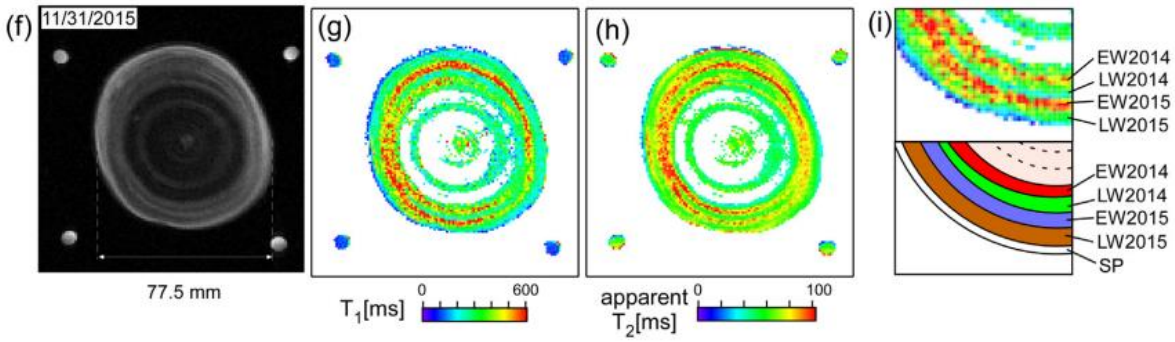


Figura 6. Imagens de RMN da árvore em crescimento, esquema das estruturas anel-porosas de madeiras precoces, tardias e do floema secundário (NAGATA *et al*., 2016).

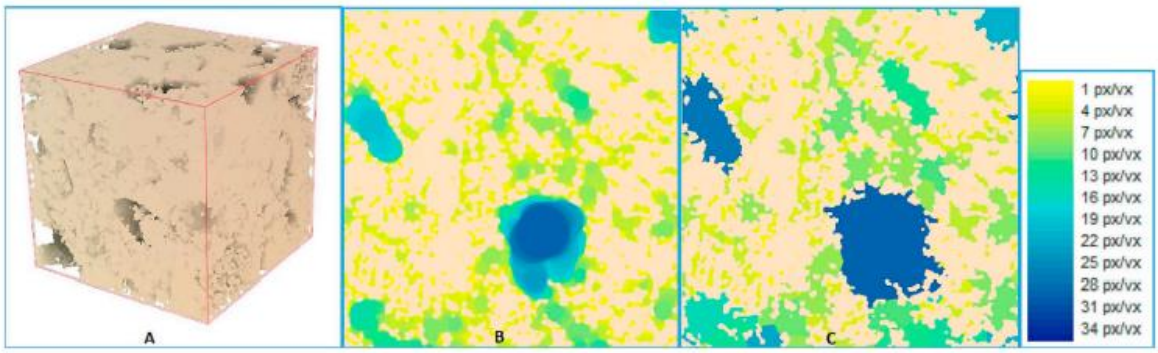


Figura 7. Representação digital 3D da amostra de rocha *Desert Pink* (uma formação carbonática com dimensão 0,4×0,4×0,444) (microtomografia de raios-X), e duas camadas (B e C) do processo de segmentação do espaço de poro (BENAVIDES *et al*., 2019).

Outra pesquisa recente, realizada por Pierri *et al*. (2022), empregou RMN de baixo campo, com base no decaimento devido à difusão no campo magnético interno (NMR-DDIF), para determinar a distribuição do tamanho dos poros de *biochars* (agroresíduos da palha de cana-de-açúcar, casca de arroz, esterco de aves e serragem), sintetizados em diferentes temperaturas de pirólise, e a área de superfície específica, para avaliar o potencial de retenção de herbicidas altamente móveis, que contaminam os recursos hídricos ao redor das plantações de cana-de-açúcar, concluindo que o método é eficiente para se ter conhecimento sobre a distribuição do tamanho dos poros. Esse tipo de pesquisa indica que a RMN pode ser utilizada mesmo sem a expectativa de se trabalhar com imagens tomográficas. Resultados de relaxometria, especialmente, relacionados relaxação transversal *spin-spin* (T2), mais fraca ou mais forte, permitiriam determinar a localização (organelas, canais resiníferos, espaços intercelulares, reservatórios), variação de deslocamento ao longo do tempo (idade e período do dia, etc), a viscosidade e outras características físico-químicas.

Como exemplo de uso de RMN em estudos da madeira, cita-se o trabalho de Hachem *et al*. (2020), que acompanharam evolução de diferentes estados de água (livre, ligado e constitutivo), durante o ciclo de sorção, em função do tempo. De acordo com os autores, nas condições experimentais utilizadas, o sinal proveniente dos constituintes químicos da madeira não é detectado. Além de, Kanazawa *et al*. (2017) que verificaram o grau de impregnação de amostras de madeira alagadas e tratadas com várias técnicas de impregnação, com diferentes concentrações de soluções de trealose. Com isso, os autores concluíram que, o tempo de relaxação T1 fornece informações mais detalhadas, de forma não invasiva, sobre o estado de tratamento de impregnação da madeira alagada, do que a inclinação da curva de concentração de T2, que apresenta uma ligeira mudança, quando comparadas as áreas interna e externa.

No caso da prospecção de reservatórios de oleorresina, vislumbra-se no médio prazo a realização de experimentos utilizando-se plantas jovens, a fim de acompanhar os processos fisiológicos de fluxo de oleorresina, pois a realização deste tipo de verificação em árvores vivas ainda é limitada a um diâmetro de fuste reduzido.

Espectroscopia no infravermelho próximo

A Espectroscopia no infravermelho próximo, ou *Near infrared spectroscopy* (NIR), é sustentada por princípios identificados desde 1800 por Frederick William Herschel, que permitem estimar e classificar propriedades físicas e mecânicas da madeira como densidade básica (Db), composição química, teor de α-celulose, grau de cristalinidade da celulose, comprimento das traqueoides axiais, módulo de elasticidade (MoE), comprimento de fibra e ângulo microfibrilar, densidade aparente, coarseness e teor de lignina (MUÑIZ *et al*., 2012), características importantes para conhecimento do potencial acústico da madeira.

Este é um método rápido e tem base na espectroscopia vibracional, que mede a interação entre a luz e o material, gerando espectros, de modo a prever um grande número de características de qualidade da madeira (HEIN *et al*., 2017). Como são empregadas ferramentas, estatísticas, matemáticas e computacionais para aprofundar análise dos espectros, pode ser chamado genericamente de Quimiometria (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015).

De acordo com Ramalho *et al*. (2017), a NIR é capaz de caracterizar qualquer material biológico, incluindo a madeira e seus derivados, por meio de uma análise rápida e não destrutiva, que reduz a necessidade de preparação de amostras especiais. Tsuchikawa e Kobori (2015) sustentam que esse método é útil para materiais com alto teor de umidade como madeira, tanto de sua composição química, quanto densidade, características anatômicas, propriedades mecânicas, estados de degradação e outras, embora seja importante conhecer suas limitações. As alterações na morfologia ou nas características físico-químicas da amostra, ou a combinação delas, afetam consideravelmente a forma dos espectros de NIR (TSUCHIKAWA; SCHUWANNINGER, 2013).

No trabalho de investigação do "Estado da Arte" sobre os MND, Muñiz *et al.* (2012) concluíram que pesquisas com NIR, até então, vinham alcançando altas correlações, sendo desse modo possível empregar o método para se obter informações qualitativas e quantitativas dos constituintes químicos, por meio da interação da onda eletromagnética do infravermelho próximo (espectro de comprimento de onda 750 a 2.500 nm) com a amostra, cujos resultados

precisam ser correlacionados aos resultados de análises laboratoriais convencionais. Depois disso, é possível obter uma resposta muito rápida no controle da qualidade dos produtos.

A determinação do conteúdo dos componentes químicos, das propriedades físico-químicas e mecânicas das amostras, com base nos espectros, é feita com a aplicação de métodos estatísticos multivariados e pode ser realizado sem o conhecimento prévio sobre a química e estrutura da amostra, desde que haja o conhecimento dos grupos funcionais que absorvem nos comprimentos de onda (SCHWANNINGER *et al*., 2011). O desafio é compreender toda a informação química contida em um espectro, por meio de inspeção visual e estatística, e observar se há valores atípicos importantes. É necessário o processamento computadorizado dos espectros para obter a resolução capaz de localizar os máximos das bandas de absorção.

A NIR é uma ferramenta que fornece resultados satisfatórios em muitas análises, sua utilização em pesquisas envolvendo a prospecção de oleorresina de copaíba se aplicaria à varredura espectral de núcleos de incremento obtidos do tronco de árvores de diferentes tamanhos, de modo a se verificar alguma variação que indique a presença da substância, distribuída desde a casca até a medula do tronco. Entretanto, esse método não se baseia na geração de imagens do tronco, mas é possível chegar à calibração de modelos preditivos que forneçam informações para compor o conjunto de variáveis (*logs*) necessário para o aperfeiçoamento do método de prospecção.

A possibilidade de utilizar NIR para pesquisas com copaíba se deve ao fato de que é possível produzir modelos relacionados à variabilidade, herança, controle genético e ambiental e as implicações destes fatores com outras propriedades das árvores, desde que se consiga realizar uma boa calibração baseada em NIR (HEIN *et al*., 2017). Além disso, é possível determinar propriedades, como a densidade básica e o teor de umidade, por meio de um sistema de imagem hiperespectral no infravermelho próximo, em que comprimentos de onda específicos podem ser identificados em imagens para destacar as características da madeira, conforme foi verificado por Mora *et al*. (2011).

Microdensitometria de raios-X

O método da Microdensitometria de raios-X (Densitometria de raios-X) consiste na digitalização de amostras de madeira, obtidas de modo destrutivo ou não destrutivo invasivo (com o auxílio de trado), que são cortadas em delgadas fatias de, aproximadamente, 2,5 mm de espessura, e, inspecionadas em toda sua extensão, gerando assim, um perfil de densidade em intervalos predefinidos.

De acordo com Jacquin *et al*. (2017), a densidade é uma característica que reflete a qualidade da madeira, de outros materiais e atributos, sendo muito útil para estudos de dendrocronologia e climatologia, pois com a microdensitometria é possível conhecer a variação radial da densidade no período anual ou intra-anual. Os equipamentos de microdensitometria (densitômetros) mais empregados para a análise da madeira se baseiam em radiografia de raios-X e fornecem resultados precisos.

Junior *et al*. (2019) avaliaram o potencial de três MND para caracterizar a biodeterioração da madeira em escala celular, dentre esses a densitometria de raios-X foi utilizada para determinar as alterações na microdensidade do material em resposta à ação de

fungos, que deterioram a estrutura anatômica levando a redução substancial da densidade, com a translocação de íons Fe e Mn. Os referidos autores indicaram a utilização conjunta das técnicas de microscopia de luz, microdensitometria de raios-X e fluorescência de raios-X para detectar a incidência de infecções fúngicas.

Os perfis de densidade obtidos a partir de imagens de raios-X podem ser úteis em análises de dendrocronologia, conforme afirmaram Campelo *et al.* (2019), ao desenvolverem um pacote analítico em linguagem R (x*Ring*) com funções para calibrar e medir perfis de microdensidade com maior facilidade. Para Mason, Hayes e Pink (2017), também, a difratometria de raios-X *Silviscan* produz resultados que conservam correlação com os resultados da varredura ultrassônica, o que é uma vantagem, pois após a calibração entre os dois métodos é possível utilizar a varredura ultrassônica, que é potencialmente muito mais barata.

Dendrocronologia

Para profundar o conhecimento sobre as árvores, é importante, também, a inclusão da dendrocronologia no conjunto de práticas importantes, pois é um tipo de estudo focado nos anéis anuais de crescimento das árvores, que utiliza como instrumento a análise e a comparação do desenvolvimento arbóreo anual com a variação climática (ROIG, 2000). É importante destacar que, estudos de dendrocronologia ampliam a capacidade de investigação de muitas características, podendo ser de muita utilidade para a prospecção de reservatórios de oleorresina.

Magalhães (1985, p. 336) esclareceu que, "a análise do crescimento se destina à avaliação da produção líquida das plantas, derivada do processo fotossintético, e é o resultado do desempenho do sistema assimilatório durante um certo período de tempo".

O estudo dendrocronológico segue um protocolo de procedimentos, que envolve a caracterização e a datação de eventos que afetam a atividade do câmbio vascular anualmente. Os tecidos vegetais estão sujeitos a sofrerem injúrias biológicas, químicas e/ou físicas, o registro dessas injúrias, e as mudanças anatômicas nas camadas anuais do lenho, permite a detecção de mudanças ambientais, isso mediante a comparação das dinâmicas apresentadas pelos incrementos anuais de vários indivíduos de uma mesma população.

Os métodos empregados envolvem a caracterização da anatomia ecológica e a interpretação sazonal de parâmetros micro e macroclimáticos, bem como, a interação com outros fatores bióticos ou abióticos, sendo útil para estudos ecológicos.

Medeiros *et al*. (2018) consideram que, existe uma lacuna de conhecimento relacionado a estudo dendrocronológico de *Copaifera*, e analisaram curvas de crescimento radial de árvores de *Copaifera multijuga*, verificando que, árvores com mais de 100 anos apresentaram redução considerável da quantidade de óleo ou não produziram nada nos últimos anos, provavelmente devido à senescência. Neste estudo, os autores observaram que, árvores de primeira colheita tinham entre 43 e 112 anos, mas os maiores volumes foram produzidos por árvores com mais de 70 anos. Carmo (2016) constatou o potencial da espécie *Copaifera langsdorffii* para estudos dendrocronológicos, devido a existência de correlação significativa da largura dos anéis dentro e entre árvores.

2.3.3. Redes Neurais Artificiais

Há um entendimento geral de que a civilização logrou uma revolução na maneira de se analisar dados e resolver questões das mais variadas áreas do conhecimento. Haykin (2001) explica que, com a chamada inteligência artificial (IA) é possível armazenar grande quantidade de dados, gerar conhecimento e 47ocioe-lo para resolver problemas, em uma sequência que envolve a representação, o raciocínio e a aprendizagem.

Com a evolução da IA, algoritmos de *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) e técnicas de *Deep Learning* (Aprendizado Profundo) possibilitaram o reconhecimento de padrões a partir de dados não categorizados, treinamentos de aprendizagem por reforço, aprendizagem não supervisionada e aprendizagem supervisionada, sendo esta última voltada para processos de classificação de imagens, de modo a facilitar diversos tipos de diagnósticos, bem como, detectar fraudes, estabelecer previsões acerca de fenômenos diversos, otimização de processos e indicação de novas percepções e conhecimentos (PACHECO; PEREIRA, 2018).

Como exemplo de iniciativa de pesquisa no campo de *Machine Learning*, na Tecnologia Florestal, De Andrade *et al.* (2019) propuseram um método importante para a fiscalização de produtos madeireiros e detecção de fraudes de identificação, que foi considerado robusto, devido à 97,9% de precisão para classificação por origem (espécies nativas e eucalipto) e 95% de precisão para a classificação por espécie (17 espécies e híbridos do gênero *Eucalyptus* e espécies florestais nativas da Zona da Mata Mineira e a Mata Atlântica) para classificar amostras de carvão em função da análise da textura da imagem, mesmo existindo certa distorção dos dados anatômicos devido ao processo de carbonização quando comparada a madeira *in natura*. Além disso, De Andrade, Basso e Latorraca (2020) propuseram a utilização de um sistema inteligente capaz de identificar espécies florestais, automaticamente no campo, utilizando-se amostras de madeiras e um modelo com acurácia de 97,7%, cujos classificadores foram construídos usando *support vector machines* (SVM).

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são ferramentas da IA. Estas são formulações de modelos que formam um sistema complexo, que processa informações tal qual o cérebro humano, que organiza suas próprias regras a partir da experiência (treino), adaptando-se e tornando-se mais estável e mais robusta a representação de padrões particulares (SILVA *et al.*, 2016).

Assim, como no cérebro humano, as RNA possuem neurônios como constituintes estruturais básicos (HAYKIN, 2001). São sistemas computacionais de camadas paralelas, constituídos de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si, de modo a executar uma determinada tarefa (BINOTI, 2012). Esses "neurônios" são modelos matemáticos inspirados no funcionamento dos neurônios biológicos, que processam as informações recebidas, ponderam-nas por pesos sinápticos e fornecem uma ou mais respostas (BRAGA *et al*., 2007). Para Silva *et al*. (2016, p.86) os neurônios artificiais são "uma função que mapeia entradas e saídas" e podem ser organizados em dois tipos principais de arranjo: *Perceptron* e *Multilayer Perceptron*.

O setor florestal tem inovado ao aplicar RNA para estimação da altura de árvores em povoamentos florestais (BINOTI *et al*., 2013), de mudas de espécies arbóreas (FERREIRA *et al*., 2014) e, também, do volume de madeira (BINOTI *et al*., 2014). Também, é possível a

predição de características da madeira propriamente, como a predição do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) de madeiras tratadas termicamente, realizada por Tiryakia e Hamzaçebi (2014). Ou, como o realizado por Miguel *et al.* (2018), que usaram RNA *Multilayer Perceptron* para estimar a resistência da madeira, a partir das variáveis densidade, velocidade de propagação de ondas e módulo dinâmico de elasticidade. Ou, ainda, como De Azevedo *et al.* (2020) que testaram modelos de regressão e RNA para realizar a modelagem multivolume de árvores de eucalipto, concluindo que para esse fim as RNA são mais adequadas, por serem mais precisas e práticas.

No entanto, pesquisas dedicadas aos PFNMs, que utilizem RNA, não são exatamente triviais, mas já começam a ser desenvolvidos trabalhos como o de Andrade, Roda e Pessoa (2009) que utilizaram RNA para classificar a origem de castanhas do Brasil, obtidas nos estados Acre, Amapá e Rondônia, alcançando uma porcentagem de acerto da ordem de 81%. Também, Castro *et al.* (2015), que trabalharam com a predição do peso seco do mesocarpo (polpa) do fruto de macaúba, realizado através de RNA, acuradamente, e identificaram que a espessura do endocarpo (axial e radial) e o diâmetro axial do fruto foram as variáveis mais relevantes do processo. Ou a estimação eficaz do fluxo da filtragem por membranas de bebida à base de açaí, empregando RNA, proposta por Proni *et al*., 2020.

Assim, considera-se importante a proposição de um modelo de RNA capaz de efetuar treinamentos envolvendo múltiplas variáveis referentes às características das árvores de *Copaifera* L., de modo a predizer, matematicamente, àquelas nas quais espera-se encontrar reservatórios de oleorresina.

2.4. Desafios inerentes à pesquisa sobre prospecção de reservatórios de oleorresina em árvores de copaíba

Conforme mostrado anteriormente, existem diversos métodos tecnológicos disponíveis para o estudo dos reservatórios de oleorresina de *Copaifera*, porém o tema é bastante amplo e complexo, devido às características do objeto de estudo (árvores vivas, organismos biológicos altamente capazes de se adaptarem às mais diversas situações), que se encontra em ambientes de alta heterogeneidade.

A seguir, são abordados alguns dos aspectos que vão constituir parte de um conjunto de multivariáveis que caracterizam as dimensões vetoriais do problema em questão, para o qual se pretende gerar conhecimentos e soluções. Ressalta-se que, essas não representam a totalidade de dimensões possíveis, mas o apontamento das mesmas auxilia na proposição de diferentes tipos e abordagens de pesquisa. Inclusive, as características físico-químicas do próprio oleorresina variam e influenciarão os resultados em alguma medida, podendo ser, em alguns casos, um complicador ou um fator de contribuição.

2.4.1 Características intrínsecas das árvores

Plasticidade fenotípica e aclimatação

De acordo com Sodré *et al*. (2019), plasticidade fenotípica é a tendência de um organismo promover mudanças no fenótipo, no âmbito de sua morfologia, fisiologia, comportamento e fenologia, em resposta às variações naturais, ou antrópicas, nas condições do ambiente. A plasticidade é maior em plantas do que em animais, e a explicação se deve ao modo não limitado de crescimento, que possibilita alterações em função da localização geográfica e fatores como temperatura e umidade, entre outros (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001).

A exposição de uma planta às variações do ambiente por determinado tempo pode provocar algum tipo de desequilíbrio, mas os organismos podem ser capazes de realizar ajustes bioquímicos e/ou metabólicos nos processos fisiológicos na tentativa de retornar ao equilíbrio inicial, essas adaptações podem ser de curto ou de longo prazo e são chamadas de aclimatação (WALTER; ROSA; STRECK, 2015).

Lima *et al.* (2010) reforçaram o argumento de que a maioria das espécies vegetais é capaz de, em algum grau, promover mudanças na tentativa de sobreviver em ambientes heterogêneos e dinâmicos. Além disso, é reconhecida a capacidade plástica de variáveis relacionadas à aptidão, visto que, em ambientes favoráveis há aumento da plasticidade, enquanto a especialização diminui em ambientes menos favoráveis (VALLADARES *et al*., 2000). Existem plantas adaptadas a ambientes com alta intensidade de radiação e outras a ambientes com baixa radiação. O primeiro grupo apresenta uma elevada taxa fotossintética e o segundo, muitas vezes, são incapazes de funcionar devido à ocorrência de danos ao aparelho fotossintetizante (BERGAMASCHI, 2017).

A plasticidade morfológica da *C. lagnsdorfii* foi investigada por Costa *et al.* (2012), em seu estudo da alometria e da arquitetura de grupos de indivíduos que se desenvolveram em fitofisionomias distintas (floresta, cerrado, corredor e cerrado rupestre) no Sul de Minas Gerais. As relações entre as variáveis biométricas (coletadas e calculadas): diâmetro, altura, área da copa, grau de deflexão e deslocamento relativo da copa foram analisadas, concluindo que *C. langsdorfii* apresenta um gradiente de plasticidade morfológica com graus de semelhança diferenciados, sendo constatado que os indivíduos que cresceram no ambiente de floresta investem mais em altura do que em diâmetro, mas, de modo geral, a forma do fuste é semelhante em todos os ambientes (COSTA *et al*., 2012).

Melo Junior e Bona (2011) discutiram as alterações na estrutura populacional de árvores de *C. langsdorfii* em diferentes tipos de solo (neossolo flúvico, arenito e latossolo) que ocorrem no Cerrado e se diferenciam em função da capacidade de retenção de água, devido à textura do solo. Os autores verificaram vasos de grande diâmetro e fibras de maior comprimento em plantas de neossolo, sendo que, a disponibilidade hídrica, a estruturação e os padrões geomórficos condicionam as variações anatômicas.

Além de todas as questões já citadas, referentes às mudanças que os indivíduos podem realizar, é necessário considerar, também, as interações funcionais com os microorganismos, especialmente os do solo, pois esses podem se tornar agentes invasores. Castro (2015) encontrou oito espécies de fungos associados a ramos e folhas de *Copaifera langsdorffii* da região do Cerrado, dois deles são considerados patogênicos, *Diorchidium capaiferae* (de

ocorrência comum neste gênero de plantas) e *Leptosphaeria* sp. (geralmente encontrado no solo ou como saprófitos).

Heterogeneidade e peculiaridades do tecido vascular

O reconhecimento da existência de um considerável conteúdo de oleorresina no tronco de uma árvore é uma investigação hermética, e demanda o conhecimento de um conjunto de variáveis, quali e quantitativas, que corroborem para a interpretação dos resultados dos MND empregados.

A anatomia da madeira das árvores é, em muitos aspectos, complexa. Além de conhecer a totalidade das variações anatômicas que podem assumir as árvores do gênero *Copaifera*, devido às dezenas de espécies e variedades que crescem em diferentes locais, torna-se necessário ter clareza sobre suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

Alves, Martins e Carrasco (2013) indicaram que, o aumento da densidade propicia maior velocidade de propagação da onda na direção normal às fibras, mas não é o único parâmetro que a afeta. Por outro lado, Trinca (2011) e Secco (2012) verificaram que, a velocidade de propagação tende a ser menor conforme a densidade do material diminui. Contudo, BUCUR (2006) afirma que a velocidade pode aumentar ou diminuir em função de uma densidade maior ou menor ou, ainda, pode haver independência entre esses dois fatores. Inclusive, no caso de ondas ultra-sônicas, a velocidade de propagação da onda pode estar mais associada ao teor de umidade do que propriamente à densidade básica (OLIVEIRA; SALES, 2003).

Apesar das variações possíveis, a macroanatomia básica pode ser considerada para se estabelecer uma ideia sobre o que esperar em termos de características gerais. Latorraca, Castro e Santos (2018) caracterizaram a macroanatomia de *C. langsdorffii* e afirmaram que essa apresenta camadas de crescimento demarcadas por faixas de parênquima marginal; cerne castanho claro a castanho-avermelhado e alburno bege-rosado a acinzentado; textura média; parênquima axial em faixas marginais, paratraqueal vasicêntrico; presença de canais axiais intercelulares; raios finos, escassos ou numerosos, não estratificados; vasos pequenos, porosidade difusa, poucos, predominantemente solitários e múltiplos radiais.

A heterogeneidade e as peculiaridades do tecido vascular, bem como, a metodologia de coleta de dados podem influenciar o resultado da análise e a distinção entre presença de conteúdo de oleorresina e presença de água, por exemplo, pois as imagens tomográficas são fortemente influenciadas pelo teor de umidade na madeira. Latorraca *et al*. (2011) observaram que, discos de madeira obtidas de zonas mais altas do tronco apresentaram maior umidade do que os discos obtidos das zonas mais baixas, e que a umidade tem influência na formação da imagem tomográfica. De acordo com Bucur (2006), o teor de umidade é afetado pelas peculiaridades do sistema vascular e do ambiente adjacente. Oliveira e Sales (2003) explicaram que a água livre aumenta a atenuação da onda acústica, resultando na diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial.

A anisotropia pode mascarar o comportamento das ondas mecânicas, gerando regiões representadas por velocidades mais baixas (PIERI; MUSSI; MOREIRA, 2009) sem que haja de fato relação com a presença de oco, podridão, oleorresina ou água. Assim, como a excentricidade da medula (deslocamento da medula para I do centro) e a existência de defeitos

causados por injúrias ocasionadas ou naturais, como afirmado por ESPINOSA *et al.* (2020), a combinação do posicionamento e do tamanho das injúrias influenciam a probabilidade de detecção de decaimento usando uma imagem tomográfica.

2.4.2 Aspectos práticos

O esforço amostral é um aspecto que não inviabiliza a realização de pesquisas de prospecção, uma vez que se trata da construção progressiva de conhecimento, mas a coleta de dados pode necessitar de um grande número de amostras representativas de várias populações, que caracterizem determinada situação específica (com oleorresina e sem oleorresina). Além disso, árvores ocas não fornecem dados completos para serem comparados (densidade, química, anatomia, umidade).

Para a aplicação à campo, alguns dos MND ainda não dispõem de um mecanismo funcional adequado, especialmente, em se tratando de árvores nativas de grande porte. E mesmo àqueles atualmente mais utilizados apresentarão certa dificuldade devido à altura dos fustes, cabendo lembrar que todos os MND citados dependerão de técnicas especializadas de escalada em altura, se forem considerados os troncos como um todo.

Outro fator relevante é o custo dos equipamentos de MND e de manutenção, pois necessitam de calibragem e aferição, para que não haja interferência nos resultados das análises. Atualmente, é possível afirmar que tais métodos têm preço elevado, em função de ser, muitas vezes, tecnologia importada.

Como visto, muitos fatores que podem influenciar na construção das imagens digitais subsidiam o diagnóstico dos fustes das árvores, afetando a resolução das mesmas, e, assim, a acurácia dos resultados, sendo, portanto, importante avaliar cada fator separadamente e em interação.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao compilar informações para introduzir uma sucinta compreensão acerca das pesquisas que corroboram para contextualizar a diversidade botânica deste gênero, seu potencial fármaco-químico e energético, carência e potencial para avanços tecnológicos e as técnicas disponíveis atualmente, verificamos que há um vasto campo para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a prospecção de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* L. Com isso, esperamos estimular novas colaborações para pesquisas, que possam subsidiar o manejo sustentável deste recurso florestal e possibilitar sua produção em sistemas de florestas plantadas.

As copaíbas constituem um gênero botânico (*Copaifera* L.) riquíssimo e com uma robusta demanda para investigações nas mais variadas áreas do conhecimento. Suas espécies e variedades, ainda pouco conhecidas, constituem um capital natural importante que se encontra sob interesses nacionais e internacionais.

O grande potencial do oleorresina está, consistentemente, comprovado pelos resultados de inúmeras pesquisas acerca de seus constituintes químicos e aplicações. Neste aspecto, percebe-se o interesse e o reconhecimento da demanda por tecnologias e novas práticas que viabilizem o uso sustentável deste recurso renovável. Portanto, há que se pensar no desenvolvimento de práticas mais apropriadas para sua domesticação, em futuros povoamentos silviculturais de produção.

Existem várias tecnologias e métodos, com maior ou menor grau de complexidade e capacidade de exatidão, que podem ser utilizados em testes laboratoriais e à campo, para tornar possível responder aos questionamentos sobre a existência e a localização dos reservatórios de oleorresina, bem como, sobre o volume de produto armazenado e sua capacidade futura. Esta é uma investigação complexa, a ser realizada em múltiplas etapas e envolvendo muitos testes, devido à combinação de fatores que têm implicação na interpretação dos resultados proporcionados pelos Métodos Não Destrutivos disponíveis para a análise de árvores e madeira.

A tomografia de impulso e o ultrassom, tecnologias adequadas para o estudo da qualidade do fuste das árvores, têm potencial para a prospecção dos reservatórios de oleorresina, mas deverão ser subsidiadas por tecnologias com o foco mais aplicado aos estudos da madeira, como a espectroscopia, a densitometria de raios-X e a própria dendrocronologia, que é uma ciência, cujo propósito é a datação e as correlações do comportamento do desenvolvimento da árvore com eventos físicos e até de natureza humana.

Há ainda, espaço para métodos como a RMN e o radar de penetração no solo, a serem aperfeiçoados para aplicação no campo. No caso da RMN, destaca-se seu potencial para a determinação do volume de substância armazenada, podendo ser experimentada inicialmente em pesquisas com plântulas e plantas jovens. Também, é indiscutível a necessidade de incorporar a todo o processo os avanços dos usos das Redes Neurais Artificiais, para que se possam manejar bancos de dados, cada vez mais robustos e capazes de melhor retratar a realidade.

Os desafios para este empreendimento envolvem aprofundar os conhecimentos sobre a ecologia das árvores, nas diferentes etapas de seu desenvolvimento, pois entender seu perfil

radial e longitudinal pode levar à detecção precoce de regiões intratroco acometidas por fungos ou outras injúrias, que poderão dar início à novos reservatórios.

Não há, à princípio, uma indicação expressa sobre uma ou outra espécie mais apropriada para a domesticação, ou qual é o modelo silvicultural mais apropriado para a implantação de florestas de produção, com vistas à redução da idade produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16246-3**: Florestas urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas. Parte 3: Avaliação de risco de árvores. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 14p.

ALVES, R. C.; MARTINS, T.; CARRASCO, E. V. M. Influência da densidade na velocidade de propagação da onda em sete espécies de madeira tropicais. **Natural Resources**, v. 3, n. 1, 2013. DOI 10.6008/ESS2237-9290.2013.001.0001.

AMAZONAS. Governo Estadual do Amazonas. Decreto Nº 25.044, de 1ª de Junho de 2005. **DOE de 02 de junho de 2005**, p. 4. Disponível em: https://online.sefaz.am.gov.br/silt/Normas/Legisla%E7%E3o%20Estadual/Decreto%20Estadual/Ano%202005/Arquivo/DE_25044_05.htm. Acesso em: 28 dez. 2021.

ANDRADE, R. G. de; RODA, V. O; PESSOA, J. D. C. Utilização de Redes Neurais Artificiais para classificação por origem de castanhas do Brasil. *In:* CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, XI, 2009, São Lourenço, MG. **Anais** […]. Minas Gerais, 2009. Disponível em: http://www.seb-ecologia.org.br/revistas/indexar/anais/2009/resumos_ixceb/77.pdf. Acesso em: 19 set. 2021.

ANDREASSI, M.; TAMASI, G.; BONECHI, C. Chemical characterization and in vitro antioxidant activity of products from *Copaifera langsdorffii* and *Eugenia caryophyllata*. **Journal of Investigative Dermatology**, v. 137, n. 5, 2017. DOI 10.1016/j.jid.2017.02.721.

ARAÚJO, L. O.; FERNANDES, R. F.; ANTENOR, M. C.; ANDRADE, J. S.; FERNANDES, R. F.; GALDINO, S. M.; BARROS FILHO, M. M. L. Mapeamento tecnológico da copaíba: Análise prospectiva no Brasil e no mundo. **Cad. Prospec**, v.11, n. 1, p.146-157, 2018. DOI 10.9771/cp.v11i1.23225.

ARCINIEGAS, A.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L. C.; LASAYGUES, P. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. **Trees**, n. 28, p. 1559-1567, 2014. DOI 10.1007/s00468-014-1062-6.

ASHRAF, U.; ZHU, P.; YASIN, Q.; ANEES, A.; IMRAZ, M.; MANGI, H. N.; SHAKEEL, S. Classification of reservoir facies using well log and 3D seismic attributes for prospect evaluation and field development: A case study of Sawan gas field, Pakistan. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 175, p. 338 -351, 2019. DOI 10.1016/j.petrol.2018.12.060.

ASCENSÃO, L. Estruturas secretoras em plantas. Uma abordagem morfo-anatómica. *In.*: Figueiredo, A. C.; Barroso, J. G.; Pedro, L. G. **Potencialidades e Aplicações das Plantas Aromáticas e Medicinais**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 3. ed., 2007. Disponível em: http://cbv.fc.ul.pt/PAM/PAM3_PAM1_Indice_Pagina_CBV.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

BASILE, A. C.; SERTIÉ, J. A. A.; FREITAS, P. C. D.; ZANINI, A. C. Anti-inflammatory activity of oleoresin from Brazilian *Copaifera*. **Journal of Ethnopharmacology**. v. 22, n. 1, p. 101-109, 1988. DOI 10.1016/0378-8741(88)90235-8.

BASTOS, A. P. M. R. **Análise cromatográfica, morfológica e molecular da síntese do oleoresina em plantas jovens de *Copaifera multijuga* Hayne (Fabaceae – Caesalpinioideae).** 2013. 65p. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013. Disponível em: https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/4396/2/Tese%20-%20Ana%20Paula%20Meneses%20Rodrigues%20Bastos.pdf. Acesso em: 28 dez. 2021.

BENAVIDES, F.; LEIDERMAN, R.; SOUZA, A.; CARNEIRO, G.; AZEVEDO, R. B. V. Pore size distribution from NMR and image based methods: A comparative study. **Journal of Petroleum Science and Engineering,** v.184, 2020. DOI 10.1016/j.petrol.2019.106321.

BENAVIDES, F.; LEIDERMAN, R.; SOUZA, A.; CARNEIRO, G. Estimating the surface relaxivity as a function of pore size from NMR T2 distributions and micro-tomographic images. **Computers & Geosciences,** v.106, p. 200-2008, 2017. DOI 10.1016/j.cageo.2017.06.016.

BERGAMASCHI, H. Radiação solar e fotossíntese. *In*: BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. (org). **As plantas e o clima: Princípios e aplicações.** Guaiba: Agrolivros, 2017. p. 85-115.

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal**. 2012. 130f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BINOTI, M. L. M. da S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de Redes Neurais Artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Rev. Árvore**, v. 37, n. 4, p. 639-645, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622013000400007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 21 abr. 2020.

BINOTI, D.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. Configuração de Redes Neurais Artificiais para estimação do volume de árvores. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, v. 5, n. 1, p. 58-67, 2014. DOI 10.12953/2177-6830.v05n01a06.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

BRAGA, E.; FEIJÓ, L. F. **Mercado Florestal Certificado**. n. 2, 2009. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/boletim_mercado_florestal_2.pdf. Acesso em: 25 dez. 2021.

BUCUR, V.; ARCHER, R. R. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. **Wood Sci Tchnol**., v.18, p. 255-265, 1984. DOI 10.1007/bf00353361.

BUCUR, V. Ultrasonic velocity, stiffness matrix and elastic constants of wood. **J Catgut. Acoust. Soc. Ser**. v. 1, n. 44, p. 23-38, 1985.

BUCUR, V. Ultrassonic tecniques for nondestrutive testing of standing trees. **Ultrasonics**. n. 43, p. 237-239, 2005. DOI 10.1016/j.ultras.2004.06.008.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2nd Edition. ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. BRUKER – Bruker Corporation. **Diffusion MR: Basics and Applications**. *In*: The Bruker Webinar Team. 2020.

CALDERON, R. de A. **Mercado de produtos florestais não madeireiros na Amazônia Brasileira**. 2013. 84f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Faculdade de Tecnologia: Universidade Federal de Brasília. 2013. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/33546803.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. 2006. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8796/LEANDROCALEGARI.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 13 set. 2021.

CAMPELO, F.; MAYER, K.; GRABNER, M. xRing – an R package to identify and measure tree-ring features using X-ray microdensity profiles. **Dendrochronologia**, v. 53, p. 17-21, 2019. DOI 10.1016/j.dendro.2018.11.002.

CARLQUIST, S. How wood evolves: a new synthesis. **Botany**, n.90, p. 901-940, 2012. DOI 10.1139/B2012-048.

CARMO, J. F. do. **Crescimento e propriedades da madeira de *Copaifera langsdorffii* Desf. sob regime de manejo florestal**. 2016. 54p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal

Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Seropédica, 2016. Disponível em: http://r1.ufrrj.br/wp/ppgcaf/wp-content/uploads/TESE%20JAIR%202.pdf. Acesso em: 23 dez. 2021.

CARRASCO, E.V. M; SOUZA, M. F.; PEREIRA, L. R. S.; VARGAS, C. B.; MANTILLA, J. N. R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira em função da inclinação das fibras utilizando tomógrafo acústico [*on line*]. **Matéria (Rio J.)**, v. 22 (Suppl. 1), 2017. DOI 10.1590/s1517-707620170005.0271.

CARVALHO, D. C.; PEREIRA, M. G. G. P.; LATORRACA, J. V. F.; PACE, J. H. C; SILVEIRA, L. D.; DA SILVA, A. B.; CARMO, J. F. Dendrochronology and growth of *Copaifera langsdorffii* wood in the vegetative dynamics of the Pirapitinga Ecological Estation, state of Minas Gerais, Brazil. **Floresta**, v. 8, n. 1, p. 49-58, 2018. DOI 10.5380/rf.v48i1.49905.

CASTRO, C. A. de O.; CARNEIRO, V. Q.; RESENDE, R. T.; CRUZ, C. D.; MOTOIKE, S. Y. Utilização de Redes Neurais Artificiais na predição do peso seco do mesocarpo (polpa) do fruto de macaúba. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 8., Goiânia. **Resumos** […]. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2015. Disponível em: http://www.sbmp. org.br/8congresso/anais/resumos/resAnexo1-0275-0022.pdf. Acesso em: 19 set. 2021.

CASTRO, M. T. Micodiversidade Associada a árvores de *Copaifera langsdorffii* Desf. em Brasília, Distrito Federal. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 256-261, 2015. DOI 10.1590/2179-8087.094914.

CASTRO, V. R. de. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. Et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.).** 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 2011. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-13092011-112235/pt-br.php. Acesso em: 14 set. 2021.

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. **Ciência e tecnologia no setor florestal brasileiro: Diagnóstico, prioridades e modelo de financiamento.** Documento Síntese. Coord. RODRIGUES, L. C. S. Piracicaba: SP, 2002. Disponível em: https://www.cgee.org.br /documents/10195/734063/Ciencia+e+Tec.+no+ setor+Florestal_relatorio_1020.pdf/59ee94fd-434c-4028-b045-497163725f7a?version=1.0. Acesso em: 12 set. 2021.

CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. **Sub-rede de Dermocosméticos na Amazônia a partir do uso sustentável de sua biodiversidade com enfoques para as cadeias produtivas da castanha-do-Pará e dos óleos de andiroba e copaíba**. Brasília, 2007. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Gonzalo_produto+

consolidado_4619.pdf/54257990-f66a-46f4-81ad-c2189ba08ace?version=1.0. Acesso em: 12 set. 2021.

CHEN, F.; AL-AHMAD, H.; JOYCE, B.; ZHAO, N.; KÖLLNER, T. G.; DEGENHARDT, J.; STEWART JR., C. N. Within-plant distribution and emission of sesquiterpenes from *Copaifera officinalis*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, p. 1017-1023, 2009. DOI 10.1016/j.plaphy.2009.07.005.

COSTA, M. P.; PEREIRA, J. A. A.; BENICIO, M. H. M.; SOUSA, H.; FONTES, M. A. L.; GARCIA, P. O. Alometria e arquitetura de *Copaifera langsdorffii* (desf.) kuntze (Fabaceae) em fitofisionomias neotropicais no Sul de Minas Gerais. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 2, p. 223-240, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/handle/1/38270. Acesso em: 14 set. 2012.

COSTA, W. M. da. Arranjos comunitários, sistemas produtivos e aportes de ciência e tecnologia no uso da terra e de recursos florestais na Amazônia. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. **Ciênc. hum. [online]**, v. 5, n. 1, p. 41-57, 2010. DOI 10.1590/S1981-81222010000100005.

DE ANDRADE, B. G.; BASSO, V. M.; LATORRACA, J. V. F. Machine vision for field-level wood identification. **IAWA Journal**, v.0, n.0, p. 1-18, 2020. DOI 10.1163/22941932-bja10001.

DE ANDRADE, B. G.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; BASSO, V. M.; PINTO, F. A. C. Potential of texture analysis for charcoal classification. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, 2019. DOI 10.1590/2179-8087.124117.

DE AZEVEDO, G. B.; TOMIAZZI, H. V.; AZEVEDO, G. T. O. S.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E.; DE SOUZA, M. T. P.; BATISTA, T. S.; EUFRADE-JUNIOR, H. J.; GUERRA, S. P. S. Multi-volume modeling of *Eucalyptus* trees using regression and artificial neural networks. **PloS ONE**, v. 15, n. 9, 2020. DOI 10.1371/journal.pone.0238703.

DEBONE, H. S.; LOPES, P. S.; SEVERINO, P.; YOSHIDA, C. M. P.; SOUTO, E. B.; DA SILVA, C. F. Chitosan/Copaíba oleoresin films for would dressing application. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 555, p. 146-152, 2019. DOI 10.1016/j.ijpharm.2018.11.054.

DEL SOLE, L.; CALAFATO, A.; AND ANTONELLINI, M. Characterization of sub-seismic resolution structural diagenetic heterogeneities in porous sandstones: Combining ground-penetrating radar profiles with geomechanical and petrophysical in situ measurements (Northern Apennines, Italy). **Marine and Petroleum Geology**, v. 117, p. 1-22, 2020. DOI 10.1016/j.marpetgeo.2020.104375.

ESPINOSA, L.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L.; LASAYGUES, P. Quantitative parametric imaging by ultrasound computed tomography of trees under anisotropic conditions: Numerical case study. **Ultrasonics**. v. 102, 2020. DOI 10.1016/j.ultras.2019.106060.

FERREIRA, J. C. B.; LAFETÁ, B. O.; PENIDO, T. M. A.; DE CAMPOS, P. M.; CASTRO, P. M. The estimation of the height of seedlings of *Tibouchina granulosa* Cogn. (Melastomataceae) in artificial neural networks. **Soc. Bras. de Arborização Urbana, REVSBAU**, v. 9, n. 1, p. 142-150, 2014. Disponível em: https://paperzz.com/doc/8793404/melastomataceae---revista-da-sociedade-brasileira-de. Acesso em: 04 de nov. 2021.

FIEDLER, N. C.; SOARES, S. T.; SILVA, G. F. Produtos Florestais Não Madeireiros: Importância e manejo sustentável da floresta. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 10, n. 2, p. 263-278, 2008. Disponível em: https://revistas.unicentro.br/ index.php/RECEN /article/view/712/885. Acesso em: 12 set. 2021.

FRANÇOIS, M. **Identificatiion des sysmmetries materielles de materiaux anisotropies**. 1995. 196f. These (Doctorat de Mecanique des Solides et des Structures) – l'Université Pierre et Marie CURIE, Universite Paris, França, 1995. Disponível em: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00435563/document. Acesso em: 13 set. 2021.

FUKIMORI, B. Ressonância Magnética: Fundamentos básicos. 2019.

FURTADO, R. A.; DE OLIVEIRA, P. F.; SENEDESE, J. M.; OZELIN, S. D.; DE SOUZA, L. D. R.; LEANDRO, L. F.; DE OLIVEIRA, W. L.; DA SILVA, J. J. M.; OLIVEIRA, L. C.; ROGEZ, H.; AMBRÓSIO, S. R.; VENEZIANI, R. C. S.; BASTOS, J. K.; TAVARES, D. C. Assessment of genotoxic activity of oleoresins and leaves extracts of six *Copaifera* species for prediction of potential human risks. **Journal of Ethnopharmacology**. v. 221, p. 119-125, 2018. DOI 10.1016/j.jep .2018.04.002.

GBIF – Global Biodiversity Information Facility. *Copaifera* L. *In*: GBIF Backbone Taxonomy: Checklist dataset, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.15468/39omei. Acesso em: 15 de set. 2020.

GALÚCIO, C, de S.; BENITESA, C. I.; RODRIGUES, R. A. F.; MACIELA, M. R. W. Recuperação de sesquiterpenos do óleo-resina de copaíba a partir da destilação molecular. **Quim. Nova**, v. 39, n. 7, p. 795-800, 2016. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=6452. Acesso em: 26 de out. 2021.

GOMES, N. M.; REZENDE, C. M.; FONTES, S. P.; MATHEUS, M. E.; FERNANDES, P. D. Antinociceptive activity of Amazonian copaíba oils. **Journal of Ethnopharmacology**. v. 109, n. 3, p. 486-492, 2007. DOI 10.1016/j.jep.2006.08.018.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**. v. 43, n. 1, p. 64-75, 2011. Disponível em: https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1247/1247. Acesso em: 17 Aug. 2020.

GRABIANOWSKI, M.; MANLEY, B.; WALKER, J. C. F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 205–216, 2006. DOI 10.1007/s00226-005-0038-5.
EL HACHEM, C.; ABAHRI, K.; LECLERC, S.; BENNACER, R. NMR and XRD quantification of bound and free water interaction of spruce wood fibers. **Construction and Building Materials**, v. 260, 120470, 2020. DOI10.1016/j.conbuildmat.2020.120470.

HAGE, M. C. F. N. S.; IWASAKI, M. Imagem por ressonância magnética: princípios básicos. **Cienc. Rural**, v. 39, n. 4, 2009. DOI 10.1590/S0103-84782009005000041.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Tradução: Paulo M. Rangel. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HEIN, P. R. G.; PAKKANEN, H. K.; DOS SANTOS, A. A. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n. 3, p.1-10, 2017. DOI 10.5424/fs/2017263-11892.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da extração vegetal e da silvicultura – Tabela 289: Quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo: copaíba (óleo), 2020. Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA. Available in: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#notas-tabela. Acesso em: 24 jul. 2020.

INZUNZA, O. de las N. Y. **Anatomia da madeira de nove espécies do gênero *Copaifera* (Leguminosae-Caesalpinoideae)**. 1992. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1992. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26693/D%20-%20YANEZ%20INZUNZA%2c%20OLGA%20DE%20LAS%20NIEVES.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12 set. 2021.

JACQUIN, P.; LONGUETAUD, F.; LEBAN, J.-M.; MOTHE, F. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 42-50, 2017. DOU 10.1016/j.dendro.2017.01.004.

JBRJ – Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Jabot – Banco de Dados da Flora Brasileira: gênero *Copaifera*. Disponível em: [http://jabot.jbrj.gov.br/]. Acesso em: 7 out. 2020.

JEŽOVÁ, J.; MERTENS, L.; LAMBOT, S. Ground-penetrating radar for observing tree trunks and other cylindrical objects. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 214-225, 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.005.

JONES, H. G.; HIGGS, K.H.; BERGAMINI, A. The use of ultrasonic detectors for water stress determination in fruit trees. **Ann Sci For.** v.46 (Suppl.), p. 338-341, 1989. DOI 10.1051/forest:19890575.

JUNIOR, L. S.; RODRIGUEZ, D. R. O.; QUINTILHAN, M. T.; BRASOLIN, S.; TOMMASIELLO FILHO, M. Evidence to wood biodeterioration of tropical species revealed by non-destructive techniques. **Science of The Total Environment**. v. 672, p. 357-369, 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.03.429.

KANAZAWA, Y.; YAMADA, T.; KIDO, A.; FUJIMOTO, K.; TAKAKURA, K.; HAYASHI, H.; FUSHIMI, Y.; KOZAWA, S.; KOIZUMI, K.; OKUNI, M.; UEDA, N.; TOGASHI, KAORI. Internal evaluation of impregnation treatment of waterlogged wood; relation between concentration of internal materials and relaxation time using magnetic resonance imaging. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 38, p. 196-201, 2017. DOI 10.1016/j.mri.2017.01.010.

KEUNECKE, D.; SONDEREGGER, W.; PERETEANU, K.; LÜTHI, T.; NIEMZ, P. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. **Wood Sci. Technol**, v. 41, n. 4, p. 309-327, 2007. DOI 10.1007/s00226-006-0107-4.

KOÇAR, G. Oil crops for energy. **Encyclopedia of Sustainable Technologies,** p. 121-130, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10127-7. Acesso em: 28 set. 2020.

KOÇAR, G.; CIVAŞ, N. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 900–916, 2013. DOI 10.1016/j.rser.2013.08.022.

LATORRACA, J. V. F; CASTRO, J. P.; SANTOS, G. C. V. dos. **Guia para identificação macroscópica de madeira**. 1. ed. Seropédica: Editora do autor, 2018. 78p.

LATORRACA, J. V. F.; RODRIGUES, N. D.; VIEIRA, M. C.; OHANA, C. C.; TEIXEIRA, J. G. Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânica. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 451-459, 2011. DOI 10.4322/floram.2011.064.

LI, W.; WEN, J.; XIAO, Z.; XU, S. (2018). Application of Ground-Penetrating Radar for Detecting Internal Anomalies in Tree Trunks with Irregular Contours. **Sensors**, v. 18, n. 2, 2018. DOI 10.3390/s18020649.

LIMA, K. F.; BATISTA, M. J. N.; SCHMAL, B.; SCHMAL, P. **Manual de boas práticas de manejo florestal não-madeireiro.** AVIVE, 1. ed. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272827264_Manual_de_Boas_Praticas_de_Manejo_Florestal_Nao_Madeireiro/link/54f094640cf24eb8794101cd/download. Acesso em: 25 dez. 2021.

LIMA, C. S.; MEDEIROS, B. J. L; FAVACHO, H. A. S.; SANTOS, K. C.; OLIVEIRA, B. R.; TAGLIALEGNA, J. C.; COSTA, E. V. M.; CAMPOS, K. J.; CARVALHO, J. C. T. Pre-clinical validation of a vaginal cream containing copaíba oil (reproductive toxicology study). **Phytomedicine**. v. 18, n. 12, p. 1013-1023, 2011. DOI 10.1016/j.phymed.2011.05.004.

LIMA, M. A. O.; MIELKE, M. S.; LAVINSKY, A. O.; FRANÇA, S.; ALMEIDA, A-A. F.; GOMES, F. P. Crescimento e plasticidade fenotípica de três espécies arbóreas com uso potencial em sistemas agroflorestais. **Sci. For.**, v. 38, n. 87, p. 527-534, 2010. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap20.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

LORENZO, H.; PÉREZ-GARCIA, V.; NOVO, A.; ARMESTO, J. Forestry applications of ground-penetrating radar. **Forest Systems**, v. 19, n. 1, p. 5-17, 2010. Disponível em: https://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/1163/1160. Acesso em: 13 Sep. 2021.

LPWG – The Legume Phylogeny Working Group. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. **TAXON**, v. 66, n. 1, p. 44-77, 2017. DOI 10.12705/661.3.

MALAINEY, M. E. **A consumer's guide to archaeological science: Analytical techniques. Manuals in Archaeological Method, Theory and Technique**, 1. ed. New York: Springer-Verlag, 2011. 602 p. Disponível em: http://www.springer.com/br/book/9781441957030. Acesso em: 5 dez. 2017.

MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. *In*: **Fisiologia Vegetal 2**. 2. ed. FERRI, M. G. (Coord.). São Paulo: Editora EPU, 1985.

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; BENETATI, L. Anatomia comparada do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae-Caesalpinoideae) de floresta e cerradão. **Brazilian Journal of Botany**. v. 24, n. 3, p. 311-320, 2001. DOI 10.1590/S0100-84042001000300010.

MARTINS, B. C.; ALVES, W. F.; SANTOS, A. M. **Caracterização fisicoquímica de oleorresinas de *Copaifera* spp**. *In*: XVII SAEF: Ciência, Inovação e Tecnologia em gestão de florestas & I Fórum da Pós-Graduação em ciências ambientais e florestais, Seropédica, RJ, 2018. Disponível em: https://even3.blob.core.windows.net/anais/112036.pdf. Acesso em: 25 ago. 2020.

MARTINS, K.; RIGAMONTE-AZEVEDO, C., SILVA, M. DAS G. C. da; WADT, L. H. de O. Copaíba: aspectos ecológicos e potencial de uso do oleorresina. *In*: SIVIERO, A.; MING, L. C.; SILVEIRA, M.; DALY, D.; WALLACE, R. **Etnobotânica e Botânica Econômica do Acre**. Rio Branco: Edufac, 2016, 428 p. Il. ISBN 978-85-8236-027-9.

MARTINS-DA-SILVA, R. C. V., PEREIRA, J.F., LIMA, H. C. de. O gênero *Copaifera* (Leguminosae – Caesalpinioideae) na Amazônia brasileira. **Rodriguésia**. v. 59, n. 3, p. 455-476, 2008. Disponível em: https://rodriguesia.jbrj.gov.br/FASCICULOS/rodrig59_3/004.pdf. Acesso em: 7 set. 2020.

MASON, E. G.; HAYES, M.; PINK, N. Validation of ultrasonic velocity estimates of wood properties in discs of radiata pine. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 47, n. 1, 2017. DOI 10.1186/s40490-017-0098-y.

MATTOSO, E. **Estudo de fragrâncias amadeiradas da Amazônia**. 2005. 143f. Dissertação (Mestrado em Química na área de Química Orgânica) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/248796. Acesso em: 5 ago. 2018.

MEDEIROS, R. da S. **Estudo da anatomia do lenho e dendrocronologia de árvores de *Copaifera multijuga* Hayne na Amazônia brasileira e sua relação com o manejo e extração de oleorresina.** 2016. 189f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba: SP., 2016. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-10082016-180854/publico/Raquel_da_Silva_Medeiros_versao_revisada.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

MEDEIROS, R. G. S.; NASCIMENTO, C. C.; BARROS, S. V. S.; KROESSIN, A. Tomografia de impulso na avaliação da sanidade e rendimento de *Micrandopsis scleroxylon* W. Rodr. **Nativa**, v.5, esp., p. 649-655, 2017. DOI 10.5935/2318-7670.v05nespa28.

MEDEIROS, R. S.; VIEIRA, G.; DE ALMEIDA, D. R. A.; TOMAZELLO FO, M. New information for managing *Copaifera multijuga* Hayne for oleoresin yield. **Forest Ecology and Management**, v. 414, p. 85–98, 2018. DOI 10.1016/j.foreco.2018.02.009.

MELO JÚNIOR, J. C. F. de; CECCANTINI, G.; BONA, C. Anatomia ecológica do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae) distribuída em diferentes condições edáficas do Cerrado Sul-brasileiro. **IHERINGIA, Sér. Bot**., v. 66, n.2, p. 189-200, 2011. Disponível em: https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/49/56. Acesso em: 14 set. 2021,

MIGUEL, E. P.; MELO, R. R.; SERENINI JUNIOR, L.; MENEZZI, C. H. S. Using artificial neural networks in estimating wood resistance. **Maderas, Cienc. tecnol**. [on line], v. 20, n. 4, p. 531-543, 2018. DOI 10.4067/S0718-221X2018005004101.

MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R.; YOON, S.; THAI, C. N. Determination of basic density and moisture content of loblolly pine wood disks using a near infrared hyperspectral imaging system. **J. Near Infrared Spectrosc**. v. 19, p. 401-409, 2011. DOI 10.1255/jnirs.948.

MORAIS, L. R. B.; GUTJAHR, E. **Química de oleaginosas: valorização da biodiversidade amazônica** Tradução: Ekkhard Gutjahr. Belém: Ed. do Autor, 2012. Disponível em: https://www.institutopiatam.org.br/wp-content/uploads/2021/03/Livro-Morais-Valorizacao-Biodiversidade-Amazonica-Versao-Final11.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

MOREIRA, A. C. O. de. **Espectroscopia NIR, CG-EM e quimiometria para o controle de qualidade do óleo de copaíba (*Copaifera* spp.)**. 2018. 191f. Tese (Doutorado em Tecnologias Química e Biológica) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Química e Biológica, Universidade de Brasília. Brasília. 2018. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/32876. Acesso em: 12 set. 2021.

MUÑIZ, G. I. B.de.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C. Fundamentos e estado da arte da Espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 865-875, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cflo/v22n4/1980-5098-cflo-22-04-00865.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2017.

NASCIMENTO, C. **Ressonância Magnética Nuclear**. São Paulo: Blucher, 2016. 120p.

NAGATA, A.; KOSE, K.; TERADA, Y. Development of an outdoor MRI system for measuring flow in a living tree. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 265, p. 129-138, 2016. DOI 10.1016/j.jmr.2016.02.004.

NASCIMENTO, A. U. L. do; MARTINS, B. C.; NAGY, A. C. G; MACIEL, N. S. R. **Propagação ultrassônica em madeira e oleorresina associados**. *In*: OLIVERIA, R. J. de. Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade. 1. ed. v.1. Guarujá: Editora Científica Digital, 2020. DOI 10.37885/200801114.

NEWTON, P.; WATKINSON, A. R.; PERES, C. A. Determinants of yield in a non-timber forest product: *Copaifera* oleoresin in Amazonian extractive reserves. **Forest Ecology and Management**. v. 261, n. 2, p. 255- 64, 2011. DOI 10.1016/j.foreco.2010.10.014.

NOBRE, I.; NOBRE, C. Projeto "Amazônia 4.0": Definindo uma terceira via para a Amazônia. *In:* **Futuribles**. n. 2, São Paulo, 2019. Disponível em: http://www.plataformademocratica.org/Arquivos/Futuribles2/Futuribles2_ProjetoAmaz%C3%B4nia4.0.pdf. Acesso em: 4 nov. 2020.

OLIVEIRA, F. G. R. de, SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Minerva**, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2003. Disponível em: http://fipai.org.br/Minerva%2002(01)%2003.pdf. Acesso em: 7 out. 2020.

OZYHAR, T.; HERING, S.; SANABRIA, S. J.; NIEMZ, P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. Journal or Series Title. **Wood science and technology**, v. 47, n.2, p.329-341, 2013. DOI 10.1007/s00226-012-0499-2.

PACHECO, C. A. R.; PEREIRA, N. S. **Deep Learning**: Conceitos e utilização nas diversas áreas do conhecimento. **Revista Ada Lovelace,** v. 2, p. 34-49, 2018. Disponível em: http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/lovelace. Acesso em: 14 set. 2021.

PALMA, S.; GONÇALVES, R.; TRINCA, A.; COSTA, C.; REIS, M.; MARTINS, G. Interference from knots, wave propagation direction, and effect of juvenile and reaction wood on velocities in ultrasound tomography. **BioRes**, v.13, n. 2, p. 2834-2845, 2018. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/interference-from-knots-wave-propagation-direction-and-effect-of-juvenile-and-reaction-wood-on-velocities-in-ultrasound-tomography/. Acesso em: 22 July 2020.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. Introdução à espectroscopia. 2. ed. [Tradução 5. ed] São Paulo: Cengage Learning, 2015.

PAZ, A. M. **Biological Resources for Energy**. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. ISMAI – Instituto Superior da Maia, Portugal, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05881-4. Acesso em: 28 set. 2020.

PEDROZO, E. Á.; SILVA, T. N. da; SATO, S. A. S.; OLIVEIRA, N. D. A. Produtos florestais não madeiráveis (PFNMS): as filières do açaí e da castanha da Amazônia. **Revista de Administração e Negócios da Amazônia**, v. 3, n. 2, mai/ago. 2011.

PEREIRA, L. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; POLIZEL, J. L.; SILVA FILHO D. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 2, 2007. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/66313. Acesso em: 13 set. 2021.

PERLIN, L. P.; JULIANI, M. A.; VALLE, A.; PINTO, R. C. de A. Fundamentação matemática da tomografia ultrassônica na avaliação da integridade de elementos estruturais em madeira. **CERNE**, v. 21, n. 3, p. 503-509, 2015. DOI 10.1590/01047760201521031868.

PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA, M. A. S. Óleo de copaíba (*Copaifera* sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais. **Rev. bras. plantas med**., v. 11, n. 4, p. 465-472, 2009. DOI 10.1590/S1516-05722009000400016.

PLOWEN, C. Copaíba (*Copaifera* spp.). *In*: GUILLEN, A. *et al*. (ed.) **Explotando el mercado verde: Certficación y manejo de produtos forestales no maderables**. Montevideo: Ed. Nordan comunidad, 2004, p. 140-149.

PRONI, C.; HANEDA, R. N.; FILLETTI, É. R. Desenvolvimento de Redes Neurais Artificiais para análise do fluxo de permeado de uma bebida à base de açaí no processo de micro-filtração tangencial C.Q.D. **Revista Eletrônica Paulista de Matemática,** ed. Ermac., v. 17, p. 189-205, 2020. DOI. 10.21167/cqdvol17ermac202023169664cprnherf189205.

QIU, Q.; QIN, R.; LAM, J. H. M.; TANG, A. M. C.; LEUNG, M. W. K.; LAU, D. An innovative tomographic technique integrated with acoustic-laser approach for detecting defects in tree trunk. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 156, p. 129-137, 2019. DOI 10.1016/j.compag.2018.11.017.

RAMALHO, F. M. G.; HEIN, P. R. G.; ANDRADE, J. M; NAPOLI, A. Potential of Near-Infrared Spectroscopy for distinguishing charcoal produced from planted and native wood for energy purpose. **Energy & Fuels,** v. 31, n. 2, p.1593−1599, 2017. DOI 10.1021/acs.energyfuels.6b02446.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2001. ISBN 85-277-0641-5.

REIS, R. N. N.; DICKMAN, A. G. **Oficina sobre bases físicas da ressonância magnética**. Curitiba: Brasil Publishing, 2019. 144p.

ROIG, F.A. **Dendrocronologia em América Latina**. Mendonza: EDIUNC, 2000.

ROSÁRIO, M. M. T.; NOLETO, G. R.; BENTO, J. F.; OLIVEIRA, M. B. M.; PETKOWICZ, C. L. O. Effect of storage xyloglucans on peritoneal macrophages. **Phytochemistry**, v. 69, p. 464-472, 2008. DOI 10.1016/j.phytoch em.2007.08.011.

SANTOS, A. O.; UEDA-NAKAMURA, T.; DIAS FILHO, B. P.; VEIGA JUNIOR, V.; PINTO, A. C.; NAKAMURA, C. V. Effect of Brazilian copaíba oils on *Leishmania amazonenses*. **Journal of Ethnopharmacology**. v. 120, n. 2, p. 204-208, 2008. DOI 10.1016/j.jep.2008.08.007.

SANTOS, J. C. dos; LEITE, A. C. P.; WADT, L. H. de O.; BORGES, K. H.; ANDRADE, F. G.; MENEZES, R. S.; MUNIZ, P. S. B. **Demandas tecnológicas para o sistema produtivo de óleo de copaíba (*Copaifera* spp.) no Estado do Acre**. Documentos 69, Rio Branco, Acre, 2001. 20p. Disponível em: http://iquiri.cpafac.embrapa.br/pdf/doc69.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

ScienceDirect® – Elsevier. Termo de busca: *Copaifera*. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/. Acesso em: 16 set. 2021.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near components infrared spectra of wood and wood. **Near Infrared Spectrosc,** v. 19, p. 287-308, 2011. DOI 10.1255/jnirs.955.

SECCO, C. B. **Detecção de ocos em toras utilizando métodos de propagação de ondas ultrassônicas.** 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/RE POSIP/256876/1/ Secco_ChiaraBarros_ M.pdf. Acesso em: 13 set. 2021.

SECCO, C. B.; GONÇALVES, R.; CERRI, D. G.; VASQUES, E. C.; BATISTA, F. A. F. Behavior of ultrasonic wave propagation in presence of holes. **CERNE**, v. 18, n. 3, 2012. DOI 10.1590/S0104-77602012000300019.

SENEDESE, J. M.; FURTADO, R. A.; TAVARES, D. C.; BASTOS, J. K. Chemopreventive effect of *Copaifera reticulata* oilresin on 1,2dimethylhydrazine-induced preneoplastic lesions in Rat colon. **Clinical Therapeutics**, v. 37, n. 85, Suppl., p. 93, 2015. DOI 10.1016/j.clinthera.2015.05.267.

SILVA, A.; SOARES, A. C.; CABRAL, M.; ANDRADE, A. R. P.; SILVA, M. B. M.; MARTINS, C. H. G.; VENEZIANI, R. C. S.; AMBRÓSIO, S. R.; BASTOS, J. K.; HELENO, V. C. G. Antitubercular activity increase in labdane diterpenes from *Copaifera* oleoresin through structural modification. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 7, p. 1106-1112, 2017. DOI 10.21577/0103-5053.20160268.

SILVA, L. A. DA; PERES, S. M.; BOSCARIOLI, C. **Introdução à mineração de dados com aplicações em R**. 1. ed., Série SBC – Sociedade Brasileira de Computação. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2016.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânico**s. 7. ed. [Reimpr.], Rio de Janeiro: TLC, 2015.

SODRÉ, G. A.; LIMA, H. R. R.; PERDIGÃO, L. T.; LIMA, N. R. W. Construção de conceitos biológicos de espécie e plasticidade fenotípica com base em uma aula teórico-prática com duas espécies de boldo. **Revista Ciências & Ideias**, v. 10, n. 1, 2019. Disponível em: https://revistascientificas.ifrj.edu.br/revista/index.php/reci/article/view/913. Acesso em: 14 set. 2021.

SONG, YI-QIAO. Magnetic Resonance of Porous Media (MRPM): A perspective. **Journal of Magnetic Resonance**, v. 229, p. 12-24, 2013. DOI 10.1016/j.jmr.2012.11.010.

TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBI, C. Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat-treated woods by artificial neural networks. **Measurement**, v. 49, p. 266–274, 2014. DOI 10.1016/j.measurement.2013.12.004.

TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. 2011. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas: 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/256889. Acesso em: 14 set. 2021.

TRINDADE, R. DA; SILVA, J. K. DA; SETZER, W. N. *Copaifera* of the Neotropics: A review of the phytochemistry and pharmacology. **Int. J. Mol. Sci**, v. 19, 1511, 2018. DOI 10.3390/ijms19051511.

TSEHAYE, A.; BUCHANAN, A. H.; WALKER, J. C. F. Selecting trees for structural timber. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, Springer Berlin, p. 162-167, 2000a.

TSEHAYE, A.; BUCHANAN, A. H.; WALKER, J. C. F. Sorting of logs using acoustics. **Wood Science and Technology**, Springer Berlin, p. 337-344, 2000b.

TODESCATTO, T. **Física Radiológica para Técnicos em Radiologia**. 1. ed. São Paulo: agBook, 2016. Disponível em: https://issuu.com/tiagotodescatto0/docs/f__sica_radiol__gica_o_livro. Acesso em: 13 set. 2021.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **J Wood Sci**., v. 61, p. 213-220, 2015. DOI 10.1007/s10086-015-1467-x.

TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. A Review of Recent Near-Infrared Research for Wood and Paper (Part 2). **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 48, p. 560-587, 2013. DOI 10.1080/05704928.2011.621079.

VALADAS, L. A. R.; GURGEL, M. F.; MORORÓ, J. M.; FONSECA, S. G. C.; FONTELES, C. S. R.; CARVALHO, C. B. M.; FECHINE, F. V.; RODRIGUES NETO, E. M.; FONTELES, M. M. F.; CHAGAS, F. O.; LOBO, P. L. D.; BANDEIRA, M. A. M. Dose-response evaluation of a copaíba-containing varnish against streptococcus mutans in vivo. **Saudi Pharmaceutical Journal.** v. 27, n. 3, p. 363-367, 2019. DOI 10.1016/j.jsps.2018.12.004.

VALLADARES, F.; WRIGHT, S. J.; LASSO, E.; KITAJIMA K.; PEARCY, R. W. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a panamanian rainforest source. **Ecology**, v. 81, n. 7, p. 1925-1936, 2000. DOI 10.1890/0012-9658(2000)081[1925:PPRTLO]2.0.CO;2.

VEIGA JUNIOR, V., F.; PINTO, A., C. O gênero *Copaifera* L. **Quím. Nova**, v. 25, n. 2, p. 273-286, 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/qn/v25n2/10455.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

WALKER, M. G. Acoustic measurements on standing tress, logs and green lumber. **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 205-216, 2006. DOI 10.1007/s00226-005-0038-5.

WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A. Mecanismos de aclimatação das plantas à elevada concentração de CO^2. **Cienc. Rural**, v. 45, n. 9, p. 1564-1571, 2015. DOI 10.1590/0103-8478cr20140527.

WANG, X.; DIVOS, F.; PILON, C.; BRASHAW, B. K.; ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. **Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: A guide for use and interpretation**. United States Departament of Agriculture, USA, 2004, 12p. Disponível em: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr147.pdf. Acesso em: 13 Sept. 2021.

XIAOCHEN, D.; JIAJIE, L.; HAILIN, F.; SHENGYONG, C. Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves. **Appl. Sci.**, v. 8, 1778, 2018. DOI 10.3390/app8101778.

ZHANG, JIN; XU, QING-FENG; XU, YI-XIANG; ZHANG, MING. Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood. **Journal of Zhejiang University-Science A**, v. 16, n. 7, p. 541–550, 2015. DOI 10.1631/jzus.A1400276.

ZIMMER, J. E.; COST, J. R. Determination of the elastic constants of a unidirectional fiber composite using ultrasonic velocity measurements. **J. Acoust Soc Am.** v. 47, n. 3B, p.795-803, 1970. DOI 10.1121/1.1911962.

WEHRHAUSEN, M.; LAUDON, N.; BRÜCHERT, F.; SAUTER, U. H. Crack detection in computer tomographic scans of softwood tree discs. **Forest Products Journal**, v**.** 62, n. 6, p. 434-442, 2012. DOI 10.13073/FPJ-D-12-00079.1.

WWF-Brasil. **Apoiando a implementação de áreas protegidas: experiências em 10 anos de atuação do WWF-Brasil no sudoeste da Amazônia**. / WWF-Brasil. – Brasília: WWF-Brasil, 2017. 122 p.: il. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/relatorio10_anos_completo_25_04_2017.pdf. Acesso em: 15 dez. 2021.

CAPÍTULO II:
OLEORESIN PROSPECTION IN *Copaifera* sp. TREES BY USING IMPULSE TOMOGRAPHY[1]

HIGHLIGHTS

The impulse tomography has the potential to be used for the prospection of oleoresin reservoirs.

Oleoresin reservoirs were identified only at the level of the DBH.

Trees with hollow at early stage may have oleoresin content.

53.3% of the trees of this natural population did not present internal defects in the trunk.

[1] MARTINS, B. C.; SANTOS, G. C. V.; LATORRACA, J. V. F. Oleoresin prospection in *Copaifera* sp. trees by using impulse tomography. CERNE. v. 27, 2021, e-102831. DOI 10.1590/01047760202127012831.

ABSTRACT

Copaíba oil (*Copaifera* L.) is a raw material used by pharmaceutical, cosmetic, and energy industries. However, the difficulty in locating the oleoresin reservoirs, is an obstacle to its continued supply, affecting the sustainable commercialization of the product. So, the potential of impulse tomography for prospecting oleoresin reservoirs in the trunk of 18 *Copaifera* sp. trees was tested, in cross-sections at heights levels 0% (DBH), 25%, 50%, 75%, and 100% (1st fork). The impulse tomography prospections (ITP) were performed only at the 0%, in others 12 trees, because of the risk associated with climbing hollow trees. In total 30 trees were tested. Altogether 102 tomograms were analyzed obtaining: average mechanical wave propagation speed (aMPS), minimum mechanical wave propagation speed (minS) and maximum mechanical wave propagation speed (maxS), prospecting height (Hp%) and total tree height (Ht), diameter at the Hp% (Dhp), and low speed mechanical wave propagation percentage areas (LSa%). These variables were analyzed using multivariate analysis. The reservoirs were located exclusively at DBH and confirmed by borer prospection increment in 26.7% of the trees. ITP resulted in 37.3% of correct answers and 62.7% of errors, considering the 99 tomograms. However, it was found that the ITP is efficient to indicate sections for which no significant reservoir or hollow presence is expected to be found. The analysis of the main components showed that, except for Ht, the components are good indicators for the location of the reservoirs. We were able to use tomography to search reservoirs with a significant amount of oleoresin, identify hollow trees, and indicate the exclusion of trees that do not have reservoirs or other alterations.

Keywords: Copaíba, Forest resources, Non-destructive methods, Stress wave, Technology.

RESUMO

O óleo de copaíba (*Copaifera* L.) é uma matéria-prima utilizada pelas indústrias farmacêutica, cosmética e energética. No entanto, a dificuldade de localização dos reservatórios de oleorresina, é um entrave ao seu abastecimento continuado, afetando a comercialização sustentável do produto. Assim, o potencial da tomografia de impulso para a prospecção de reservatórios de oleorresina no tronco de 18 *Copaifera* sp. árvores foram testadas, em seções transversais nos níveis de altura 0% (DAP), 25%, 50%, 75% e 100% (1ª bifurcação). As prospecções por tomografia de impulso (PTI) foram realizadas apenas a 0%, em outras 12 árvores, devido ao risco associado à escalada em árvores ocas. No total, 30 árvores foram testadas. Ao todo 102 tomogramas foram analisados, obtendo-se: velocidade média de propagação de ondas mecânicas (aMPS), velocidade mínima de propagação de ondas mecânicas (minS) e velocidade máxima de propagação de ondas mecânicas (maxS), altura de prospecção (Hp%) e altura total da árvore (Ht), diâmetro em Hp% (Dhp) e áreas percentuais de propagação de ondas mecânicas de baixa velocidade (LSa%). Essas variáveis foram analisadas por meio de análise multivariada. Os reservatórios estavam localizados exclusivamente no DAP e confirmados pelo incremento da prospecção da broca em 26,7% das árvores. O ITP resultou em 37,3% de acertos e 62,7% de erros, considerando os 99 tomogramas. No entanto, verificou-se que o ITP é eficiente para indicar seções para as quais nenhum reservatório significativo ou presença de oco são esperados. A análise dos componentes principais mostrou que, exceto para Ht, os componentes são bons indicadores da localização dos reservatórios. Pudemos usar a tomografia para pesquisar reservatórios com uma quantidade significativa de oleorresina, identificar árvores ocas e indicar a exclusão de árvores que não possuem reservatórios ou outras alterações.

Palavras-chave: Copaíba, Recursos florestais, Métodos não destrutivos, Onda de estresse, Tecnologia.

INTRODUCTION

Trees of the *Copaifera* L. genus, classified in the botanical family Leguminosae and Detarioideae subfamily (Azani et al., 2017), have the natural capacity of producing oleoresin, an extractive that is used in various industrial segments for multiple purposes. This substance is composed of resin and essential oils (Pieri et al., 2009). Between 1996 and 2018, 349.7 tons of oleoresin were officially produced in Brazil annually, on average (IBGE, 2020).

According to Rodrigues et al. (2011), oleoresin is produced by secretory glands and accumulates itself in the lumen of secretory channels, distributed along the xylem. These findings were corroborated by Carvalho et al. (2018), Medeiros (2016), Plowden (2003, 2004), and Marcati et al. (2001).

The storage of this content may occur in different parts of the trunk, and there is practical evidence of the occurrence of oil-resiniferous reservoirs (“pockets”) that may or may not interconnect (Medeiros, 2016). Ascensão (2007) explained that the plastic deformation of the lumen of the epithelial cells of the secretory channels occurs due to the pressure of the extractive accumulation.

For this reason, probably the presence of large internal areas with oleoresins overflow, hollow and/or fissures represent reservoirs that can be located through technological prospecting.

The study of the internal qualities of trees, such as the presence of hollow sections inside trunks, has been facilitated by the application of methods that employ acoustic wave propagation techniques that can also be used for the evaluation of wood properties, aiming at the improvement of its use (Liu e Li, 2018; Perlin et al., 2015; Arciniegas et al., 2014). To determine the structural integrity of the trees and to evaluate the risk of their fall, or their parts, to prevent accidents, the use of tomography is indicated (ABNT, 2019; Bucur, 2005).

Impulse tomography is based on the propagation of mechanical stress waves generated from hammer shocks (Mendes and Silva Filho, 2019; Carrasco et al., 2017; Castro, 2011). The emission and capture of signals, which result in time and distance information, with which propagation speed is calculated, is done by sensors attached to the trunk by metal nails (Heidelberg, 2011).

Wood quality and its intraspecific variability can be studied to understand the mechanisms of trees development, in terms of structure, shape, and biological functioning (Arciniegas et al., 2014). The results of several acoustic tomography studies have already demonstrated that the graphic representations (tomographic images) and wave paths obtained from cross-sections of the tree trunk are largely correlated with the internal condition of deterioration or existing defects (Xiaochen et al., 2018; Secco et al., 2012; Pereira et al., 2007).

Other studies validated the use of tomography to determine the physical properties of wood, such as resistographic amplitude (Rollo et al., 2013), moisture content (Putri et al., 2017); Latorraca et al., 2011), and mechanical properties (Young and shear modulus) (Gonçalves et al., 2014; Gonçalves et al., 2011; Sedik et al., 2010), elasticity modulus (Carrasco et al., 2017), knots interference, juvenile wood, and reaction wood (Palma et al., 2018). Also, research was carried out to determine the pith´s location (Perlin et al., 2018) and address aspects related to wood anisotropy (Perlin et al., 2019; Arciniegas et al., 2014).

Considering the technological potential of this inspection technique, this study aimed at prospecting oleoresin reservoirs in the stem of native *Copaifera* trees through impulse tomography.

MATERIAL AND METHODS

Characterization of the site

The site under study is in western Amazon, in the state of Acre – Brazil (Figure 1). The climate in this region is characterized as equatorial, with three well-defined seasons: drought (June–August), rainy (October–April), and a transition period in May and September (Duarte, 2017). The soils are dystrophic, deep, and well-drained, classified as Oxisols. In general, the landscape presents a flat to gently undulating relief and the prevailing vegetation cover are Open Forest with Bamboo, Open Forest with Palm and Dense Forests (ACRE, 2010), besides anthropized areas.

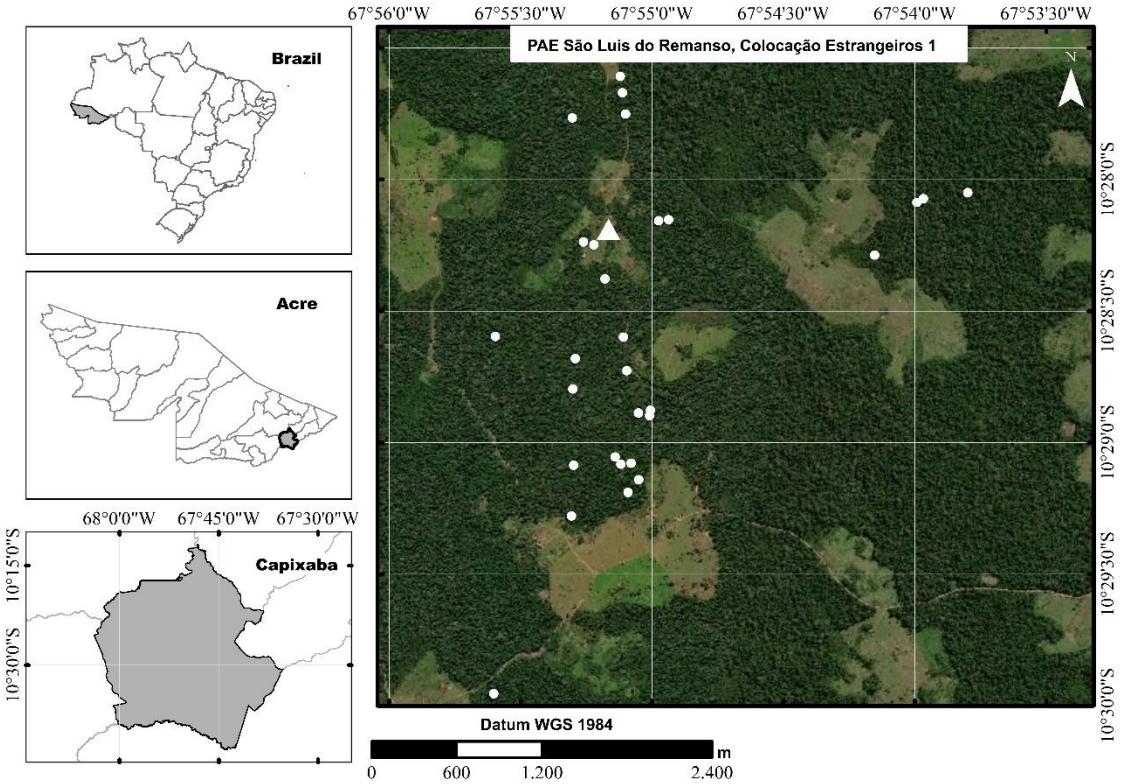


Figure 1. Population site of *Copaifera* sp. prospected using impulse tomography.

Caption: ○ = copaíba trees; Δ = base residence.

Data acquisition

The impulse tomography prospections (ITP) were conducted in September 2018 and July 2019. The used procedures followed the recommendation by Heidelberg (2011) and the adaptations of Castro (2011) and Perlin et al. (2015) methods. Thirty trees were evaluated using the Arbotom® mechanical pulse tomograph, with eight sensors. According to Arciniegas et al. (2014), at least six sensors are required to detect internal defects.

ITP was performed longitudinally across the trunk of 18 trees, in cross-sections, at five prospection height levels (Hp%), from DBH (1.30 m from the ground surface or diameter at breast height), 100% (first stem bifurcation) and 25%, 50%, 75%, determined form the DBH. For this, climbing and rappelling equipment was used, and two climbers collaborated. In 12 other trees, the ITP was performed at DBH, due to the risk associated with climbing hollow trees, the existence of physical impediments (vines, swarms, and others), or the difficulty to install the climbing equipment.

The configuration used in Arbotom® tomograph for the reconstruction of the images consisted of a) velocity filter: 50 to 4000 m/s; b) color model: purple-red-yellow-green; c) 2D resolution = 5 mm; d) selection of the faster mean value and distribution analysis; e) correction of standard deviation and maximum standard deviation = 1; f) diffuse porosity. Each tomogram has been configured according to its mechanical wave propagation speed (MPS) scale. For the validation of the prospection, samples were extracted from the wood using a Pressler auger, in the radial direction, taken according to the interpretation of the tomograms, immediately after performing the ITP. When the reservoirs were located, oleoresin samples were collected, for 15 minutes, in the same drilling done by the Pressler auger. Areas of interest were those that, in the scale (MPS *vs*. colors), presented pink, red, and orange pigmentation because they were associated to low speeds, in contrast to yellow and green, associated to highest speeds.

Data analysis

We analyzed 102 tomograms obtained through an inversion algorithm that generates line graphs and 2D graphs, based on 56 mechanical wave paths. Tomograms that showed inconsistent readings, related to percentage prospecting height level (Hp%) 75% and 100% from tree 9 and (Hp%) 0% from tree 10, were excluded. Therefore, statistical analysis was performed using information from 99 tomograms.

The percentage of hits and misses of tomography impulse were verified, adopting three conditions as the categorization criteria (Table 1). The categories identified for the internal condition of the cross-sections of the trunks of *Copaifera* were defined from the condition indicated on the tomography before drilling, from the condition verified through the translation and through the type of characteristic identified (hollow or reservoir). The evaluation by criteria was adopted in the segmentation of the different characteristics of the stem of the trees, aiming to identify the characteristic of interest of the study (reservoir correctly identified by tomography (P-PR) and by probing) of the other conditions found.

Table 1. Categorization criteria for the condition of the cross-sections of the trunks of *Copaifera* sp.

Category	Condition			
	Before	After	Feature	
			Hollow	Reservoir
P-PH	1	1	1	0
P-PR	1	1	0	1
P-PHR	1	1	1	1
P-AHR	1	0	1	1
A-AHR	0	0	1	1
A-PHR	0	1	1	1

Caption: 1 = presence; 0 = absence; Before = before prospecting drilling; After = after prospecting drilling; Hollow = hollow in the trunk; Reservoir = oleoresin reservoir; P = presence of hollow or reservoir; A = absence of hollow or reservoir. Each letter of the category corresponds to one of the conditions presented in the table, for example: P-PH = Presence of hollow before and after prospecting drilling.

The percentage of areas with low-speed propagation of mechanical wave (LSa%) was quantified, grouping the trees according to the following classes: a) LSa% ≤ 20% = low; b) 20% < LSa% ≤ 30% = average; c) 30% < LSa% ≤ 50% = high; d) LSa% > 50% = very high. The classes adopted were established, adapting the classification proposed by Rollo (2013). The Arcmap 10.6.1 software (ESRI, 2018) was used to measure LSa%.

The variables were tested for multivariate normality distribution, Pearson's correlation, and Principal Component Analysis (PCA). The variables data were centered at zero and rescaled to unit variance. For the PCA, Ferreira (2018) and Valentin (2012) guidelines were followed. The data mining was performed in the Paleontological Statistics – Past 4.02 software (Hammer et al., 2001).

Regarding the components of interest for ITP, the variables MPS = mechanical wave propagation speed (m/s); aMPS = average; Ht = total tree height (m); Hp% = prospecting heights (%); minS = minimum mechanical wave propagation speed (m/s); maxS = maximum

mechanical wave propagation speed (m/s); Dhp = diameter in Hp% (cm); LSa% = percentage of area with low speeds of mechanical wave propagation (%) were considered, and organized in a 7 x 99 dimension matrix (variables x observations).

The longitudinal tomographic profiles of the prospected trees, which had reservoirs, were elaborated using Adobe Photoshop software, version 20.0.0.

RESULTS

Considering the five-prospection height levels and the 56 wave paths, which constitute each tomogram, the statistic amplitude of the MPS was 3130 m/s, the minimum MPS 106 m/s, and the maximum MPS was 3236 m/s.

The dendrometric aMPS and LSa% characteristics of the studied trees are available in Table 2. The LSa% analysis from the DBH tomograms section showed that 50% of the trees have less than 20% of the area affected by low speed and belong to the low LSa% category, 7% to the medium LSa%, 30% to the high LSa%, and 13 % to the very high LSa%. At DBH, aMPS varied between 304 m/s and 1123 m/s, their respective standard deviation (Sd) and coefficient of variation (CV) showed high values. It was found that the linear correlation between DBH and Ht is negligible ($R = 0.37$, $R^2 = 0.14$, $p = 0.045$) as well as Dhp and Hp% ($R = -0.3751$, $R^2 = 0.1589$, $p = 0.00012$).

Table 2. Dendrometric and mechanical wave propagation speed parameters in the DBH of trunks of copaíba trees (*Copaifera* sp.), transversal plane.

Tree	DBH (cm)	Ht (m)	Speed across (m/s)					LSa %
			aMPS	Sd (±)	CV (%)	minS	maxS	
A01	90.72	19.40	482	333	69.02	198	1586	30.4
A03	52.52	23.00	412	309	29.92	106	819	13.6
A08	153.43	31.50	804	342	51.55	406	1728	33.0
A09	34.70	20.80	403	248	24.24	218	743	7.0
A11	53.16	23.37	429	189	23.24	172	673	19.2
A17	104.41	32.00	939	137	29.73	455	1722	15.3
A18	70.03	27.00	1123	290	33.46	443	2012	1.4
A19	71.62	26.00	764	388	50.78	262	1995	0.0
A20	64.62	29.30	622	322	40.49	216	1457	30.4
A21	52.84	26.50	939	333	39.64	336	1755	0.0
A22	86.58	31.00	871	342	41.10	337	1646	0.0
A23	53.16	23.38	820	279	37.37	381	1554	7.6
A25	77.35	21.55	599	407	56.83	406	1728	33.3
A27	92.63	30.00	534	372	54.31	220	1030	76.7
A28	109.18	27.00	785	358	55.38	266	1492	50.6
A29	92.31	31.00	758	307	42.47	233	2114	31.1
A04^{r}	64.30	33.80	492	165	62.92	145	1504	27.4
A05^{r}	79.58	27.00	439	98	37.54	171	817	4.73
A13^{r}	66.21	20.30	451	188	44.93	263	1280	60.6
A14^{r}	74.80	30.38	501	209	49.57	166	1547	65.7
A02^{h}	43.93	28.00	508	123	72.73	164	1662	46.2
A06^{h}	120.96	26.00	356	100	53.25	114	693	14.7
*A10^{h}	29.92	19.50	-	-	-	-	-	-
A16^{h}	145.79	33.00	484	189	33.33	302	1141	30.4
A15^{h}	143.88	32.00	389	161	53.67	166	935	2.4
A26^{h}	113.32	35.00	423	252	32.31	293	1600	23.3
A07^{hr}	178.89	22.00	304	90	94.52	257	1030	32.0
A12^{hr}	112.37	23.15	371	287	24.31	177	607	32.9
A24^{hr}	110.14	30.00	530	376	35.72	260	973	11.9
A30^{hr}	149.61	30.00	620	340	53.80	298	1589	13.9

Caption: * The tree tomogram was excluded; Ht = total tree height (m); DBH = diameter at breast height (cm); aMPS = average mechanical wave propagation speed (m/s); Sd= standard deviation; CV = coefficient of variation (%); minS = minimum MPS (m/s); maxS = maximum MPS (m/s); MPS = mechanical wave propagation speed; LSa% = percentage of area with low speeds of mechanical wave propagation (%); r = reservoir; hr = hollow and reservoir; h = hollow.

ITP resulted in 37.3% of correct answers and 62.7% of errors, considering the 99 tomograms. The errors represent the percentage of tomograms that seemed to mistakenly indicate the existence of reservoirs, hollows, or internal fissures. Therefore, they were classified in the P-AHR category. The correct answers were distributed as follows: P-PH (3.0%), P-PR (8.1%), P-PHR (3.0%), and A-AHR (23.2%). Associating the results of the A-AHR and A-PHR (0%) criteria, it was found that ITP is efficient in the function of discarding sections where there is no significant reservoir or the presence of hollow. The A-AHR category considered the possibility that the tomogram would indicate the absence of a cavity or reservoir. Later, this condition would be confirmed by the auger. In addition, there was also no category A-PHR, which admitted the possibility that the tomogram showed the absence of a cavity or reservoir and the auger showed the presence of these conditions.

Table 3 presents the PCA summary, where the primary axes (PC1, PC2, and PC3) explain 68.63% of the variation between the seven components combined in this study. PC1 shows the relationship between maxS., aMPS, minS and the main component of greater explanation (27.87%).

Table 3. Proportion of the total variance explained by the compensations between components of interest from the ITP, eigenvalues (λi), and loads in explanatory percentages (%) of the PCA axes.

PCA Summary				Loadings						
PC	λ	%	% accumulated	aMPS	Ht	Hp%	Dhp	minS	maxS	LSa%
1	1.95	27.87	27.87	**0.54**	0.04	-0.08	0.25	**0.41**	**0.64**	0.26
2	1.66	23.77	51.64	-0.31	0.17	**-0.53**	**0.59**	-0.18	-0.11	**0.45**
3	1.19	16.99	68.63	0.37	**0.69**	-0.16	0.13	-0.33	-0.02	**-0.49**
4	0.82	11.78	80.41	-0.23	0.63	0.60	-0.03	0.18	-0.03	0.40
5	0.73	10.45	90.86	0.10	-0.22	0.39	0.14	-0.79	0.34	0.19
6	0.48	6.92	97.78	-0.01	-0.21	0.42	0.74	0.21	-0.21	-0.37
7	0.15	2.22	100.00	0.65	-0.09	0.05	-0.02	-0.05	-0.64	0.40

Caption: aMPS = average mechanical wave propagation speed (m/s); Ht = total tree height (m); Hp% = prospecting heights (%); Dhp = diameter in Hp% (cm); minS = MPS minimum (m/s); maxS = MPS maximum (m/s); MPS = mechanical wave propagation speed; LSa% = percentage of area with low speeds of mechanical wave propagation (%).

It is observed that the tomograms of the cross-sections that presented an oleoresin reservoir were grouped in the characteristic quadrants by low aMPS (Figure 2). In the PC2 axis, the strong and positive charges highlighted Dhp and LSa%, and the negative charges highlighted the Hp%. The sections with the absence of reservoirs can be observed in the entire trunk but rarely when there is a predominance of lower aMPS. In PC3, the latent variables Ht and LSa% complement the set of variables that explain the variance ordering structure. Despite the important role of LSa% confirmed in the PCA, there was a great variation (4.73% - 65.7%) of this parameter in the trees with reservoirs.

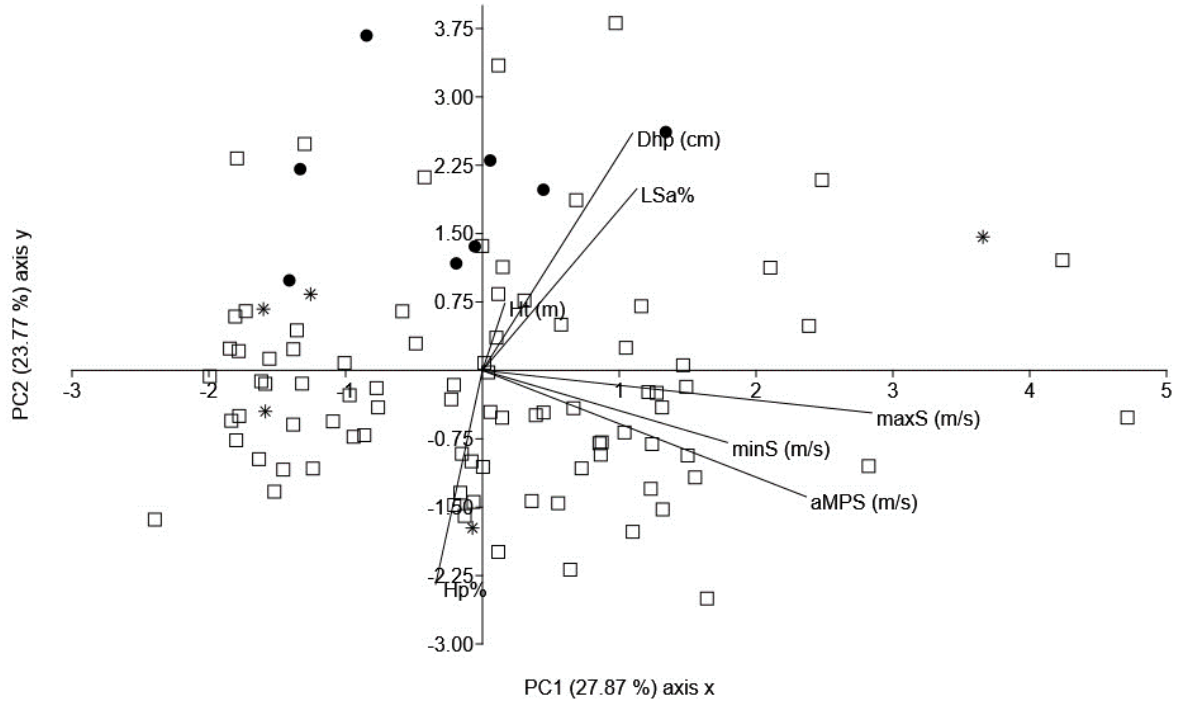


Figure 2. Biplot analysis of main components (PC1 and PC2) and grouping by tomograms of the cross-sections of *Copaifera* sp. trees similarities. Caption: Sections with oleoresin reservoirs are represented ●; sections with oleoresin ∗; and sections without oleoresin □.

Among 99 tomograms analyzed, eight were had reservoirs (8.1%), of which four (4%) coincided with hollow regions. Another two (2%) contained fissures, and eighty-nine (89.9%) did not present any of these conditions in the position verified by the Pressler auger.

Taking into consideration only the height of the DBH of the 30 trees, the oleoresin reservoirs were located in eight (26.7%), allowing to obtain expressive volumes of oleoresin (A04 = 3600 mL, A05 = 50 mL, A12 = 40 mL, A13 = 1600 mL, A14 = 2300 mL, A24 = 50 mL and A07 and A30 <20 mL). Altogether, ten trees were hollow (20%), but four (13.3%) were identified as hollow trees with oleoresin reservoirs. These reservoirs were not found in other Hp% of the trunks. Thus, 53.3% of the tree did not present internous discontinuities.

The sampling effort used (five heights levels) and the results obtained do not allow us to state that there are no “pockets” of oleoresin at different heights from DBH. Even fissures at a

height of 25% and, in some cases, regions with oleoresin odor were identified. Also, it was possible to monitor and verify that, at 25%, 50%, and 100% heights, 34% of the trees drained or continued to drain oleoresin after 19 months, since the first prospection, despite the pin used to interrupt the drilling holes of the perforations.

The tomogram of transversal sections along the trunk of the trees, with potential main oleoresin reservoirs are shown in Figure 3.

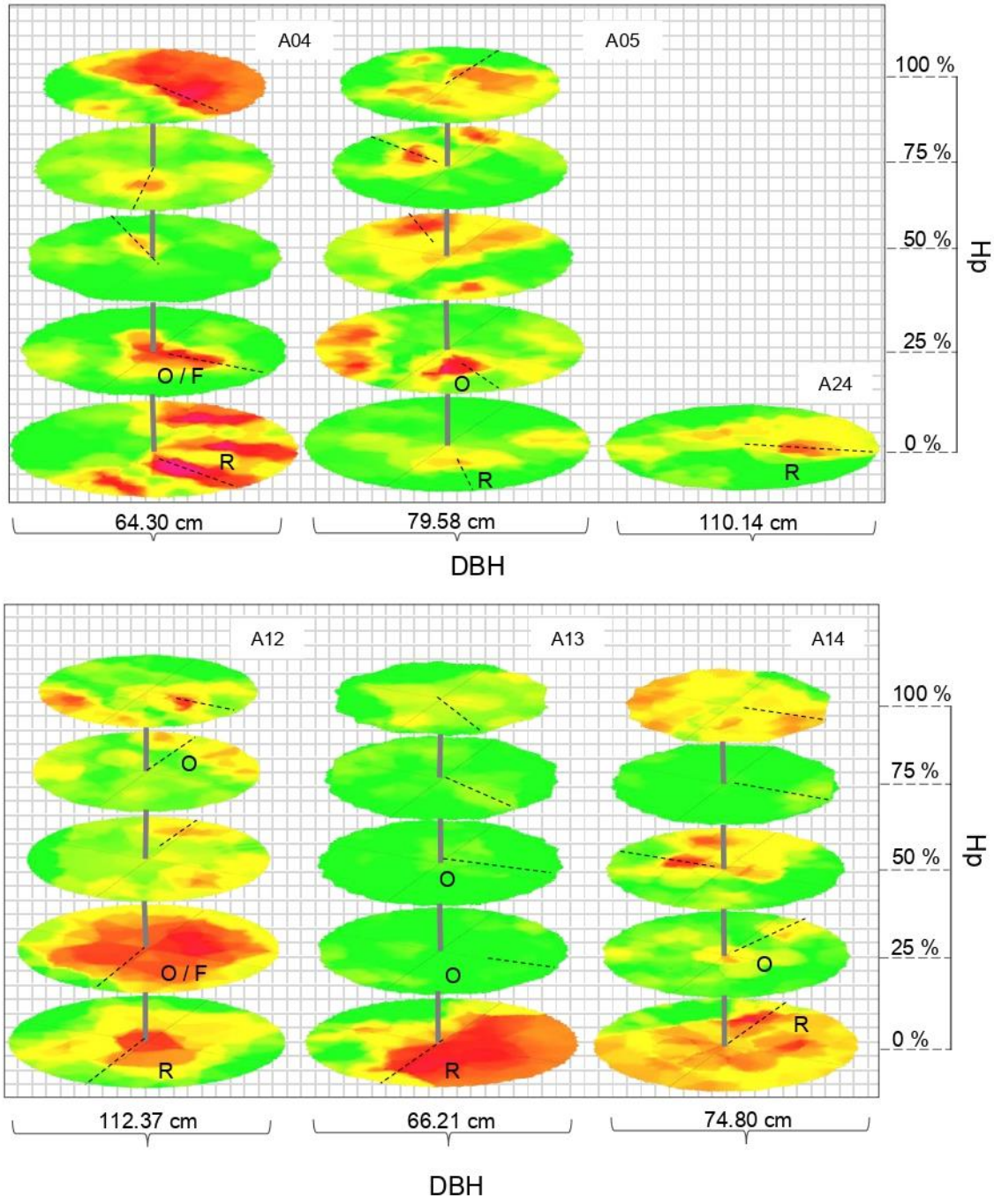


Figure 3. Tomogram of transversal sections along the trunk of *Copaifera* sp. trees, in which oleoresin reservoirs were identified. Caption: a) diameter at breast height level (DBH); b) percentual height level of prospection (Hp%); ---- = radial core removal direction (RRD); O = Hp% with indication of oleoresin occurrence; F = Hp% with fissure; R = oleoresin reservoirs occurrence in the DBH, in the region indicated by the RRD.

DISCUSSION

The percentage of errors and success obtained indicate that the occurrence of low MPS (pink, red, and orange colors) is a good criterion to choose the appropriate trunk drilling location and oleoresin extraction.

However, it is important to note that, on a tomogram, the colors did not exactly correspond to the size of the internal anomaly or its exact location. The portions are represented by high speeds (in this case, yellow and green colors) consistently illustrated mechanically cooperating portions (Heidelberg, 2004). Moreover, as can be seen in Figure 3 (A05), even areas of orange-yellow colors may represent a reservoir, and areas characteristically orange or red do not necessarily represent a reservoir or hollow.

The performance of additional physical studies may contribute to the reduction of the percentage of errors (62.7%), considering that it is possible that there are cracks, or even initial reservoirs, in displaced positions, that a single probe was not able to access. This research proposed a method of verifying the potential of impulse tomography (a survey by Hp%), seeking to minimize the impact on the individuals studied, due to the fact that they are native trees and constitute a population distributed over a wide geographical space, that is, of great ecological importance.

Those with predominantly low MPS, but not confirmed as reservoir indicators, can be explained by understanding different factors. For example, mechanical wave propagation is strongly influenced by the mechanical properties, density, and modulus of elasticity wood (Schimleck et al., 2019; Vidaurre et al., 2013).

This effect could also be explained by the variation of the moisture content (MC%) of the wood at the time of the tomography (Bucur, 2005). Latorraca et al. (2011) checking the relationship between moisture content (MC%) of wood and MPS from *Pinus caribaea*, concluded that moisture influences the formation of the tomographic image and that higher

MC% results in lower MPS. Longitudinally, the authors observed that the humidity in the higher zone discs was higher than in the lower zone discs. This behavior was not observed in copaíba trees in our study.

Another important factor is the wood density variation. Alves et al. (2013, p.12) concluded that “the increase in density provides a higher value of MPS in the normal direction of the fibers”, but “density is not the only parameter to affect speed”. But, high density woods with a lot of discontinuities do not have high velocity of wave propagation. For Bucur (2006), this issue a little more complex, because she observed that can be an increase in velocity with the increase in density, as well as a reduction in velocity with the increase in density, and there can be independence between these two factors. Fathi, Nasir and Kazemirad (2020), used guided wave propagation and artificial neural network to predict the mechanical properties of wood, and stated that wave velocity is highly sensitive to the moisture content, density, and mechanical properties of wood.

The mechanical wave propagation is strongly influenced by mechanical properties, density, and modulus of elasticity. In this sense, it is important to consider the arguments of Vidaurre et al. (2013) regarding the influence of tension wood formation on wood properties in trees. Tension wood can occur in tropical trees that are not inclined, when the spacing is denser, due the movement of the canopy to obtain light (Timell, 1986; Warenjö, 2003 Apud Vidaurre et al., 2013, p. 27). Mendes and Silva Filho (2019) found that impulse tomography was efficient in identifying zones with different densities, related to tension wood.

Vidaurre et al. (2013) found that the modulus of elasticity (MoE) in medium flexion, a mechanical property of tension wood, was higher at all humidity levels, compared to normal wood, due to the gelatinous layer present in the secondary fibers wall, although its effect on the basic density is not significant, because the tension wood has no significant influence on the cell wall proportion (Vidaurre et al., 2013).

The tropical forest species, with defects and structural irregularities, besides their specific mass, will have a variable modulus of elasticity (Moreschi, 2012). Mechanical wave

propagation speed is influenced by MoE and density. MoE is influenced by the species, moisture content, width of the growth rings, position of removal of piece along the tree stem, percentage initial and latewood and differentiation between juvenile and adult wood, as well as external influences (Cunha and Mattos, 2010).

Also, in the context of the formation of the tension wood, the location of the pith, influenced by the eccentricity of the stem (displacement of the pith out of the center), affects the result of the stem of trees quality evaluation, because it has a great influence on the wood anisotropy.

It is necessary to consider that anisotropy plays a major role in the construction of tomographic images. According to Perlin et al. (2015), anisotropy and hygroscopic behavior of wood should be considered when using tomography to locate internal heterogeneity.

It is argued that the location of the pockets, exclusively in the region of the DBH, may originate from phenomena that trigger the formation of hollows since they were not found in the higher levels Hp%. For Spatz and Niklas (2013), the formation of cavities in cross-sections, in some cases, can be understood as a natural strategy of evolutionary “engineering” that enables several plants to grow vertically without bending under their weight.

It is also necessary to evaluate the mechanical impact caused by forest mastofauna. Some animals have the habit of looking for the *Copaifera* trees in search of its fruits and oil itself when they are not fructifying (Shanley and Medina, 2005). This process can cause injuries to the stem, which is a gateway for xylophagous agents.

In research carried out in Indonesia, Putri et al., (2017) evaluated, through sonic tomography, the formation of resin in the wood of *Aquilaria malaccensis* Lam, verifying that areas damaged by the *Fusarium solani* fungus indicate the formation of resinous wood.

It cannot be ruled out, however, that both the positioning and the injuries size influence the probability of detecting deteriorated regions by using a tomographic image (Espinosa et al., 2020), and that prospecting with the Pressler auger may not have accessed the exact region of reservoirs location or deformations.

The reservoirs occurred in trees with DBH > 60 cm, coinciding with what was concluded by Martins et al. (2008), who found a possible non-linear relationship between DBH and oleoresin production. According to Martins et al. (2016) there is great individual morphological and physiological variation in *Copaifera* trees, which leads to a lack of definition regarding the establishment of a DBH in which there is a guarantee of obtaining oleoresin. The authors cite reports of productive trees with DBH> 35 cm.

A weak negative linear correlation was found between diameters and heights, which is an expected result. Roquette et al. (2018) attributed a similar result to the heterogeneity of the trees and the factors that affect growth. In practice, the diameter of the copaíbas slowly decreases as the height increases, giving the stem of *Copaifera* trees a cylindrical shape.

To achieve greater precision, it is necessary to understand more deeply different physical-mechanical, anatomical, and chemical parameters of the woody tissue of the *Copaifera*, as well as the environmental and ecological aspects and their interactions. According to Schimleck et al. (2019), advancement in non-destructive evaluation techniques will improve the understanding of the impact of wood properties on product performance.

CONCLUSIONS

Impulse tomography can safely indicate hollow trees and the exclusion of trees that do not have oleoresin reservoirs.

It can guide the prospecting of reservoirs with a capacity to supply a significant amount of oleoresin, even in hollow trees.

The correct answers of the ITP (37.3%) were obtained, mainly, at the time of the DBH, where the existence of the reservoirs was verified. The 62.7% of errors verified with the drilling occurred in the upper parts of the trunks where there was no identification of an oleoresin reservoir, such results indicate that further physical studies of *Copaifera* wood are necessary for a future improvement of the technique.

The low aMPS standard and LSa% are important indicators for determining the location of oleoresin reservoirs, but they should not be the only criteria for making decisions about trunk drilling.

It is recommended to perform the prospection with impulse tomography at the height of the DBH of the trees, due to the non-detection of significant reservoirs in higher Hp.

ACKNOWLEDGMENTS

Acre Federal University (UFAC), Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), Wood Quality and Anatomy Research Center (NPQM).

REFERENCES

ABNT NBR 16246-3: **Florestas urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas. Parte 3: Avaliação de risco de árvores**. 2019. 14p. ISBN 978-85-07-08192-0

ACRE – Governo do Estado do Acre. 2010. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. 2ª Ed. Rio Branco: Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), 356p. Available at: http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Documento_Sintese.pdf. Accessed in: July 24th 2020.

ALVES, R.C.; MARTINS, T.; CARRASCO, E.V.M. Influência da densidade na velocidade de propagação da onda em sete espécies de madeira tropicais. **Natural Resources**, v.3, n.1, pág. 6-13, 2013. doi: 10.6008/ESS2237- 9290.2013.001.0001

ARCINIEGAS, A.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L.C.; LASAYGUES, P. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. **Trees**, n.28, pág.1559-1567, 2014. doi: 10.1007/s00468-014-1062-6

ASCENSÃO, L. Estruturas secretoras em plantas. Uma abordagem morfo-anatómica. In.: Figueiredo, AC; Barroso, JG; Pedro, LG. **Potencialidades e Aplicações das Plantas Aromáticas e Medicinais**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 3ª Ed., 2007. ISBN: 978-972-9348-16-7 Available at: http://cbv.fc.ul.pt/PAM/PAM3_PAM1_Indice_Pagina_CBV.pdf. Accessed in: July 18th 2020.

AZANI, N.; BABINEAU, M.; BAILEY, C.D.; BANKS, H.; BARBOSA, A.R.; PINTO, R.B. et al. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. **TAXON**, v.66, n.1, pág. 44–77, 2017. doi: 10.12705/661.3

BUCUR, V. Ultrassonic tecniques for nondestrutive testing of standing trees. **Ultrasonics**. n.43, pág.237-239, 2005. doi: 10.1016/j.ultras.2004.06.008

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2nd Edition. ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. 399p. ISBN 978-3-540-30594-1

CARRASCO, E.V.M.; SOUZA, M.F.; PEREIRA, L.R.S.; VARGAS, C.B.; MANTILLA, J.N.R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira em função da inclinação das fibras utilizando tomógrafo acústico [*on line*]. **Matéria**, v.22 (Suppl. 1), 2017. doi: 10.1590/s1517-707620170005.0271

CARVALHO, D.C.; PEREIRA, M.G.G.P.; LATORRACA, J.V.F.; PACE, J.H.C.; SILVA, L.D.S.A.B.; CARMO, J.F. Dendrochronology and growth of *Copaifera langsdorffii* wood in the vegetative dynamics of the Pirapitinga Ecological Estation, state of Minas Gerais, Brazil. **Floresta**, v.8, n.1, pág.49-58, 2018. doi: 10.5380/rf.v48i1.49905

CASTRO, V.R.; FILHO, M.T.; ARIZAPANA, M.A.; SILVA, J.C.; SILVA FILHO, D.F.; POLIZEL, JL; BELINI, UL. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de teca (*Tectona grandis* L.f.) através da Tomografia de Impulso. **Floresta e Ambiente**, v.8, n.2, pág.144-152, 2011. doi: 10.4322/floram.2011.032

CUNHA, A.B.; MATOS, J.L.M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (*''stress wave timer''*). **Rev. Árvore**, v.34, n.2, pág.345-354, 2010. doi: 10.1590/S0100-67622010000200018

DUARTE, A.F. Climatologia das chuvas e efeitos antrópicos da urbanização na bacia do Rio Acre, Amazônia Ocidental. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ**. v.11, n.1, pág.199-213, 2017. Available at: https://www.acrebioclima.pro.br/abcpublications/Environment_and_Health/7609-26052-1-PB_30102017_M.pdf. Accessed in: July 24th 2020.

ESPINOSA, L.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L.; LASAYGUES, P. Quantitative parametric imaging by ultrasound computed tomography of trees under anisotropic conditions: Numerical case study. **Ultrasonics**. v.102, 2020. doi: 10.1016/j.ultras.2019.106060
ESRI, 2018. ArcGIS Desktop. Redlands, CA.

FATHI, H.; NASIR, V.; KAZEMIRAD, S. Prediction of the mechanical properties of wood using guided wave propagation and machine learning. **Construction and Building Materials**, v.262, 120848, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120848

FERREIRA, D.F. **Estatística multivariada**. 3ª Ed. Editora UFLA, 2018. 624p. ISBN 978-85-8127-063-0

GONÇALVES, R.; TRINCA, A.J.; CERRI, D.G. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, v.43, n.1, pág. 64-75, 2011. Available at: https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1247/1247. Accessed in: August 17th 2020.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A.J.; PELLIS, B.P. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. **Wood Science and Technology**, n.48, pág. 269–287, 2014. doi: 10.1007/s00226-013-0598-8

HAMMER, Ø; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological Statistics. Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, v.4, n.1, 2001.

HEIDELBERG, F.R. Statische Hinweise im Schall-Tomogramm von Bäumen. Stadt und Grün n.7, pág. 41-45, 2004.

HEIDELBERG, F.R. User Manual: Arbotom® 3D Tree Impulse Tomograph. Rinntech, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da extração vegetal e da silvicultura – Tabela 289: Quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo: copaíba (óleo), 2020. Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA. Available in: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#notas-tabela. Accessed in: July 24th 2020.

LATORRACA, J.V.F.; RODRIGUES, N.D.; VIEIRA, M.C.; OHANA, C.C.; TEIXEIRA, J.G. Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânica. **Floresta e Ambiente,** v.18, n.4, pág. 451-459, 2011. doi: 10.4322/floram.2011.064

LIU, L.; LI, G. Acoustic tomography based on hybrid wave propagation model for tree decay detection. **Computers and Electronics in Agriculture,** n.151, pág. 276–285, 2018. doi: 10.1016/j.compag.2018.06.020

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; BENETATI, L. Anatomia comparada do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae-Caesalpinoideae) de floresta e cerradão.

Brazilian Journal of Botany, v.24, n.3, pág. 311-320, 2001. doi: 10.1590/S0100-84042001000300010

MARTINS, K.; SILVA, M.G.C.; RUIZ, R.C.; ARAÚJO, E.A.; WADT, L.H.O. Produção de oleorresina de copaíba (*Copaifera* spp.) no Acre. In: Editora WADT, L.H.O., Anais do Seminário Manejo de Produtos Florestais não-Madeireiros na Amazônia, Rio Branco: Embrapa Acre, v1, pág.100-107, 2008. Available at: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/505903/1/kamukaia.pdf. Accessed in: November 27th 2020.

MARTINS, K.; AZEVEDO, C.R.; SILVA, M.G.C.; OLIVEIRA, W.L.H. Copaíba: aspectos ecológicos e potencial de uso do oleorresina. In: SIVIERO, A.; MING, L.C.; SILVEIRA, M.; DALY D.; WALLACE, R. **Etnobotânica e Botânica Econômica do Acre**. Rio Branco: Edufac, 2016, 428p. ISBN 978-85-8236-027-9

MEDEIROS, R.S. **Estudo da anatomia do lenho e dendrocronologia de árvores de *Copaifera multijuga* Hayne na Amazônia brasileira e sua relação com o manejo e extração de oleorresina**. 2016. 190p. PhD thesis Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. Available at: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-10082016-180854/publico/Raquel_da_Silva_Medeiros_versao_revisada.pdf. Accessed in: July 20th 2019.

MENDES, F.H.; SILVA FILHO, D.F. Frequency variation of mechanical waves of the impulse tomograph based on geographic north. **Sci. For**., Piracicaba, v.47, n.122, pág. 353-358, 2019. doi: 10.18671/scifor.v47n122.18

MORESCHI, J.C. Propriedades da Madeira. 4ª Ed. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal – UFPR. Curitiba: Paraná, 2012. Available at: http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf. Accessed in: June 24th 2020.

PALMA, S.; GONÇALVES, R.; TRINCA, A.; COSTA, C.; REIS, M.; MARTINS, G. Interference from knots, wave propagation direction, and effect of juvenile and reaction wood on velocities in ultrasound tomography. **BioRes**, v.13, n.2, pág. 2834-2845, 2018. Available at: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/interference-from-knots-wave-propagation-direction-and-effect-of-juvenile-and-reaction-wood-on-velocities-in-ultrasound-tomography/. Accessed in: July 22th 2020.

PEREIRA, L.C.; SILVA FILHO, D.F.; TOMAZELLO FILHO, M.; COUTO, H.T.Z.; MOREIRA, J.M.M.A.; POLIZEL, J.L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v.2, n.2, pág.65-75, 2007. doi: 10.5380/revsbau.v2i2.66313

PERLIN, L.P.; JULIANI, M.A.; VALLE, A.; PINTO, R.C.A. Mathematical basis of ultrasonic tomography for integrity evaluation of wood structural elements. **Cerne**, v.21, n.3, pág.503-509, 2015. doi: 10.1590/01047760201521031868

PERLIN, L.P.; PINTO, R.C.A.; VALLE, A. Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. **Construction and Building Materials**, v.229, 116958, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116958

PERLIN, L.P.; VALLE, A.; PINTO, R.C.A. New method to locate the pith position in a wood cross-section based on ultrasonic measurements. **Construction and Building Materials**, v.169, pág. 733-739, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.021

PIERI, F.A.; MUSSI, M.C.; MOREIRA, M.A.S. Óleo de copaíba (*Copaifera* sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais. **Rev. bras. plantas med**., v.11, n.4, pág. 465-472, 2009. doi: 10.1590/S1516-05722009000400016

PLOWDEN, C. Production ecology of Copaíba (*Copaifera* spp.) oleoresin in the eastern Brazilian Amazon. **Econ. Bot.**, v.57, pág. 491–501, 2003. doi: 10.1663/0013-0001(2003)057[0491:PEOCCS]2.0.CO;2

PLOWDEN, C. Copaíba (*Copaifera* spp.). In: SHANLEY, P.; PIERCE, A.R.; LAIRD, S.A.; GUILLEN, A. (Eds.), **Explotando el Mercado verde: certificación y manejo de productos forestales no maderables**. Manuales de conservación de la serie pueblos y plantas. Montevideo: WWF, UNESCO, Royal Botanic Gardens: Nordan-Comunidad. 2004, 447p.

PUTRI, N.; KARLINASARI, L.; TURJAMAN, M.; WAHYUDI, I.; NANDIKA, D. Evaluation of incense-resinous wood formation in agarwood (*Aquilaria malaccensis* Lam.) using sonic tomography. **Agriculture and Natural Resources**, v.51, pág.84-90, 2017. doi: 10.1016/j.anres.2016.08.009

RODRIGUES, T.M.; TEIXEIRA, S.P.; MACHADO, S.R. The oleoresin secretory system in seedlings and adult plants of copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf., Leguminosae–Caesalpinioideae). **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v.206, n.6, pág. 585–594, 2011. doi: 10.1016/j.flora.2010.10.002

ROLLO, F.M.A; SOAVE JUNIOR, M.A.; VIANA S.M.; ROLLO, L.C.P.; COUTO, H.T.Z.; SILVA FILHO, D.F. Comparison between resistography readings and tomographic images for internal assessment in tree trunks. **Cerne**, v.19, n.2, pág. 331-337, 2013. doi: 10.1590/S0104-77602013000200018

ROQUETTE, J.G.; DRESCHER, R.; BRONDANI, G.E.; RONDON NETO, R.M.; EBERT, A.; TEIXEIRA, L.R.; DIAS, A.P.; GAVA, F.H. Age and growth affect oleoresin yield from copaíba trees in the Cerrado–Amazônia ecotone. **Cerne**, v. 24, n. 2, pág. 106-113, 2018. doi: 10.1590/01047760201824022527

SCHIMLECK, L.; DAHLEN, J.; APIOLAZA, L.A.; DOWNES, G.; EMMS, G.; EVANS, R., MOORE, J.; PÂQUES, L.; VAN DEN BULCKE, J.; WANG, X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. **Forests**, v.10, n.728, 2019, doi: 10.3390/f10090728

SECCO, C.B.; GONÇALVES, R.; CERRI, D.G.; VASQUES, E.C.; BATISTA, F. Behavior of ultrasonic wave propagation in the presence of holes on wood. R. **Cerne**, v.18, n.3, pág. 507-514, 2012. Available at: https://www.scielo.br/pdf/cerne/v18n3/a19v18n3.pdf. Accessed in: June 08th 2020.

SEDIK, Y.; HAMDAN, S.; JUSOH, I.; HASAN, M. Acoustic properties of selected tropical wood species. **J Nondestruct Eval**., v.29, pág. 38-42, 2010. doi: 10.1007/s10921-010-0063-7

SHANLEY, P.; MEDINA, G. Frutíferas e plantas úteis na vida Amazônia. In: CYMERYS, M.; FERNANDES, N.M.P.; RIGAMONTE-AZEVEDO, O.C. **Copaíba: *Copaifera* L. f.** Belém: CIFOR, Imazon, 2005. p.183-187.

SPATZ, H.C.; NIKLAS, K.J. Modes of failure in tubular plant organs. **American Journal of Botany**, v.100, n.2, pág.1–7, 2013. doi: 10.3732/ajb.1200454

VALENTIN, J.L. **Ecologia Numérica: Uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. 2ª ed. Editora Interciência. 2012. 168p. ISBN 978-85-7193-230-2

VIDAURRE, G.B.; LOMBARDI, L.R.; NUTTO, L.; FRANÇA, F.J.N.; NISTAL, F.J.; OLIVEIRA, J.T.S.; ARANTES, M.D.C. Propriedades da madeira de reação. **Floresta e Ambiente**, v.20, n.1, pág. 26-37, 2013. doi: 10.4322/floram.2012.041FLORAM

XIAOCHEN, D.; JIAJIE, L.; HAILIN, F.; SHENGYONG, C. Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves. **Appl. Sci.**, v.8, n.10, pág. 1778, 2018. doi: 10.3390/app8101778

CAPÍTULO III:
INTERFERÊNCIA DA SAZONALIDADE NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MECÂNICAS EM SEÇÕES TRANSVERSAIS DO TRONCO DE ÁRVORES DE *Copaifera sp.*

RESUMO

A tomografia de impulso (TI) é uma técnica acústica importante para a avaliação arbórea, que permite o conhecimento de diversas propriedades da qualidade do fuste, galhos e raízes. Buscando ampliar o alcance de aplicação da TI, esta pesquisa teve como objetivo verificar o comportamento da propagação de ondas de impulso em seções transversais de árvores nativas de *Copaifera* sp., em diferentes períodos de sazonalidade. Desse modo, comparou-se dois grupos de árvores nativas de *Copaifera* sp., avaliados em distintos períodos de sazonalidade: a) grupo A = 14 árvores mensuradas no período sazonal transição para chuvoso (2018); b) grupo B = 14 árvores mensuradas no período sazonal seco (2019). Por meio de regressão múltipla, verificou-se a correlação entre as variáveis, e utilizando-se estatística multivariada criou-se um sistema reduzido de coordenadas para ampliar a percepção de similaridades e diferenças, entre os grupos A e B. Reconheceu-se haver diferença significativa entre grupos A e B, quanto as VPOM em relação a todas as Hp% (0, 25, 50, 75 e 100 %). A altura de prospecção (Hp%), a velocidade mínima (Vmin) e a temperatura mínima (Tmin) apresentaram reduzido peso explicativo, considerando os quatro primeiros componentes principais, necessários para explicar a maior porção da variação total dos dados (70%). O período sazonal interferiu na VPOM e, também, nas velocidades médias de propagação de ondas mecânicas (VmPOM), demonstrando a sensibilidade da TI para captar mudanças relacionadas com o conteúdo de água no tronco das árvores, em função de períodos sazonais de seca e de transição para chuvoso. O período sazonal interferiu nas velocidades de propagação das ondas mecânicas, independentemente da altura verificada. A TI apresenta sensibilidade suficiente para captar mudanças relacionadas com o conteúdo de água no tronco das árvores, relativos aos períodos sazonais de seca e de transição para chuvoso.

Palavras-chave: Copaíba, Fatores ambientais, Tecnologia de produtos florestais; Métodos não Destrutivos, Sazonalidade.

ABSTRACT

Impulse tomography (IT) is an important acoustic technique for tree evaluation, which allows the knowledge of several properties of the quality of the stem, branches and roots. Seeking to broaden the scope of application of IT, this research aimed to verify the impulse wave propagation behavior in cross sections of native trees of Copaifera sp., in different seasonality periods. Thus, two groups of native trees of *Copaifera* sp. were compared, evaluated in different seasonal periods: a) group A = 14 trees measured in the seasonal period transition to rainy (2018); b) group B = 14 trees measured in the dry seasonal period (2019). Through multiple regression, the correlation between variables was verified, and using multivariate statistics, a reduced coordinate system was created to broaden the perception of similarities and differences between groups A and B. It was recognized that there was a significant difference between groups A and B, regarding VPOM in relation to all Hp% (0, 25, 50, 75 e 100 %). The prospecting height (Hp%), the minimum speed (Vmin), and the minimum temperature (Tmin) showed little explanatory weight, considering the first four principal components, necessary to explain the largest portion of the total variation in the data (70%). The seasonal period interfered in the VPOM and also in the average velocities of propagation of mechanical waves (VmPOM), demonstrating the sensitivity of IT to capture changes related to the water content in the tree trunk, as a function of seasonal periods of drought and transition to rainy. The seasonal period interfered in the speed of propagation of mechanical waves, regardless of the height verified. The TI has sufficient sensitivity to capture changes related to the water content In the trunk of trees, related to seasonal periods of drought and transition to rain.

Keywords: Copaíba, Environmental factors, Forest products technology, Non-destructive methods, Seasonality.

.

1 INTRODUÇÃO

As angiospermas arbóreas desenvolveram, ao longo do tempo, particularidades estruturais que as permitem controlar mecanismos específicos de adaptação a variação dos fatores do ambiente no qual estejam inseridas (CARLQUIST, 2012). Ressalta-se a importância desta informação, visto que pode dar suporte às pesquisas que envolvem a Tomografia Acústica (TA).

A TA engloba técnicas utilizadas para a avaliação arbórea, por meio da determinação de parâmetros para algumas propriedades específicas, que têm correspondência com uma gama de características intrínsecas. Essas técnicas possibilitam a verificação da qualidade da madeira de troncos, galhos e raízes, com diferentes objetivos que vão desde a detecção de fraturas, do comprometimento pela ação de fungos e cupins, até o estudo da suficiência ou do estresse hidráulico (BUCUR, 2006), entre outros.

No Brasil, têm sido desenvolvidas pesquisas utilizando um tipo de TA chamado Tomografia de Impulso (TI), na qual o estímulo à produção de ondas é gerado através de leves toques de martelo sobre os sensores (MENDES; SILVA FILHO, 2019; CASTRO *et al*., 2011; HEIDELBERG, 2011), sendo chamadas de ondas mecânicas ou ondas de impulso.

Um tomograma é a representação gráfica (2D ou 3D), resultante da interpolação das leituras dos sinais emitidos e captados pelos sensores, e sua precisão pode variar de acordo com o número de dispositivos sensores utilizados (ARCINIEGAS *et al*., 2014). Trata-se de uma imagem codificada (gráfico) e relacionada a uma escala de cores (RGB), que é subdividida em função das velocidades de propagação das ondas acústicas.

De acordo com Heidelberg (2011), as velocidades de impulso são o resultado da razão entre o tempo de execução e a distância percorrida, ou a distância entre os sensores. O tempo é susceptível a interferências exercidas por alterações físicas do material, como a densidade e o módulo de elasticidade (HEIDELBERG, 2011).

Além desses, outros fatores são reconhecidos como causa de perturbação na propagação da onda acústica e, por conseguinte, no resultado da tomografia, podendo ser citados: estrutura anatômica da madeira, grã, descontinuidades, injúrias e acometimento por deterioração, teor de umidade, conteúdo químico e outros, além de alterações externas relacionadas à fatores ecológicos (fenologia, temperatura, umidade relativa do ar e do solo, e outros) que afetam as condições de umidade do xilema. Portanto, ao se analisar um tomograma (de linhas ou a imagem interpolada) é necessário considerar que, este representa um determinado momento da condição do tronco da árvore, admitindo-se certa variação quando obtido em dois, ou mais, momentos distintos.

Essa questão pode ser melhor compreendida observando-se as descobertas de Hao *et al*. (2013), que analisaram variações de curto prazo, e variações sazonais, no conteúdo volumétrico de água do tronco (VWC) de árvores. Os autores verificaram que, esse conteúdo varia ao longo do dia, apresentando valores mínimos por volta do meio-dia e carga máxima no período noturno, sendo capazes de registrar aumentos significativos em dias com precipitação considerável e redução durante a onda de calor, no final do mês de junho.

Há algum tempo, BUCUR (2006) citou estudos de Borghetti, Raschi e Grace (1989) e Jones *et al*. (1989), duas pesquisas que empregaram emissão acústica (EA) para monitorar o conteúdo de água de árvores florestais e frutíferas, em diferentes períodos de estresse hídrico, para assim aperfeiçoarem a periodicidade da rega. Além disso, Bucur (2006) destacou a pesquisa de Pena e Grace (1986) que verificaram o conteúdo de água em árvores de pinho em períodos de estresse, demonstrando que oscilações de fatores ambientais, como temperatura e umidade do ar, desencadeiam respostas no xilema, que são detectáveis com a tomografia.

Para Oletic *et al.* (2020), o teste de EA é promissor para o monitoramento automatizado e não invasivo de cavitações do xilema, devido à realização de experimentos de desidratação de plantas de quatro diferentes cultivares de videira, em laboratório, demonstrando a sensibilidade da EA, utilizando sensores piezoelétricos ressonantes, na faixa de frequência de onda de 200 e 600 kHz, para a detecção de estresse hídrico.

Pesquisas utilizando TI, que tratam da influência da variação das condições ambientais sobre os resultados tomográficos, não são comuns, embora, notadamente, alguns autores tenham abordado a importância da influência da umidade para este Método Não Destrutivo (MND) de análise (AMODEI *et al.*, 2010; ROLLO *et al*., 2013). No entanto, reconhecidamente, a umidade é mencionada como um fator indicador da degradação da madeira. Entre as pesquisas que investigaram especificamente o tema umidade, destacam-se os trabalhos de Latorraca *et al*. (2011) e Casagrande (2017), que analisaram amostras da madeira do tronco e não a tomografia da árvore viva.

De acordo com Köcher, Horna e Leuschner (2013), o papel funcional do armazenamento interno de água é cada vez melhor compreendido em árvores tropicais e coníferas, e diferenças nos padrões refletem diferenças entre as espécies, em função do tipo de porosidade característica e da densidade da madeira. Os autores confirmaram que, os estoques internos de água desempenham um papel importante e que a densidade da madeira tem grande influência no armazenamento de água. Entretanto, nesta mesma pesquisa de Köcher, Horna e Leuschner (2013), esses estoques se esgotaram, principalmente, quando o potencial da matriz do solo caiu abaixo de -0,1 Mpa e o déficit de pressão de vapor médio diário excedeu 3-5 hPa.

Rowland, Malhi e Silva-Espejo (2014) identificaram correlação entre as variações sazonais, e interanuais, do clima e as mudanças no incremento de biomassa das árvores tropicais, quando os incrementos de biomassa no pico da estação seca reduziram entre 40 e 55%, em relação ao pico da estação chuvosa, devido aos padrões de precipitação e teor de água do solo. A força da resposta das árvores tem relação com características funcionais como taxa de crescimento potencial máximo e segurança hidráulica (ROWLAND; MALHI; SILVA-ESPEJO, 2014).

O estresse hídrico causa um aumento na taxa de evapotranspiração nas plantas, sujeitando a água nos dutos do xilema à alta tensão, o que cria cavitações que levam à embolização do xilema, perda de condutividade hidráulica e, possivelmente, até a morte da planta (OLETIC *et al*., 2020).

A esse complexo conjunto de fatores, que corroboram a definição da condição do VWC, devem ser incluídos os eventos fenológicos. Conforme Kushwaha *et al.* (2011), espécies de florestas decíduas tropicais apresentam fenofases que evoluem como uma adaptação para

superar a seca sazonal, e têm relação com variáveis microclimáticas e com o estado da água da árvore e a água do ambiente.

Segundo Bergamaschi e Bergonci (2017), no Brasil, é limitado o número de pesquisas dedicadas à relação clima/plantas, sendo necessário que sejam desenvolvidas mais pesquisas que sustentem as tomadas de decisão. Em uma realidade de mudanças globais do clima, Kushwaha *et al.* (2011) apresentam o que consideram as principais limitações científicas para pesquisas futuras, entre essas, a falta de compreensão completa do ciclo fenológico I e a ausência de modelos com base na sazonalidade da umidade do solo.

O tomograma de uma seção transversal do tronco de uma árvore pode revelar informações importantes, mas sua correta interpretação requer uma análise mais detalhada. Desse modo, o objetivo desse estudo é verificar o comportamento da propagação de ondas de impulso em seções transversais de árvores nativas de *Copaifera* sp., em diferentes períodos de sazonalidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do sítio

As árvores estão localizadas em um sítio delimitado por um polígono de dimensão 3.0 x 5.0 km, compreendido entre as coordenadas dos vértices: a) v_01 = 10°28’2.26”S, 67°53’39.47”O; b) v_02 = 10°27’25.62”S, 67°55’13.32”O; c) v_03 = 10°30’2.77”S, 67°55’33.44”O; d) v_04 = 10°29’41.88”S, 67°56’43.47”O. Este sítio pertence à colocação Estrangeiros I, do Projeto de Assentamento Extrativista São Luís do Remanso (PAE Remanso), município de Capixaba, estado do Acre (MARTINS, SANTOS e LATORRACA, 2021).

Na região, o relevo varia de plano a suave ondulado e é recoberto pelas tipologias florestais Floresta Aberta com Bambu, Floresta Aberta com Palmeiras e Floresta Densa (ACRE, 2010). As árvores de *Copaifera* sp. (copaíba) são de grande porte, geralmente, ocupando o estrato do dossel da floresta ou se sobressaindo com uma copa emergente. No local de estudo, verifica-se cobertura de floresta aberta, com avanço da conversão de áreas florestadas em pastagens e roçados, o que acarreta pressão sobre as populações de *Copaifera* sp. De acordo com Amaral *et al.* (2019, p. 6), 76.9% da área desmatada do município de Capixaba apresenta “solos profundos, porosos, bem drenados, de textura argilosa e com boa capacidade de retenção de água”.

De acordo com Duarte (2017), o clima no estado do Acre é equatorial e apresenta três estações climáticas bem definidas: a) junho a agosto, estação seca; b) outubro a abril, estação chuvosa; c) maio e setembro, período de transição (Figura 1).

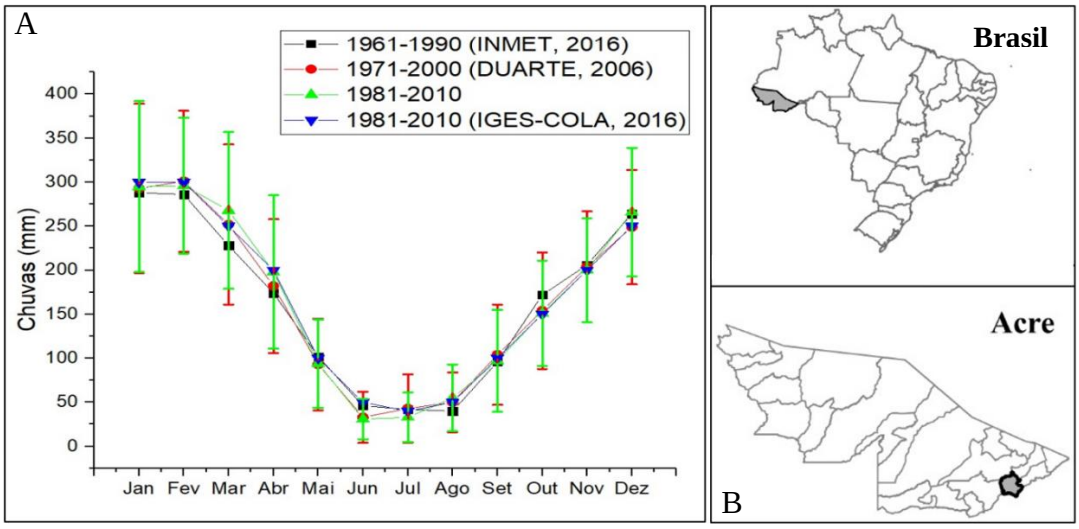


Figura 1. A. Variação I de chuvas no Leste do estado do Acre. Fonte: Duarte, 2017; B. Capixaba/AC, município de localização do sítio da pesquisa, Projeto de Assentamento Extrativista São Luís do Remanso, com relação ao estado do Acre.

2.2 Aquisição de dados

Para verificar a influência de fatores externos na velocidade de propagação das ondas mecânicas dos troncos das árvores, nos distintos períodos sazonais, foram investigadas quatro categorias de variáveis, conforme apresentado na Tabela 1. As tomografias acústicas foram realizadas conforme Martins, Santos e Latorraca (2021) e a representação apresentada no Anexo I.

Tabela 1. Categorias de variáveis (intrínsecas e extrínsecas) adotadas para examinar a diferença nas VPOM e VmPOM obtidas, por Tomografia de Impulso, de árvores nativas de *Copaifera* sp., realizadas em dois distintos períodos sazonais.

CATEGORIA	VARIÁVEIS	SIGLA
Dendrométrica	Diâmetro a altura do peito (cm)	DAP
	Diâmetro em determinada altura de prospecção (cm)	Dhp
	Altura de prospecção (cm)	Hp
	Altura de prospecção (%)	Hp%
Acústica	Velocidade de propagação da onda mecânica (m/s)	VPOM
	Velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s)	VmPOM
	VPOM máxima (m/s)	Vmax
	VPOM mínima (m/s)	Vmin
	Porcentagem de área com baixa VPOM (%)	LSa%
Meteorológica	Precipitação (mm)	PPT
	Umidade relativa do ar (%)	UR%
	Temperatura mínima do ar (°C)	Tmin
	Temperatura máxima do ar (°C)	Tmax
Fenológica	Condição fenológica da folhagem	*Leaf*

A tomografia de impulso fornece a velocidade de onda de cada um dos trajetos formados entre os pares de sensores, estas foram consideradas as velocidades de propagação da onda mecânica (VPOM). Foi calculada a velocidade média de propagação das ondas mecânicas (VmPOM), sendo essa o $\sum$VPOM ÷ 56, onde 56 é o número de trajetos realizados entre 8 sensores utilizados. A VmPOM representa a velocidade média obtida para cada tomograma, ou seja, para cada seção tomografada. No Anexo II são apresentados os tomogramas, os gráficos em escala de cinza e os gráficos de classificação do LSa%, um procedimento realizado no *software* Arcmap 10.6.1 (ESRI, 2018).

Nesta investigação, dois grupos de árvores, avaliados por meio de TI em distintos períodos de sazonalidade, foram comparados:

a) Grupo A = 14 árvores mensuradas em setembro de 2018, período sazonal de transição para chuvoso;

b) Grupo B = 14 árvores mensuradas em julho de 2019, período sazonal seco.

Das 14 árvores constituintes de cada grupo, nove tiveram os troncos mensurados e tomografados, longitudinalmente, em seções transversais correspondentes à cinco alturas

(Hp%), desde 0% ou na posição do diâmetro à altura do peito (DAP), a 25%, 50%, 75% e a 100% (imediatamente abaixo da primeira bifurcação do tronco). As demais cinco árvores, de cada grupo, foram mensuradas e tomografadas apenas na altura do DAP.

O equipamento de TI utilizado foi o tomógrafo de pulso mecânico Arbotom® (*Impulse tomograph*), com oito sensores. Os procedimentos seguiram o recomendado por Heidelberg (2011) e Castro *et al*. (2011). Foram necessários, também, trena, fita métrica, martelo, *notebook* e dois auxiliares escaladores para a realização das tomografias. A reconstrução gráfica das tomografias consistiu na seguinte configuração: *a)* filtro de velocidade: 50 a 4000 m/s; *b)* modelo cor: *purple-red-yellow-green*; *c)* resolução 2D = 5mm*; d)* seleção do valor médio mais rápido e da análise de distribuição e; *e)* correção de desvio padrão e máximo desvio padrão = 1, conforme Martins, Santos e Latorraca (2021).

Os dados relacionados às variáveis meteorológicas, referentes a cada dia de realização das TI são gerados a partir de observações obtidas por estações meteorológicas e interpolação espacial, e foram obtidos junto ao INPE (2020).

A situação fenológica de cada árvore, considerando a situação foliar no momento da realização das tomografias, foi classificada conforme: a) ausência de folhas = cor vermelha, valor 0; b) folhas velhas ou desfolhamento = cor verde escuro, valor 1; c) folhas novas = cor verde claro, valor 2.

2.3 Análise dos dados

Introdutoriamente, os grupos foram caracterizados a partir da obtenção das amplitudes estatísticas das VPOM e, respectivas, VPOM mínima (Vmin) e VPOM máxima (Vmax). Também, foram calculadas e analisados os parâmetros estatísticos descritivos: Coeficiente de variação (CV%), Média e Desvio padrão (*Sd*) para as variáveis dendrométricas (Hp, Dhp), e Média e Desvio padrão para as VmPOM. Para as variáveis DAP, Ht e VPOM foi determinado o intervalo entre os valores mínimos e máximos, e por meio desses parâmetros, caracterizou-se os grupos, em função do porte dos indivíduos arbóreos que os constituem.

Verificou-se, estatisticamente, a existência de diferença significativa entre os grupos A e B, quanto às VPOM, empregando-se o teste de *Kruskal Wallis* (5%). b) existência de correlação linear de *Pearson* entre as Hp% e seus respectivos Dhp.

A próxima etapa consistiu na aplicação de Regressão Múltipla para verificar a correlação entre todas as variáveis (dendrométricas, meteorológicas e fenológica) e as VmPOM, as quais foram, também, analisadas utilizando-se a Análise de Componentes Principais (ACP), por meio de uma matriz de dimensão 11 x 28 (variáveis x observações referentes ao número de árvores). Assim, criou-se um sistema reduzido de coordenadas para ampliar a percepção à cerca das similaridades, ou das diferenças, entre os grupos A e B, considerando a prevalência de correlação não linear entre as variáveis. Para tanto, foram empregues as orientações de Ferreira (2018) e Valentin (2012). Para a mineração dos dados utilizou-se o *software Paleontological Statistics* – Past 4.02 (HAMMER *et al.,* 2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os grupos A e B, demonstram a prevalência de características pouco homogêneas, devido aos CV% superiores a 30%, sendo 36,0% e 46,4% para os respectivos Dhp e 82,5% e 73,7% para as Hp%, conferindo uma maior variabilidade das Hp%. Entretanto, com relação às Médias e *Sd* dos Dhp e Hp, considera-se que, os grupos não apresentaram diferença exarcebada (apesar do grupo B ter apresentado Ht mínima e máxima um pouco superiores) sendo ambos constituídos por indivíduos nativos e adultos, representativos do esperado para o gênero *Copaifera.* As Médias e *Sd* das VmPOM e as VPOM máximas e mínimas representam uma diferença mais acentuada entre os grupos (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização descritiva dos grupos A e B, de árvores de *Copaifera* sp. *do* município de Capixaba, estado do Acre, em função de parâmetros dendrométricos e acústicos obtidos em dois diferentes períodos sazonais.

Hp%	GRUPO A[a]				GRUPO B[b]		
	N	Hp (m)	Dhp	VmPOM	Hp (m)	Dhp	VmPOM
100	9	14,4 ± 3,2	60,4 ± 26,6	476 ± 255	15,1 ± 3,3	56,7 ± 14,3	740 ± 339
75	9	10,9 ± 2,6	64,0 ± 26,2	453 ± 179	10,4 ± 2,4	57,6 ± 15,2	706 ± 316
50	9	7,3 ± 1,9	65,1 ± 25,7	451 ± 189	6,9 ± 1,6	61,4 ± 14,6	703 ± 307
25	9	4,2 ± 1,5	68,8 ± 26,7	443 ± 180	3,4 ± 7,9	65,4 ± 15,5	723 ± 337
0	14	1,30	82,8 ± 42,4	430 ± 230	1,30	94,5 ± 30,0	791 ± 382
Ht min; max	14	19,4; 33,0	-	-	21,5; 35,0	-	-
DAP min; max	14	-	34,7; 178,9	-	-	52,8; 153,4	-
VPOM min; max	14	-	-	106; 1973	-	-	211; 3236

Legenda: Hp% = altura de prospecção (%); Ht = altura total do fuste; DAP = diâmetro a altura do peito (cm); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica; Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); [a] transição para estação chuvosa; [b] auge da estação seca. As variáveis Hp = altura de prospecção (m), Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm) e VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s) são apresentadas em termos de suas Médias e Desvio padrão.

Não foi encontrada correlação linear significativa entre as Hp% e os respectivos Dhp, tanto para o grupo A ($R = - 0,30513$; $R^2 = 0,093106$, $p = 0,027835$), quanto para o grupo B ($R = - 0,46573$; $R^2 = 0,2169$, $p = 0,00097039$), embora apresentem certo grau de significância (p-valor menor que 0,05), os R^2 são considerados muito fracos.

Copaibeiras são árvores folhosas de grande porte, emergentes, tronco cilíndrico, copa bifurcada com folhas compostas (MARTINS *et al*., 2008; MARTINS *et al*., 2016), mas a correlação negativa fraca encontrada é um resultado esperado. Roquette *et al*. (2018) afirmam que há fatores que afetam o crescimento, conferindo heterogeneidade às árvores.

O grupo A apresentou amplitude estatística das VPOM de 1867 m/s, sendo a Vmin igual a 106 m/s e a Vmax de 1973 m/s. O grupo B apresentou amplitude estatística das VPOM de 3025 m/s, sendo a Vmin igual a 211 m/s e a Vmax de 3236 m/s. Outrossim, os tomogramas de ambos os grupos, independente da Hp%, distinguiram-se em relação às VPOM. No mês de setembro de 2018 (grupo A), foram obtidos tomogramas com maior ocorrência de VPOM inferiores a 400 m/s, enquanto no mês de julho de 2019 (grupo B) predominaram VPOM superiores a 700 m/s (Figura 2).

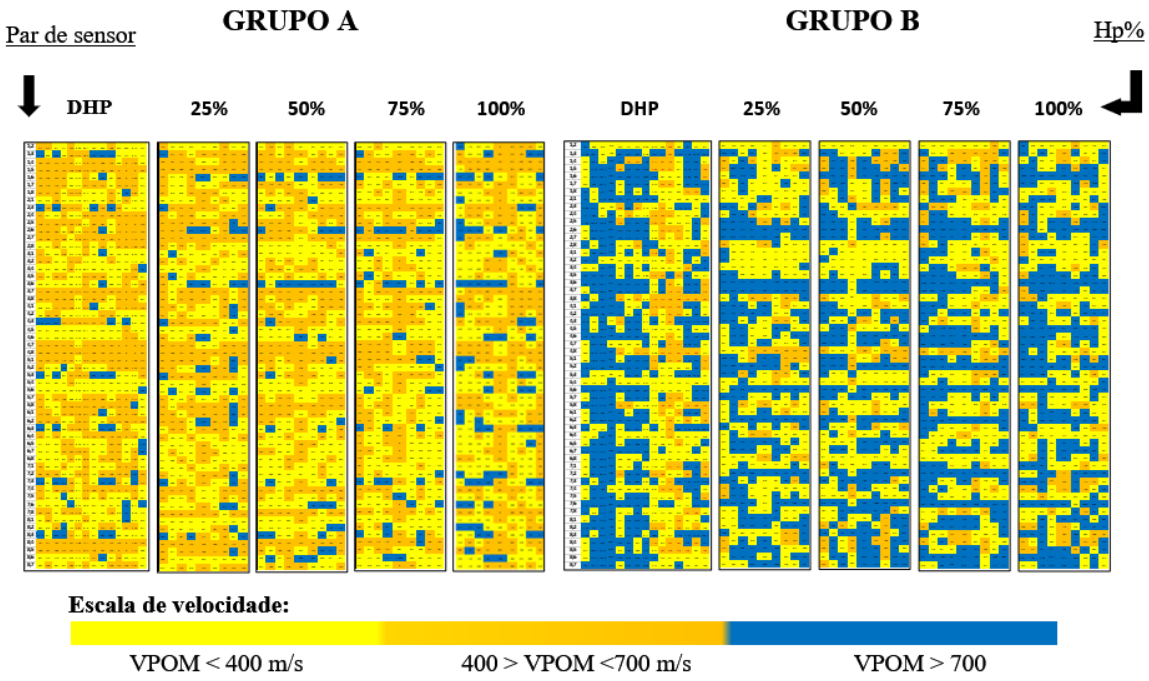


Figura 2. Representação das matrizes de VPOM obtidas para a comunicação entre pares de sensores, para cada árvore de *Copaifera* sp. da região *do* município de Capixaba, estado do Acre, nas diferentes Hp% de realização da TI, nos distintos períodos de sazonalidade: GRUPO A. Estação de transição para o período chuvoso, mês de setembro de 2018; GRUPO B. Estação de seca, mês de julho de 2019. Legenda: DHP = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica.

Como pode ser observado na Figura 2, a predominância de VPOM alta, intermediárias ou baixa, foi de fato uniforme dentro de cada grupo. Visualmente, o efeito da sazonalidade foi a redução das VPOM superiores a 700 m/s, mais predominantes no grupo B, para VPOM intermediárias (entre 400 e 700 m/s) no caso do grupo A. No entanto, é notável que ambos os grupos apresentam uma quantidade importante de VPOM inferiores a 400 m/s, logo, independente do período sazonal. Este fato pode indicar que a sazonalidade, especificamente neste caso, não é um fator que, necessariamente, irá mascarar o resultado da TI, mesmo que haja variação das VPOM.

A hipótese da diferença significativa entre grupos A e B, quanto as VPOM em todas as Hp% foi aceita devido aos resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Significância dos testes de *Kruskal-Wallis* para as medianas das VPOM em cada altura de prospecção (Hp%), para os grupos A e B de árvores de *Copaifera* sp. do município de Capixaba, estado do Acre.

Hp%	*H* (*Chi*^{2})	*Hc* (corrigido)	*p-valor*
100	196,4	196,4	1,28E-41
75	195,8	195,8	1,72E-41
50	238,8	238,8	7,03E-51
25	259,5	259,5	2,16E-55
0	459,6	459,7	5,72E-99

Além da própria diferença entre os Dhp, a diferença significativa mostrada acima, indica que algum fator, ou fatores, pode ter influído sobre o conteúdo de água xilema das árvores no momento da realização da TI. Para BUCUR (2005), a condição do teor de umidade (MC%) da madeira no momento da realização da tomografia tem consequências, e quanto menor a umidade maior a VPOM. Como visto, Latorraca *et al*. (2011) verificaram que a relação entre o MC% e a VPOM influencia a formação da imagem tomográfica.

Essa diferença, também, pode ser observada quando consideradas as VmPOM relativas, exclusivamente, às seções de Hp% referentes ao DAP das árvores. Concomitantemente, a variável meteorológica UR%, prevalente nos dias de realização das tomografias, e a condição fenológica das árvores, também diferiram entre os grupos. Já a variável PPT, que foi escassa, Tmin (entre 10º e 20º C) e Tmax (na faixa entre 30º e 40º C) não diferiram em intensidade entre os grupos (Figura 3).

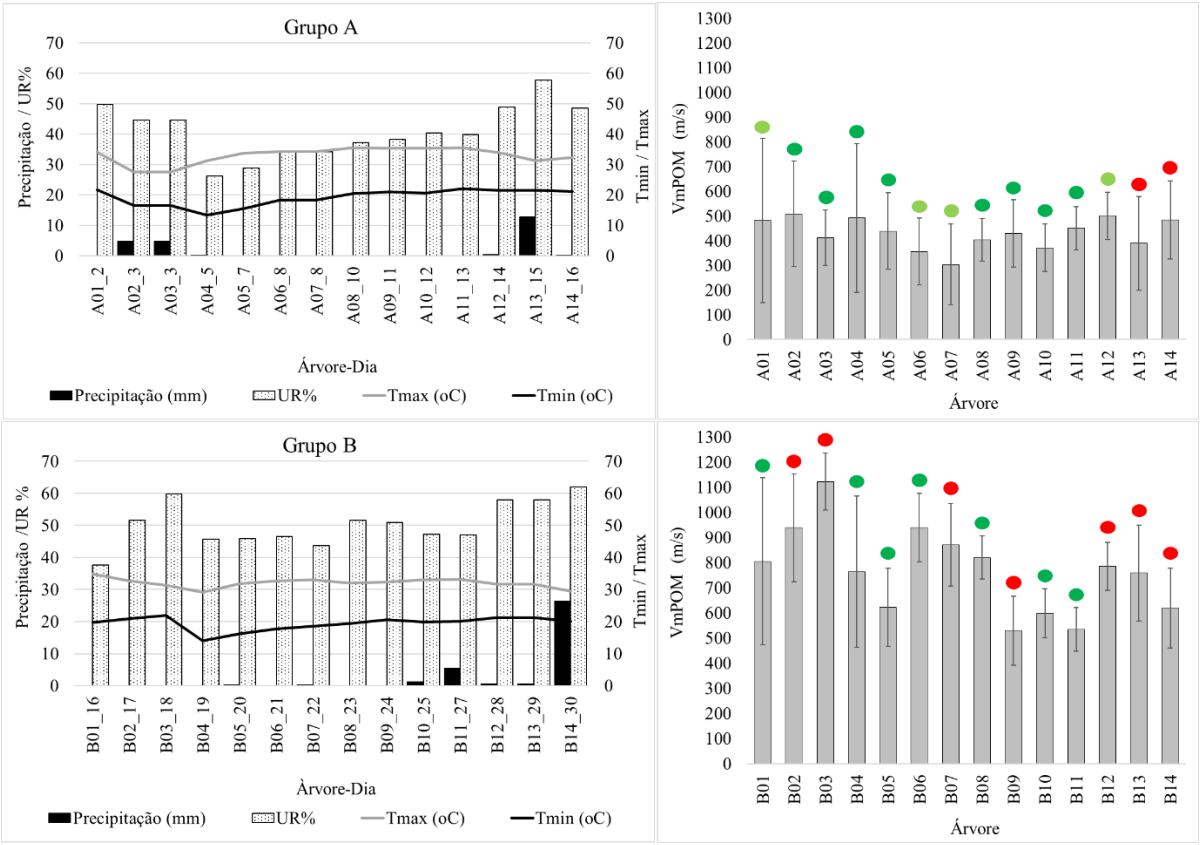


Figura 3. Situação das variáveis do clima referentes ao sítio (PAE São Luís do Remanso, estado do Acre) e fenologia das árvores de *Copaifera* sp., da região *do* município de Capixaba, estado do Acre, referentes aos dias de realização da TI. A. Variáveis meteorológicas referentes aos dias de realização das tomografias no grupo A, setembro de 2018; B. VmPOM e, respectivo, desvio padrão de cada árvore do grupo A; C. Variáveis meteorológicas referentes aos dias de realização das tomografias no grupo B, setembro de 2019. D. VmPOM e, respectivo, desvio padrão de cada árvore do grupo B; *Leaf*: ● = ausência de folhas; ● = folhas velhas/desfolhamento; ● = folhas novas; VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica; UR% = umidade relativa do ar; Tmim = temperatura mínima do ar (°C); Tmax = temperatura máxima do ar (°C). Fonte de dados climáticos: INPE, 2020.

As correlações lineares entre VmPOM e as variáveis estudadas não apresentaram significância estatística. Conforme mostrado na Tabela 4, as VmPOM do grupo A apresentaram uma correlação estatística significativa positiva desprezível com a Tmin, e correlação significativa positiva moderada com Vmax. As VmPOM do grupo B apresentaram correlação estatística significativa positiva moderada com Vmax e Vmin, e correlação negativa significativa desprezível com LSa%.

Tabela 4. Teste de Correlação linear de *Pearson*, entre VmPOM e variáveis dendrométricas, acústicas, meteorológicas e fenológica, de árvores de *Copaifera* sp. da região do município de Capixaba, estado do Acre.

Variável	GRUPO A			GRUPO B		
	R^2	R	*p*	R^2	R	*p*
Dhp	0,057	0,240	0,094	0,003	-0,058	0,685
Hp%	0,022	0,149	0,301	0,010	-0,101	0,479
Vmin	0,014	0,117	0,418	0,382	0,618	0,000
Vmax	0,487	0,698	0,000	0,565	0,751	0,000
LSa%	0,047	0,217	0,130	0,100	-0,317	0,024
PPT	0,020	-0,143	0,322	0,021	-0,146	0,305
UR%	0,009	0,096	0,507	0,004	0,060	0,677
Tmax	0,142	0,377	0,007	0,007	-0,087	0,546
Tmin	0,183	0,427	0,002	0,024	-0,154	0,282
Leaf	0,027	-0,166	0,250	0,000	-0,004	0,977

Legenda: Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); PPT = volume de chuva (mm); UR% = umidade relativa do ar (%); Tmin = temperatura mínima do ar (°C); Tmax = temperatura máxima do ar (°C); *Leaf* = condição fenológica.

Embora nem sempre seja perceptível, variáveis climáticas (fatores abióticos) interagem permanentemente com o meio (fatores abióticos e bióticos), e essa interação atua na regulação do fluxo de água no xilema, inclusive, a fenologia da árvore pode refletir na segurança hidráulica. As árvores do gênero *Copaifera* L. perdem suas folhas periodicamente, são caducifólias. De Oliveira *et al.* (2017) verificaram que, em *Copaifera langsdorffii* Desf., durante a estação seca, ocorreu queda de folhas com maior intensidade, tratando-se de um processo gradual, porém não ocasionando um desfolhamento completo.

Embora não tenha ocorrido em todas as árvores de *Copaifera* sp. da presente investigação, a perda das folhas também foi mais acentuada no grupo B (sete árvores), enquanto no período de transição (grupo A) apenas duas árvores se encontravam desfolhadas. Neste grupo, também percebe-se a predominância de folhagem nova, demonstrando uma maior atividade fisiológica.

Na ACP, buscando analisar a existência de correlação não linear entre as variáveis, verificou-se que, as árvores do grupo A aglomeraram-se, predominantemente, no quadrante característico por valores de UR% (CP1) e VmPOM (CP2) baixos, enquanto as árvores do grupo B aglomeraram-se, predominantemente, no quadrante representado por UR% e VmPOM mais elevadas. Nesta representação (Figura 4) os grupos se separaram em grande proporção, e fica demonstrada, também, a influência da Vmax, da Vmin e da *Leaf*, na dispersão dos dados. Apesar de ser visualizada no mesmo quadrante onde Tmax e PPT são elevadas, a LSa% na verdade tem relação com o Dhp, e inversamente com a VmPOM (CP2).

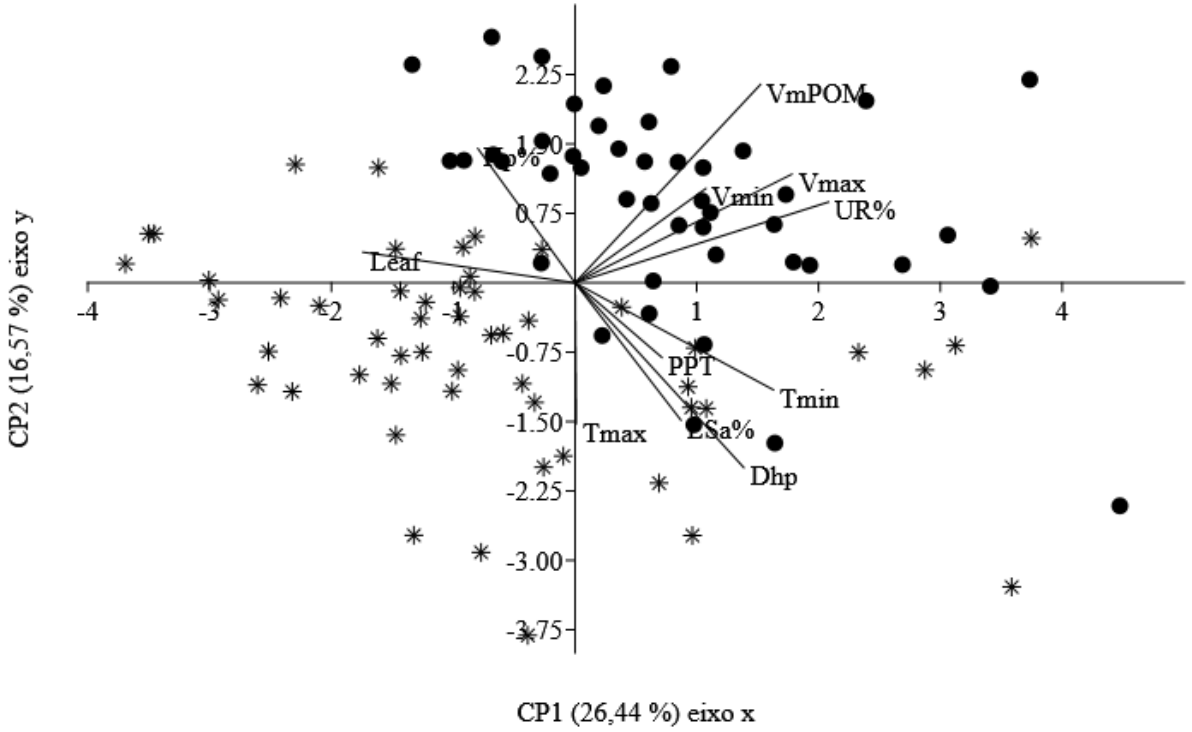


Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP): plano com 43,01 % de explicação da variabilidade dos dados e de semelhanças relativas dos grupos de árvores de *Copaifera* sp., em função das variáveis dendrométricas, acústicas, meteorológicas e fenológica, características dos períodos de realização da tomografia de impulso. Legenda: ✳ = grupo A – período de transição para chuvoso, 2018; ● = grupo B, período seco, 2019; Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica; Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica; LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); PPT = volume de chuva (mm); UR% = umidade relativa do ar (%); Tmim = temperatura mínima do ar (°C); Tmax = temperatura máxima do ar (°C); *Leaf* = condição fenológica.

Duas árvores do grupo B, que se agruparam com árvores do grupo A, são árvores ocas, característica cujo efeito sobre a tomografia pode superar o efeito da umidade, assim como quatro das árvores que apresentaram as menores velocidades do grupo A são ocas.

A maioria das variáveis teve um peso alto na espacialização dos dados, exceto Hp%, Vmin e Tmin, considerando os quatro primeiros componentes principais, necessários para explicar a maior porção da variação total dos dados (aproximadamente 70%). À CP1 (UR%) foi atribuído 26,44% da explicação da variação, à CP2 (VmPOM) 16.57%, à CP3 (PPT e Tmax) 15,23% e CP4 (LSa% e *Leaf*) 11,33%. Os autovalores e os respectivos percentuais da variância, explicativas de cada variável, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Sumário da Análise de Componentes Principais de onze dimensões, analisadas para a determinação da influência sazonal sobre as VmPOM, obtidas por Tomografia de Impulso, de árvores de *Copaifera* sp..

CP	Sumário da ACP			Pesos										
	λ	%	% ac.	Dhp	Hp%	VmPOM	Vmin	Vmax	LSa%	PPT	UR%	Tmax	Tmin	*Leaf*
1	2.908	26,44	26,44	**0.306**	-0.176	**0.337**	0.237	**0.393**	0.192	0.158	**0.460**	0.002	**0.360**	**-0.385**
2	1.823	16,57	43,01	**-0.441**	**0.320**	**0.474**	0.225	0.259	**-0.328**	-0.178	0.193	**-0.336**	-0.256	0.073
3	1.675	15,23	58,24	-0.074	0.150	0.119	0.135	0.125	-0.110	**-0.573**	-0.156	**0.647**	**0.370**	0.063
4	1.246	11,33	69,57	0.030	-0.099	0.024	**0.366**	**0.398**	**0.598**	-0.004	-0.277	0.012	-0.270	**0.435**
5	0.919	8,35	77,92	-0.258	0.579	-0.386	0.419	-0.207	0.260	0.217	0.194	-0.010	0.276	-0.053
6	0.778	7,08	85,00	0.236	0.642	0.152	-0.575	0.320	0.164	0.177	-0.112	0.073	-0.014	0.007
7	0.578	5,25	90,25	-0.398	-0.228	0.031	-0.305	0.118	-0.020	0.300	0.300	0.098	0.389	0.583
8	0.529	4,81	95,06	0.366	0.111	0.188	0.373	-0.079	-0.484	0.519	-0.205	0.221	-0.002	0.280
9	0.331	3,01	98,07	0.536	0.143	-0.069	0.019	-0.180	-0.019	-0.419	0.357	-0.329	0.116	0.480
10	0.157	1,43	99,50	-0.048	0.031	0.612	-0.043	-0.630	0.391	0.041	0.107	0.200	-0.123	0.038
11	0.055	0,50	100,00	0.045	0.020	-0.245	-0.017	0.095	-0.064	0.018	0.574	0.505	-0.582	0.020

Legenda: CP = componente principal; λ = autovalor; % = percentual explicativo; % ac. = percentual explicativo acumulado; Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s); LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); PPT = volume de chuva (mm); UR% = umidade relativa do ar (%); Tmim = temperatura mínima do ar (°C); Tmáx = temperatura máxima do ar (°C); *Leaf* = condição fenológica.

Oito das variáveis estudadas destacaram-se, mas considerado o plano de maior explicação (43%) formado pelas CP1 e CP2, as variáveis UR%, VmPOM, Vmax e Dhp foram as mais importantes. Sendo UR% relacionada positivamente à Vmax (CP1), e VmPOM relacionada, negativamente, com Dhp (CP2). Em outras palavras, valores mais elevados de UR% geraram maiores VmPOM, do mesmo modo como os menores Dhp. Considerando a CP3, Tmax e PPT exibem pesos consideráveis, sendo que, o grupo A se agrupou em boa medida no quadrante de menores Tmax e maiores PPT que o grupo B.

Choat *et al.* (2012) abordaram as implicações das mudanças nos macropadrões de precipitação e do aumento das temperaturas, afirmando que tais condições afetam a segurança hidráulica das árvores, levando a níveis prejudiciais de estresse hídrico. Nessas condições (baixa precipitação e alta temperatura) as árvores tendem a fechar os estômatos evitando a perda de água, o que pode ter contribuído para um maior conteúdo de água dentro das árvores do grupo A, fato que, consequentemente, pode ter afetado, reduzindo, as VmPOM.

Não obstante, no ambiente de Caatinga, por exemplo, De Souza *et al.* (2015) verificaram que a energia disponível para o controle da evapotranspiração é mais importante, do que o controle estomático, quando há disponibilidade de água no solo. Na região do sítio de ocorrência dos grupos de árvores de *Copaifera* sp., no período entre fevereiro a junho (cinco meses) as chuvas são reduzidas à razão de 52 mm/mês, enquanto entre julho a janeiro (sete meses) as chuvas aumentam a razão de 36 mm/mês, sendo que, as chuvas se iniciam e se estabelecem lentamente, e a seca se dá mais rapidamente (DUARTE, 2006).

A climatologia do estado do Acre foi estudada por Duarte (2006, 2011), que analisou recentemente uma série temporal de 16.801 dados diários de chuvas, entre 1960 e 2016, para a observação da sazonalidade e da tendência do comportamento das chuvas, constatando um aparente aumento da precipitação inferior a 0,8 mm, no intervalo de 45 anos (DUARTE, 2017). Em relação ao comportamento hidrometeorológico, Duarte (2011) observou a alternância sazonal de vazões fluviais extremas, acima de 900 m^3/s e abaixo de 50 m^3/s, considerando o mês mais úmido (janeiro) e o mais seco (julho).

É preciso considerar que a temperatura e o conteúdo de água no solo estão ligados, e ambos são relevantes para os níveis do conteúdo de água no xilema e, sendo o mês de julho o mais seco do ano, quando o conteúdo de água no solo é escasso, qualquer oscilação de temperatura corrobora para o ressecamento do tecido lenhoso. Isso pode explicar as maiores VmPOM mensuradas nas árvores do grupo B, considerando que o mês de julho é o mês mais seco do ano na região, pois no mês de setembro, em tese, começa haver um maior conteúdo de água no solo.

De acordo com Bergamaschi (2017), a variação térmica do solo e do ar afetam o desenvolvimento das plantas em muitos aspectos, altas temperaturas do ambiente aceleram o metabolismo devido ao maior gasto com a respiração, reduzindo a assimilação líquida. Por outro lado, as baixas temperaturas tendem a reduzir e prolongar os ciclos, aumentando a assimilação líquida devido ao equilíbrio entre respiração e fotossíntese.

Para Luo *et al*. (2020), o conteúdo de água do caule (θ) das árvores varia em resposta a fatores ambientais e estágios de crescimento da planta, assim, utilizaram medições de resistividade elétrica, para verificar o θ de árvores de *Allocasuarina verticillata,* espécie nativa da Austrália, cujas circunferências do tronco variaram entre 28 a 56,5 cm. Os autores

verificaram que o θ do alburno aumentou gradualmente durante a estação chuvosa e diminuiu substancialmente durante a estação seca, período em que a velocidade máxima diária da seiva era cerca de 10% da verificada na estação chuvosa, indicando um forte estresse hídrico.

A anatomia da madeira das árvores reflete sua interação com o ambiente durante todo o período de seu desenvolvimento. Carvalho *et al*. (2018) encontraram correlação entre fatores meteorológicos e a cronologia de *Copaifera langsdorffii*, e verificaram que meses mais quentes favoreceram o crescimento da madeira, assim como os meses mais úmidos.

As árvores de *Copaifera* sp. apresentam densidade da madeira, considerada média. De acordo com IPT (2021), a espécie *Copaifera multijuga* Hayne. apresenta madeira com densidade básica na faixa de 575 kg/m^3 e, enquanto o alburno é permeável, o cerne apresenta baixa permeabilidade. De modo geral, é esperado que as copaíbas apresentem o padrão macroanatômico semelhante a *C. langsdorffii*, que possui porosidade difusa, com poucos e pequenos vasos, predominantemente, solitários e múltiplos radiais, raios finos, escassos ou numerosos, não estratificados, e parênquima axial paratraqueal vasicêntrico e em faixas marginais, as quais demarcam as camadas de crescimento (CARVALHO *et al*., 2018; Latorraca, Castro e Santos (2018). Inclusive, de acordo com Fontana *et al.* (2018), as características anatômicas da madeira de *Copaifera lucens* estão de acordo com relatos obtidos para outras espécies de *Copaifera*.

Há uma clara tendência de que indivíduos apresentem maiores densidades à medida que os ambientes se tornam mais adversos à atividade fisiológica, sendo que a variação da densidade da madeira é tanto determinada pela variação da composição florística, como pelos fatores ambientais (OLIVEIRA *et al*., 2012). De acordo com Oliveira (2014), temperaturas elevadas, tendem a resultar em maiores medias de densidade da madeira, por afetarem os processos fisiológicos, inclusive a atividade cambial. Além disso, déficit hídrico e aridez são responsáveis por maior evapotranspiração, enquanto temperaturas baixas reduzem esse fenômeno.

De acordo com Martins, Santos e Latorraca (2021), a TI se mostrou uma tecnologia promissora, e com potencial para ser empregada na prospecção de reservatórios de oleorresina, pequenos acúmulos de oleorresina e de ocos e, também para identificar seções em que haja expectativa nula de serem encontradas tais condições. Entretanto, o percentual de falsos positivos (62,63 % dos tomogramas das árvores avaliadas), ou seja, tomogramas que levavam à uma interpretação errônea sobre a ocorrência de tais condições foi expressivo e, à princípio, poderia ter a umidade do interior do tronco como um fator importante. Todavia, quando comparados os resultados de prospecção das árvores dos dois grupos, nota-se que não houve prevalência de um em relação ao outro, quanto ao total de falsos negativos, visto que, no grupo A ocorreram 51 % e no grupo B 49 %.

Além do mais, não há explicação evidente do motivo pelo qual nas árvores do grupo A foi possível obter maior quantidade de oleorresina (total = 7610 mL), enquanto no grupo B apenas 70 mL foram obtidos (MARTINS, SANTOS e LATORRACA, 2021). Contudo, não se pode negar a possibilidade da aleatoriedade desta ocorrência, um tecido de xilema com maior conteúdo de água poderia, em tese, ocasionar, também uma retenção do oleorresina, inclusive devido a possíveis alterações no fenômeno de capilaridade dos condutos ou canais resiníferos. De acordo com Raven, Evert e Eichhorn (2001) oleorresina é um tipo de metabólito secundário lipídico, triglicerídeo terpenóide armazenador de energia, hidrofóbico e insolúvel, formado por

três moléculas de ácidos graxos e uma de glicerol. Mas, considerando a natureza dos reservatórios de oleorresina, considera-se que, não há uma relação direta com a quantidade de água presente no alburno.

4 CONCLUSÕES

O período sazonal interferiu nas velocidades de propagação das ondas mecânicas, independentemente da altura (Hp%) verificada.

A TI apresenta sensibilidade suficiente para captar mudanças relacionadas com o conteúdo de água no tronco das árvores, relativos aos períodos sazonais de seca e de transição para chuvoso.

Não há evidência de que a alteração das VPOM, ocasionada pela sazonalidade, resulte em mascaramento importante do resultado da TI, porque características que são importantes para a ocorrência de VPOM baixas (ocos, fissuras) não se alteram em função da variação ocasional do conteúdo de água no xilema.

VmPOM superiores a 700 m/s apresentaram correlação com uma maior UR% e com um *Leaf* baixo, enquanto VmPOM mais baixo com a condição de *Leaf* (classificação folhagem nova) predominante. Assim, considera-se que, velocidades médias de propagação de ondas superiores a 700 m/s indicam menores teores de umidade na madeira/árvore.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE – Governo do Estado do Acre. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese**. 2. ed. Rio Branco: Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), 356 p., 2010. Disponível em: http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202 /Documento_Sintese.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

AMARAL, E. F.; BARDALES, N. G.; PEREIRA, J. B. M.; GONÇALVES, R. C.; BERGO, C. L.; ARAÚJO, E. A.; AMARAL, E. F.; MELO, A. W. F. **Zoneamento pedoclimático para a seringueira e o café no município de Capixaba**. 1. ed., Rio Branco: Embrapa Acre, 2019. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1112991/1/26869.pdf. Acesso em: 1 dez. 2020.

AMODEI, J. B.; OLIVEIRA, B. R. U.; GURGEL, M. M.; CARVALHO, A. M.; MEDEIROS, R. A.; LATORRACA, J. V. F. Avaliação preliminar da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. através da Tomografia de Impulso. **Floresta e Ambiente**, v.17, n. 2, p. 124-128. DOI 10.4322/floram.2011.016.

ARCINIEGAS, A.; PRIETO, F.; BRANCHERIAU, L. C.; LASAYGUES, P. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. **Trees**, n.28, p.1559-1567, 2014. DOI: 10.1007/s00468-014-1062-6.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. (org). **As plantas e o clima: Princípios e aplicações.** Guaiba: Agrolivros, 2017. p. 85-115.

BERGAMASCHI, H. Temperatura e processos metabólicos. *In:* BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: Princípios e aplicações**. Guaiba: Agrolivros, 2017. p. 187-201.

BORGHETTI, M.; RASCHI, A.; GRACE, J. Ultrasound acoustic emission in water-stressed plants of *Picea abies* Karst. **Ann Sci For**, v. 46, (Suppl), p. 346s−349, 1989. DOI 10.1051/forest:19890577.

BUCUR, V. Acoustics of Wood. 2nd Edition. ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.

BUCUR, V. Ultrassonic tecniques for nondestrutive testing of standing trees. **Ultrasonics**. n. 43, p. 237-239, 2005. DOI 10.1016/j.ultras.2004.06.008.

CARLQUIST, S. How wood evolves: a new synthesis. **Botany**, n.90, p. 901–940, 2012. DOI 10.1139/B2012-048.

CARVALHO, D. C.; PEREIRA, M. G. G. P.; CARMO, J. F.; PACE, J. H. C.; SILVEIRA, L. D.; SILVA, A. B.; LATORRACA, J. V. F.; Dendrochronology and growth of *Copaifera langsdorffii* wood in the vegetative dynamics of the Pirapitinga Ecological Estation, state of Minas Gerais, Brazil. **Floresta**, v. 8, n. 1, p. 49 – 58, 2018. DOI 10.5380/rf.v48i1.49905.

CASAGRANDE, N. B. **Tomografia de impulso para determinação indireta da densidade básica de árvores em plantios comerciais de *Pinus taeda* L**. 2017. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1484/Disserta__o___ NAYARA_CASAGRANDE_15682103278763_1484.pdf. Acesso em: 16 set. 2021.

CASTRO, V. R.; FILHO, M. T.; ARIZAPANA, M. A.; SILVA, J. C.; FILHO, D. F. S.; POLIZEL, J. L.; BELINI, U. L. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de teca (*Tectona grandis* L.f.) através da Tomografia de Impulso. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 2, p.144-152, 2011. DOI 10.4322/floram.2011.032.

CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T. *et al.* Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, n. 7426, p. 752–755, 2012. DOI 10.1038/nature11688.

DE OLIVEIRA, L. G. S.; RIBEIRO, D. A.; SARAIVA, M. E.; MACÊDO, D. G. Chemical variability of essential oils of *Copaifera langsdorffii* Desf. in different phenological phases on a savannah in the Northeast, Ceará, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 97, p. 455-464, 2017. DOI 10.1016/j.indcrop.2016.12.031.

DE SOUZA, L. S. B.; DE MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; DA SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesq. agropec. bras**, v. 50, n. 8, 2015. DOI 10.1590/S0100-204X2015000800001.

DUARTE, A. F. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971 – 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 308-317, 2006. Disponível em: http://acrebioclima.pro.br/abcpublications/Environment_and_ Health/LBA023-2006_AFDuarte.pdf. Acesso em: 15 set. 2021.

DUARTE, A. F. As chuvas e as vazões na bacia hidrográfica do rio Acre, Amazônia Ocidental: caracterização e implicações socioeconômicas e ambientais. **Amazônia: Ci. & Desenv.**, v. 6, n. 12, p. 161-183, 2011. Disponível em: http://www.acrebioclima. pro.br/abcpublications/Environment_and_Health/n12_chuvas_e_as_vazoes_AFDuarte.pdf. Acesso em: 15 set. 2021.

DUARTE, A. F. Climatologia das chuvas e efeitos antrópicos da urbanização na Bacia do Rio Acre, Amazônia Ocidental. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 11 n. 1, p. 199-213, 2017. DOI 10.19180/2177-4560.v11n12017p199-213.

ESRI, 2018. ArcGIS Desktop. Redlands, CA.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 3. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2018. 624 p.

FONTANA, C.; PÉREZ-DE-LIS, G.; SANTINI-JUNIOR, L.; BATOSSO, P. C.; NABAIS, C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; LOUSADA, J. L. P. C. Wood Anatomy and growth ring boundaries of *Copaifera lucens* (Fabaceae). **IAWA Journal**, v. 0, n. 0, p. 1-11, 2018. DOI 10.1163/ 22941932-20170209.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics. Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, n. 4, n. 1, 2001.

HAO, G-Y; WHEELER, J. K.; HOLBROOK M. N.; GOLDSTEIN, G. Investigating xylem embolism formation, refilling and water storage in tree trunks using frequency domain reflectometry. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 8, p. 2321–2332, 2013. DOI 10.1093/jxb/ert090.

HEIDELBERG, F. R. **Quick guide ARBOTOM®: Tree Impulse Tomograph**. 2011.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Destinatários: Coordenação Geral CPTEC, São José dos Campos, 27 ago. 2020. 1 mensagem eletrônica.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP. **Informações sobre madeiras: Copaíba.** São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=31. Acesso em: 18 set. 2021.

JONES, H. G.; HIGGS, K.H.; BERGAMINI, A. The use of ultrasonic detectors for water stress determination in fruit trees. **Ann Sci For.** v. 46 (Suppl.), p. 338 – 341, 1989. DOI 10.1051/forest:19890575.

KÖCHER, P.; HORNA, V.; LEUSCHNER, C. Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. **Tree Physiology**, v. 33, n. 8, p. 817–832, 2013. DOI 10.1093/treephys/tpt055.

KUSHWAHA, C. P.; TRIPATHI, S. K.; TRIPATHI, B. D.; SINGH, K. P. Patterns of tree phenological diversity in dry tropics. **Acta Ecologica Sinica**, v. 31, n. 4, p.179–185, 2011. DOI 10.1016/j.chnaes.2011.04.003.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. N. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952. DOI 10.1080/01621459.1952.10483441.

LATORRACA, J. V. F.; RODRIGUES, N. D.; VIEIRA, M. C.; OHANA, C. C.; TEIXEIRA, J. G. Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânica. **Floresta e Ambiente,** v. 18, n. 4, p. 451-459, 2011. DOI 10.4322/floram.2011.064.

LATORRACA, J. V. F; CASTRO, J. P.; SANTOS, G. C. V. **Guia para identificação macroscópica de madeira**. 1. ed. Seropédica: Editora do autor, 2018. 78p.

LUO, Z.; DENG, Z.; SINGHA, K.; ZHANG, X.; LIU, N.; ZHOU, Y.; HE, X.; GUAN, H. Temporal and spatial variation in water content within living tree stems determined by electrical resistivity tomography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 291, 108058, 2020. DOI 10.1016/j.agrformet.2020.108058.

MARTINS-DA-SILVA, R. C. V., PEREIRA, J.F., LIMA, H. C.. O gênero *Copaifera* (Leguminosae – Caesalpinioideae) na Amazônia brasileira. **Rodriguésia**. v. 59, n. 3, p. 455-476, 2008. Disponível em: https://rodriguesia.jbrj.gov.br/FASCICULOS/rodrig59_3/004.pdf. Acesso em: 7 set. 2020.

MARTINS, K.; RIGAMONTE-AZEVEDO, C.; SILVA, M. G. C.; WADT, L. H. O. Copaíba: aspectos ecológicos e potencial de uso do oleorresina. *In*: SIVIERO, A.; MING, L. C.; SILVEIRA, M.; DALY, D.; WALLACE, R. **Etnobotânica e Botânica Econômica do Acre**. Rio Branco: Edufac, 2016, 428 p. Il. ISBN 978-85-8236-027-9.

MARTINS, B. C.; SANTOS, G. C. V.; LATORRACA, J. V. F. Oleoresin prospection in *Copaifera* sp. trees by using impulse tomography. CERNE, v. 27, 2021. doi: 10.1590/01047760202127012831.

MENDES, F. H.; SOUZA FILHO, D. F. Frequency variation of mechanical waves of the impulse tomograph based on geographic north. **Sci. For**., Piracicaba, v. 47, n. 122, p. 353-358, 2019. DOI 10.18671/scifor.v47n122.18.

OLETIC, D.; ROSNER, S.; ZOVKO, M.; BILAS, V. Time-frequency features of grapevine's xylem acoustic emissions for detection of drought stress. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 178, 105797, 2020. DOI 10.1016/j.compag.2020.105797.

OLIVEIRA, G. M.V. **Densidade da madeira em Minas Gerais: Amostragem, espacialização e relação com variáveis ambientais**. 2014. 126f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstre am/1/4880/1/TESE_Densidade%20da%20madeira%20em%20Minas%20Gerais%20%20amo

stragem%2C%20espacializa%C3%A7%C3%A3o%20e%20rela%C3%A7%C3%A3o%20com%20vari%C3%A1veis%20ambientais.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

OLIVEIRA, G. M. V.; DE MELLO, J. M.; TRUGILHO, P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; ALTOÉ, T. F.; SILVA NETO, A. J.; OLIVEIRA, A. D. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do Estado de Minas Gerais. **CERNE**, v. 18, n. 2, 2012. DOI 10.1590/S0104-77602012000200020.

PENA, J.; GRACE, J. Water relations and ultrasound emissions of *Pinus sylvestris* L. before, during and after a period of water stress. **New Phytol,** n. 103, p. 515−524, 1986. DOI 10.1111/j.1469-8137.1986.tb02889.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2001. ISBN 85-277-0641-5.

ROQUETTE, J. G.; DRESCHER, R.; BRONDANI, G. E.; SOUZA, E. C.; RONDON NETO, R. M.; EBERT, A.; TEIXEIRA, L. R.; DIAS, A. P.; GAVA, F. H. Age and growth affect oleoresin yield from copaíba trees in the Cerrado–Amazônia ecotone. **CERNE**, v. 24, n. 2, p. 106-113, 2018. DOI 10.1590/01047760201824022527.

ROLLO, F. M. A; SOAVE JUNIOR, M. A.; VIANA S. M.; ROLLO, L. C. P.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. Comparação entre leituras de resistógrafo e imagens tomográficas na avaliação interna de troncos de árvores. **CERNE**, v.19, n. 2, pág. 331-337, 2013. DOI 10.1590/S0104-77602013000200018.

ROWLAND, L.; MALHI, Y.; SILVA-ESPEJO, J. E.; FARFÁN-AMÉZQUITA, F.; HALLADAY, K.; DOUGHTY, C. E.; MEIR, P.; PHILLIPS, O. L. The sensitivity of wood production to seasonal and interannual variations in climate in a lowland Amazonian rainforest. **Oecologia,** v. 174, p. 295–306, 2014. DOI 10.1007/s00442-013-2766-9.

VALENTIN, J. L. **Ecologia Numérica: Uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012. 168 p.

CAPÍTULO IV:
USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA PREDIÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE OLEORRESINA DE *Copaifera* sp.

RESUMO

Um dos modos para se obter valor econômico do patrimônio de biodiversidade existente no Brasil é pela bioprospecção, e o manejo de espécies florestais se beneficia das novas ferramentas tecnológicas nas pesquisas e em aplicações à campo. Um dos problemas centrais da exploração do oleorresina de árvores do gênero *Copaifera* L. é a determinação da existência, ou não, de reservatório dessa substância no interior do tronco. A tomografia de impulso (TI) é uma tecnologia com potencial se prospectar esses reservatórios. Mas, a tomada de decisão à respeito dos resultados que a TI fornece se embasa, à princícpio, na análise visual dos tomogramas, mas esses representam um conjunto de dados, que pode denotar informações mais específicas, que ponderadas conjuntamente com variáveis dendrométricas e do ambiente, podem ser utilizadas para a predição do volume de oleorresina. Este estudo teve como objetivo avaliar diferentes configurações de Redes Neurais Artificiais (RNA) e indicar o modelo mais apropriado para a predição do oleorresina de *Copaifera* sp. Foram realizadas duas etapas de testes, nas quais empregou-se a arquitetura geral de aprendizado supervisionado *Multilayer Perceptron* – MLP. Na etapa 1 foram treinadas e validadas 1000 RNA para diferentes números de neurônios na camada oculta (2N, 4N, 8N, 16N, 20N, 30N), combinados com 3000, 5000 e 10000 ciclos de iteração. Na etapa 2, com base nas configurações consideradas as mais promissoras, foram treinadas e validadas 10 RNA. Em ambas as etapas, as RNA foram julgadas com base em parâmetros de qualidade, os quais: *bias*, variância (s^2), Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e correlação I, além do Erro padrão da estimativa (*Syx*), Erro padrão da estimativa relativo (*Syx%*) e Coeficiente de variação (CV%). Na etapa 1, no treinamento, todos os tipos de RNA foram extremamente eficientes, alcançando correlações médias superiores a 0,90, enquanto na validação três modelos de RNA (4N-5000, 16N-3000 e 30N-5000) apresentaram correlação satisfatória, respectivamente, 0,808, 0,803 e 0,766. Os critérios de qualidade de aprendizado, os CV%, os parâmetros *Syx* e *Syx%*, bem como os gráficos de dispersão indicaram a RNA 5/16N-3000 ciclos como a mais eficiente, tanto no treinamento quanto na validação. As variáveis estudadas são, à princípio, suficientes para estimar, através de RNA, o volume de oleorresina esperado para determinada seção do tronco de árvores de *Copaifera* sp., devido à existência de correlação não linear verificada entre as mesmas.

Palavras-chave: Copaíba, *Deep Learning*, Reservatório de oleorresina, Produtos florestais não madeireiros, Tecnologia Florestal.

ABSTRACT

One of the ways to obtain economic value from the biodiversity heritage existing in Brazil is through bioprospecting, and the management of forest species benefits from new technological tools in research and field applications. One of the central problems in the exploitation of oleoresin from trees of the genus Copaifera L. is the determination of the existence, or not, of a reservoir of this substance inside the trunk. Impulse tomography (IT) is a technology with the potential to prospect these reservoirs. However, decision making regarding the results that (TI) provides is based, in principle, on visual analysis of tomograms, but these represent a data set that can denote more specific information, which, when weighted together with dendrometric and environmental variables, can be used for the prediction of oleoresin volume. This study aimed to evaluate different configurations of artificial neural networks (ANN) and indicate the most appropriate model for predicting the oleoresin of Copaifera sp. Two stages of tests were performed, in which the general architecture of supervised learning Multilayer Perceptron – MLP was employed. In step 1, 1000 ANNs were trained and validated for different numbers of neurons in the hidden layer (2N, 4N, 8N, 16N, 20N, 30N), combined with 3000, 5000 and 10000 iteration cycles. In step 2, based on the configurations considered the most promising, 10 ANNs were trained and validated. In both steps, ANNs were judged based on quality parameters, such as bias, variance (s2), Root Mean Square Error (RQME), Sum of Squared Residues (SQR), and correlation I, in addition to Standard Error of the Estimate (Syx), Relative Standard Error of the Estimate (Syx%), and Coefficient of Variation (CV%). In step 1, in training, all ANN types were extremely efficient, reaching average correlations higher than 0.90, while in validation three ANN models (4N-5000, 16N-3000, and 30N-5000) showed satisfactory correlation, respectively 0.808, 0.803, and 0.766. The learning quality criteria, CV%, Syx and Syx% parameters, and scatter plots indicated the 5/16N-3000-cycle ANN as the most efficient both in training and validation. The variables studied are, in principle, sufficient to estimate, through ANN, the expected oleoresin volume for a given Copaifera sp. tree trunk section, due to the existence of non-linear correlation verified among them.

Keywords: Copaíba, Deep Learning, Oleoresin Reservoir, Non-timber Forest Products, Forest Technology.

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas em biotecnologia avançam, demonstrando as inumeráveis qualidades medicinais, cosméticas e energéticas dos compostos químicos existentes na flora brasileira. No entanto, muitas vezes, a heterogeneidade genética, morfológica e fisiológica das populações vegetais, e do ambiente onde estas se desenvolvem, são um desafio para a extração e o melhor aproveitamento das matérias-primas originárias deste capital natural.

Uma das maneiras para se obter valor econômico deste reconhecido patrimônio de biodiversidade é a bioprospecção (SACCARO JUNIOR, 2011; MARQUES, 2020) que, além de atender ao exigido pela legislação, demanda conhecimento sobre as espécies de interesse, associado à tecnologia.

Assim como a agricultura de precisão emprega diferentes tecnologias de informação, visando otimizar a produção em diferentes etapas das atividades agrícolas (CISTERNAS *et al*., 2020), o manejo de espécies florestais, também, se beneficia das novas ferramentas tecnológicas, no campo da pesquisa e em aplicações à campo.

Weiss, Ludvig e Živojinović (2020) revisaram publicações científicas voltadas para inovação em silvicultura e base florestal dos últimos 40 anos, constatando um predomínio de artigos dedicados à indústria de base florestal, porém apenas uma pequena parte dedicada aos produtos florestais não madeireiros – PFNM (3,48%). Angelo *et al.* (2018), analisaram o mercado de PFNM na Amazônia brasileira, entre 1973 e 2011, e indicaram o óleo de copaíba como um dos produtos mais relevantes no cenário. Os autores indicaram a necessidade de modernização da indústria extrativa, aliada a uma política de preço mínimo, investimento público em infraestrutura e acessibilidade ao mercado.

Um dos problemas centrais da exploração do oleorresina de *Copaifera* é a própria determinação da existência ou não de um reservatório no interior do tronco, o que, muitas vezes, leva à realização de incisões desnecessárias em árvores não acumuladoras, mas que possuem uma imensa importância ecológica.

Conforme relatado nos Capítulos 2 e 3, a tomografia de impulso (TI) foi indicada como uma tecnologia com potencial utilização na prospecção dos reservatórios de oleorresina. Entretanto, a tomada de decisão à respeito dos resultados que a TI fornece, à princípio, ainda seria intuitiva e embasada na análise visual dos tomogramas. Todavia, um tomograma oculta em si um conjunto de dados, que pode denotar informações mais específicas, especialmente, se ponderadas conjuntamente com outras variáveis referentes às árvores. Além de ser um dispositivo de diferenciação direta das seções tomografadas, e assim de cada árvore, representa outros fatores que são incógnitos, ou seja, sobre os quais não se tem conhecimento, mas que corroboram para a caracterização dos troncos.

Por tanto, a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) é uma alternativa, ao que tudo indica, promissora e apropriada, pois são recomendadas para a simplificação de problemas de controle de sistemas, que apresentam características não lineares, por meio da cognição e da inteligência artificial (LUDWIG JUNIOR.; MONTGOMERY, 2007; SANTOS, 2013; ABIODUN *et al*., 2018; PINHEIRO, 2020). Como visto nos capítulos anteriores, os dados das

variáveis concernentes às árvores e seus tomogramas possuem correlações não lineares entre si.

Abiodun *et al*. (2018) ressaltam a ampla aplicabilidade das RNA em diferentes campos do conhecimento (segurança, ciência, engenharia, ciência médica, agricultura, finanças, banca, meteorologia e clima, educação, ambiente, energia, mineração, seguro, marketing, etc), além de muitas outras áreas emergentes.

Essas redes são um tipo de programa de computador que pode "aprender" por si mesmo, sendo consideradas uma forma de processamento moderno relacionado a abordagem de *big data*, e construídas com modelos de muitas camadas, que fazem parte do campo do aprendizado profundo (WEHLE, 2017). Também, é dito que, as RNA são sistemas computacionais de camadas paralelas, constituídos de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais) conectadas entre si de modo a executar uma determinada tarefa (BINOTI, 2012; FLECK *et al*., 2016). Esses "neurônios" são modelos matemáticos inspirados no funcionamento dos neurônios biológicos, que processam as informações recebidas, as ponderam por pesos sinápticos e fornecem uma ou mais respostas (HAYKIN, 2001; SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Esse sistema matemático inteligente é capaz de reproduzir o raciocínio, representar o conhecimento e gerar o aprendizado de máquina, de modo supervisionado ou sem supervisão, interpretando estímulos sensoriais, segundo o estipulado para o neurônio biológico no campo da neurocomputação (LUDWIG JUNIOR.; MONTGOMERY, 2007).

De acordo com Rauber (2014), as RNA perceptron multi-camadas, ou seja, com pelo menos uma camada oculta constituída por um ou mais neurônios, têm uma arquitetura que realiza aproximações universais de funções, cuja aprendizagem é obtida através de um conjunto de dados de treino, que pode se dar pela retropropagação de erro. Ademais, Rauber (2014) explica que a função do perceptron multi-camada é realizar cálculos não lineares para muitas aplicações. O treinamento supervisionado é inferência indutiva pura (SILVA, SPATTI; FLAUZINO, 2010), ou seja, parte da consideração de um conjunto de variáveis particulares para estimar uma, ou mais, variáveis específicas, em função de sua relação com as variáveis já reconhecidas como verdadeiras.

No setor florestal, principalmente o madeireiro, essa ferramenta preditiva tem sido utilizada para estimar a altura e o volume do fuste (VENDRUSCOLO *et al*. 2017; DE AZEVEDO *et al.* 2020; LOPES *et al.*, 2020), variáveis biométricas de mudas de espécies florestais (FERNANDES *et al*., 2019), características físico-mecânicas da madeira (MIGUEL *et al.* 2018😉, mortalidade e sobrevivência de árvores, em floresta com coleta seletiva (REIS *et al*., 2018), entre outras. Além disso, pode ser utilizada para obter o potencial da produção de extrativos (DIAMANTOPOULOU, 2012). Figueiredo, Silva e Moreira (2018) aplicaram RNA para estimar a quantidade de água de cheiro (parte separada do óleo essencial, água com resíduo de óleo de *Piper aduncum* L.) obtida por destilação, utilizando na camada de entrada a biomassa e o tempo de destilação.

Desse modo, nesta pesquisa, buscou-se avaliar modelos de estimação de variáveis quantitativas, por meio do treinamento de diferentes configurações de RNA, e indicar a mais apropriada para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp..

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos sítios, aquisição e definição dos dados

O conjunto de dados utilizado nesta pesquisa foi obtido a partir de medições dendrométricas e avaliações com tomografia de impulso em 35 árvores nativas do gênero *Copaifera* L., cinco delas localizadas no sítio A (área destinada para a criação da Unidade de Conservação Reserva Extrativista Rio Croa – RESEX Rio Croa), em Cruzeiro do Sul (SEMA, 2011) e 30 no sítio B (Projeto de Assentamento Extrativista São Luiz do Remanso – PAE Remanso) no município de Capixaba, ambos situados no estado do Acre, Brasil (Figura 1).

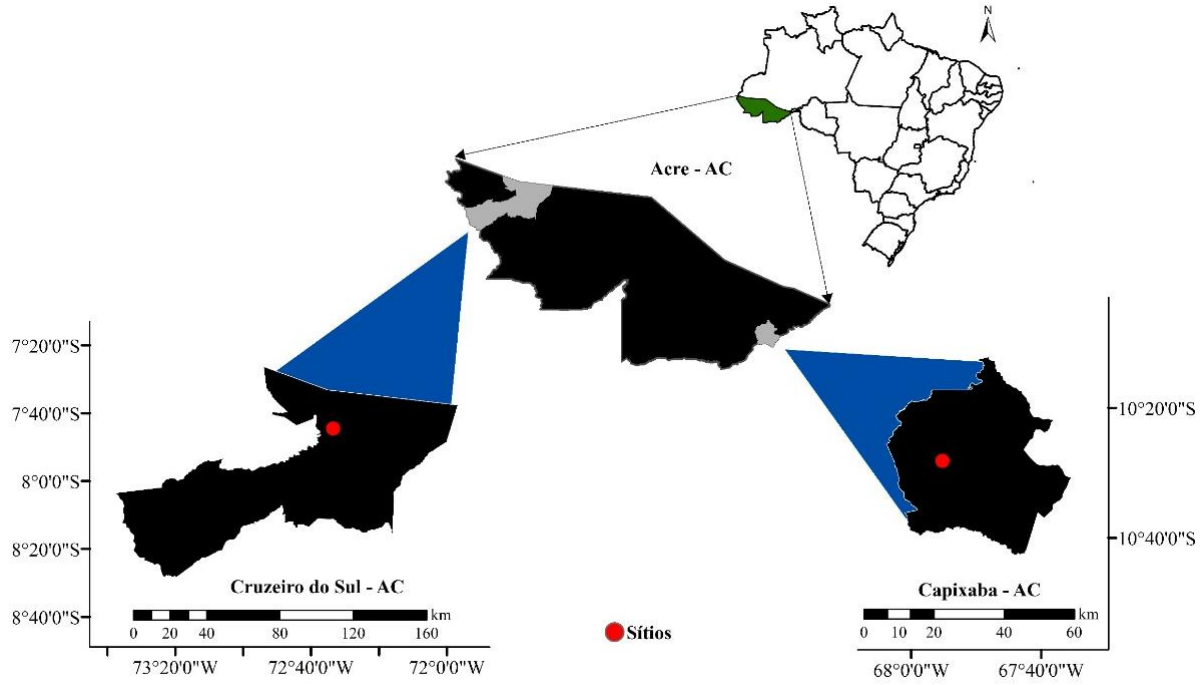


Figura 1. Localização dos sítios originários das árvores de *Copaifera* sp., das quais se obtiveram os tomogramas, obtidos por propagação de ondas mecânicas, analisados.

A seguir são apresentadas informações gerais, bióticas e abióticas, que caracterizam os ambientes dos referidos sítios A e B (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos sítios de localização e quantificação de indivíduos arbóreos de *Copaifera* sp. estudados e de tomografias realizadas em 2018 e 2019.

Característica		Sítio A	Sítio B	Fonte
Regional		Juruá	Alto Acre	SEMA (2010a)
Localização		10º 28’ S e 67º 55’ O	7º 44’ S e 72º 32’ O	-
Cobertura vegetal		Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas com dossel emergente (Dbe) + Floresta Ombrófila Aberta de Terras Baixas com Bambu (Abb)	Floresta Ombrófila Densa Aluvial com dossel emergente (Dae) + Floresta Ombrófila Aberta Aluvial com palmeiras (Aap)	IBGE (2020)
Solo		Argissolo vermelho-amarelo Distrófico (PVAd)	Plintossolo Argilúvico Distrófico (FTd)	IBGE (2020)
Clima		sub-tipo Af	sub-tipo Am	Duarte; Mascarenhas (2007)
Relevo		150 a 270 m relevos tabulares declives suaves à acentuados	130 e 200 m topos tabulares algumas áreas planas	SEMA (2010b)
Total de árvores		5	30	35
AvT	DAP	1	12	13
	Hp%	4	18	22
NT		21	102	123

Legenda: AvT = avaliação tomográfica; DAP = diâmetro à altura do peito; Hp% = referente às 5 alturas de prospecção; NT = número total de tomogramas.

Duarte (2017) considera que o padrão climatológico do estado é o mesmo, pelo menos, desde 1961, embora, devido à maior incidência de desmatamento, a região do sítio B apresente diferentes regimes de chuvas, em decorrência de diferenças nos graus de preservação (DUARTE; MASCARENHAS, 2007). Além do mais, ambos os sítios são classificados como medianamente vulneráveis (SEMA, 2010a).

Para o georreferenciamento das árvores utilizou-se o aplicativo de GPS C7 Campeiro/UFSM, Datum WGS84 (GIOTTO, 2014). Para a mensuração dos diâmetros e das alturas utilizou-se equipamento de escalada rapel, trena e fita métrica.

Na Tabela 2 encontram-se relacionadas as variáveis (categorias de dados) estipuladas para a estruturação das RNA treinadas, e avaliadas, como preditoras de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* sp.. As variáveis foram obtidas conforme detalhado por Martins, Santos e Latorraca (2021) e no Capítulo 3.

Tabela 2. Definição de variáveis utilizadas para a configuração das RNA, para a predição do volume de oleorresina de *Copaifera* sp., em árvores nativas da Amazônia Ocidental, Acre, Brasil.

Variável	Sigla	Unidade	Método de obtenção	Camada
1) Origem	-	-	cr = sítio A (rio Croa) valor = 1	entrada categórica
2) Origem	-	-	rm = sítio B (Remanso) valor = 2	entrada categórica
3) Altura total da árvore	Ht	m	altura do fuste = mensurada copa = estimada	entrada
4) Altura de realização da tomografia (%)	Hp%	%	determinação prévia	entrada
5) Altura de realização da tomografia	Hp	cm	direto no fuste	entrada
6) Diâmetro	Dhp	cm	direto no fuste, em cada Hp%	entrada
7) Velocidade média de propagação da onda mecânica	VmPOM	m/s	obtida da tomografia acústica	entrada
8) Velocidade mínima de propagação da onda mecânica	Vmin	m/s	obtida da tomografia acústica	entrada
9) Velocidade máxima de propagação da onda mecânica	Vmax	m/s	obtida da tomografia acústica	entrada
10) Percentual de área afetada por velocidades baixas	LSa	%	mensuração direta da imagem	entrada
11) Área afetada por velocidades baixas	ASa	cm^2	conversão de LSa% em função da área da circunferência	entrada
12) Sazonalidade	Saz	-	classificação: 2 = chuva 1 = transição para chuva 0 = seca extrema	entrada
13) Porcentual de perda de resistência mecânica	PRM	%	obtido do tomograma mecânico	entrada
14) Volume de oleorresina	Vol	ml	sonda *Pressler*	saída

Nos Anexos III, IV, V e VI são apresentados, como exemplos, os tomogramas referentes às alturas de prospecção de 25, 50, 75 e 100%, com os respectivos percentuais e direção de perda de resistência mecânica.

2.2 Domínio do problema

- O volume de oleorresina de *Copaifera* sp. é um produto de difícil estimação;

- A tomografia de impulso (TI) se mostrou uma tecnologia com potencial para ser empregada na prospecção de oleorresina, viabilizando o agrupamento das árvores em: i) Necessariamente, sem indícios de reservatório ou outra exceção; ii) Com potencial para produtoras de oleorresina;

- As árvores objeto deste estudo produziram entre 0 mL e 3600 mL;

- Cada tomograma reúne em si dados de variáveis de interesse para a compreensão das condições internas das árvores.
- PRM, VmPOM, Vmin e Vmax, são extraídas do conjunto das velocidades de propagação de ondas mecânicas (VPOM);

- LSa% é calculada, por meio da classificação de tomogramas convertidos para cor na escala de cinza, com o emprego de programa de análise de imagem Arcmap 10.6.1 (ESRI, 2018), e Asa é estimada a partir de LSa% e da área obtida para determinado Dhp;

- Variáveis dendrométricas (Ht, Hp%, Hp e Dhp) são mensuradas ou estimadas diretamente no local onde a árvore de encontra, caracterizam o porte das árvores e as seções de referência onde foram realizadas as TI;

- Sazonalidade diz respeito ao período do ano em que a tomografia foi realizada, e o período sazonal influencia as VmPOM e Vmax;

- Sítio é determidado pelo local onde a árvore se encontra, representando, em parte, a variabilidade das características morfológicas e anatômicas das árvores.

Todas as variáveis são facilmente obtidas e tiveram sua entropia testada por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) de uma matriz de dimensão 12 x 123 (variáveis x observações referentes ao número de tomogramas), a qual foi reduzida a um sistema de coordenadas que amplia a percepção de similaridades e diferenças, considerando a não linearidade da correlação entre as variáveis. Para tanto, foram empregues as orientações de Ferreira (2018), Valentin (2012) e Hair Jr. *et al*. (2009). Para a mineração dos dados utilizou-se o *software Paleontological Statistics* – Past 4.02 (HAMMER *et al.*, 2001).

2.3 Configuração, treinamento e validação das Redes Neurais Artificiais

A Figura 2 representa as camadas de neurônios (entrada, oculta/intermediária, saída) e as variáveis que as constituem, resultando na configuração das RNA. Ressalta-se que, na camada oculta, o número de neurônios (2N, 4N, 8N, 16N, 20N e 30N) foram testados em redes distintas. Para a realização dos cálculos a condição esperada foi considerada o volume de oleorresina produzido. Para as variáveis categóricas foi aplicada a validação cruzada simples como separador.

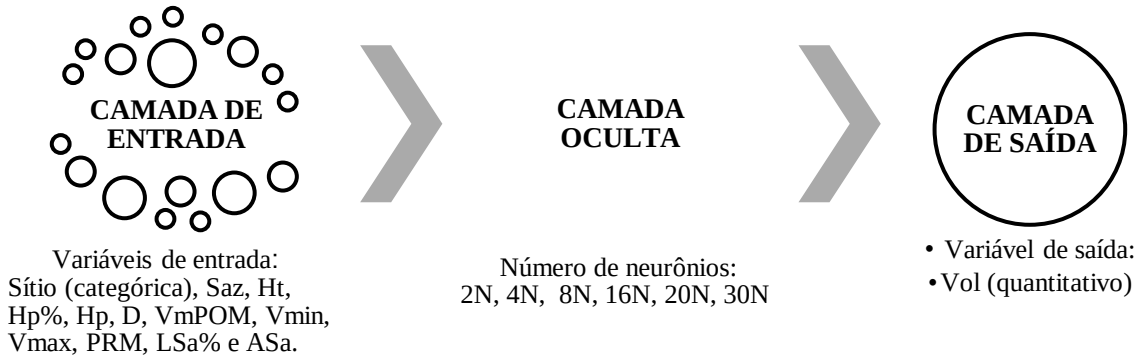


Figura 2. Representação da configuração das camadas de neurônios das RNA treinadas para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp., de árvores nativas da Amazônia Ocidental, Brasil. Legenda: Sítio = sítios de localização das árvores; Saz = períodos sazonais (seco, transição para chuva, chuvoso); Ht= altura total da árvore (m); Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); Hp = altura de prospecção (cm); VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); PRM = porcentagem de perda de resistência mecânica; LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); ASa = área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (cm^2); N = neurônio; Vol = volume de oleorresina (mL).

De modo genérico, o processamento dos neurônios artificiais, na camada intermediária (oculta) é obtido pela função da soma (*sum function*) e pela função degrau (*step function*). Este tipo de arquitetura de três camadas (camada de entrada, camada oculta e camada de saída) permite classificar informações complexas e padrões, segundo um critério de erro máximo permitido (FLECK *et al*., 2016).

Para determinar a melhor configuração de RNA foram realizadas duas etapas de procedimentos.

A Etapa 1 consistiu no treinamento e validação de 1000 redes neurais para diferentes números de neurônios na camada oculta (2N, 4N, 8N, 16N, 20N, 30N), combinados com 3000, 5000 e 10000 ciclos de iteração. Resultando nas estruturas mostradas abaixo (Figura 3), que totalizaram 18.000 treinamentos e 18.000 validações.

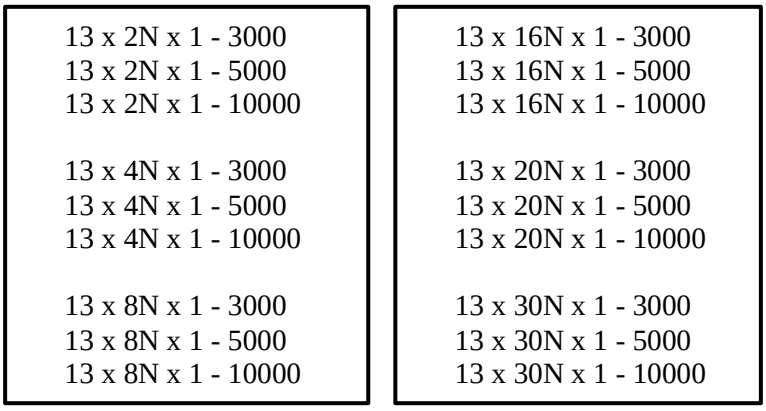


Figura 3. Indicação das configurações adotadas nas etapas de treinamento e validação das RNA testadas neste estudo. Legenda: 13 = número de variáveis de entrada; 2N, 4N, 8N; 16N; 20N; 30N = número de neurônios na camada oculta; 1 = número de variáveis de saída; 3000, 5000, 10000 = número de ciclos de iteração.

A seleção das RNA mais promissoras foi realizada a partir da obtenção das médias dos parâmetros de qualidade de cada um dos conjuntos de 1000 redes, os quais: *bias*, variância (s^2), Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e correlação I. Com base nas médias dos parâmetros, foram construídos gráficos de colunas, visando facultar a comparação entre as diferentes configurações de RNA (modelos de RNA), evidenciando parâmetros fortes e fracos. Esta etapa foi chamada de etapa de teste.

A Etapa 2 compreendeu a seleção das configurações mais promissoras, e realização do treinamento e da validação de 10 RNA para cada modelo, os quais foram avaliados em função dos seus respectivos parâmetros de qualidade.

Em ambas as etapas, empregou-se a arquitetura geral de aprendizado supervisionado (LUDWIG JR.; MONTGOMERY, 2007), utilizando-se o paradigma neural (LUDWIG JR.; MONTGOMERY, 2007) *Multilayer Perceptron* – MLP (HEIDARI *et al*., 2019) ou perceptron de múltiplas camadas, com função de ativação sigmoidal das camadas oculta e saída, sendo a função de transferência não-linear do tipo *sigmóide* um aproximador universal, segundo Ludwig Jr. e Montgomery (2007). O procedimento envolveu a normalização estatística convencional dos dados e uma posterior desnormalização para os valores de origem. Utilizou-se o programa NeuroDAP – Sistema para Geração e Aplicação de Redes Neurais Artificiais, versão 4.0 (DAP Florestal, 2020; BONETE; LANSSANOVA, 2020). O algoritmo treinado foi o *Resilient Propagation* (RPROP+), com valores da taxa de aprendizado variando entre zero (0) e um (1), utilizando-se como critério de parada o erro médio de 0.0001.

Foram utilizados 70% dos dados para processos de treinamento e 30% para processos de validação, que foram selecionados, manualmente, em função dos volumes de oleorresina coletados, de modo que, tanto o treinamento quanto a validação contivessem dados representativos dentro da variabilidade dos volumes. A validação determina se a rede não decorou os dados de entrada e atesta a aplicabilidade da melhor RNA (LUDWIG JR.; MONTGOMERY; 2007). Para as RNA finalistas, foram produzidos gráficos de dispersão visando a aferição do ajuste dos modelos.

2.4 Definição dos critérios de qualidade

A seleção da RNA foi realizada com base em seus *bias*, também chamado de vies, limiar, junção aditiva ou elo sináptico, e na Variância (s^2), além de parâmetros estatísticos complementares, definidos na Tabela 3:

Tabela 3. Parâmetros estatísticos (de qualidade) para avaliação e seleção de RNA para a estimação do volume de oleorresina em *Copaifera* sp..

Teste	Fórmula	Definição
Correlação	$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\lvert X_i - \bar{X}\rvert)(\lvert Y_i - \bar{Y}\rvert)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}}$	r = Coeficiente de correlação X_i = Valores medidos Y_i = Valores estimados $\bar{X}$ = Média dos valores medidos $\bar{Y}$ = Média dos valores estimados n = Número de observações
	$R^2_{Ajustado} = \left[1 - \left(\frac{(1-R^2) \quad x \quad (n-1)}{n-p-1}\right)\right]$	$R_Ajustado^2$ = coeficiente de determinação ajustado R^2 = coeficiente de determinação n = número de dados utilizados no ajuste p = número de parâmetro, com exceção do intercepto
Raiz do Erro Quadrático Médio	$RQME = \frac{100}{\bar{h}} * \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h}_i)^2 / n}$	h = h100% observadas $\bar{h}$ = Média dos h100% observados n = Número total de observações
Soma dos Quadrados dos Resíduos	$SQR = \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y})^2 = \hat{e}$	n = Número total de observações Y_i = Valores estimados $\bar{Y}$ = Média dos valores estimados
Erro-padrão da estimativa em porcentagem	$S_{yx} = \sqrt{QM_{res.}}$	*Syx* = Erro-padrão da estimativa QM_(res.) = Quadrado Médio do resíduo, obtido na análise da variância
	$S_{yx\%} = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} * 100$	*Syx* (%) = Erro padrão da estimativa relativo *Syx* = Erro padrão da estimativa absoluto $\bar{Y}$= Média aritmética real da variável dependente
Coeficiente de variação (CV%)	$CV\% = \frac{Dp}{\bar{X}} * 100$	CV% = coeficiente de variação Dp = desvio padrão $\bar{X}$ = Média dos valores medidos

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, no plano da ACP formado pelos eixos dotados de maior explicação (46,21%), verifica-se que, os tomogramas do sítio A aglomeraram-se, predominantemente, no quadrante característico pelos valores de VmPOM, Vmin e Vmax mais baixos, enquanto no sítio B essas variáveis ocorreram dentro de um espectro mais abrangente. Nota-se que, a Saz chuvoso resultou nas velocidades mais baixas, se comparado ao período seco e ao período de transição para chuvoso. Também é possível distinguir que, as variáveis relacionadas ao percentual de área da seção afetada por incidência de baixas velocidades (LSa% e ASa) mais elevadas ajustaram-se às variáveis PRM, Dhp e, em certa medida, com o Vol, e que esses valores elevados ocorreram mais concentrados nas menores alturas de prospecção de oleorresina.

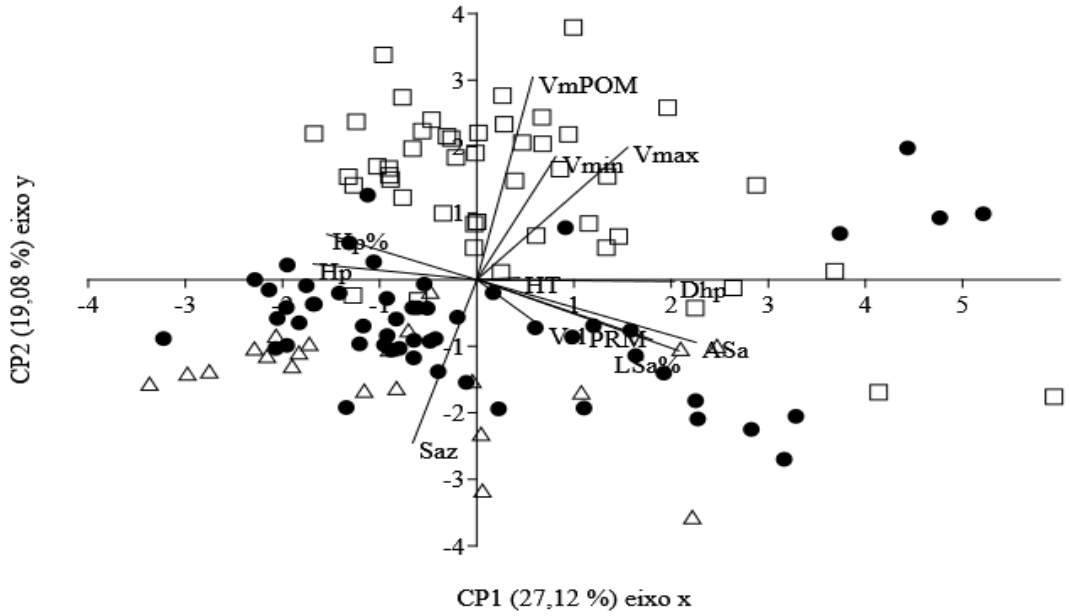


Figura 4. Análise de Componentes Principais (ACP) representativa do plano com 46,21 % de explicação da variabilidade dos dados e de semelhanças entre tomogramas de árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil. Legenda: Δ= sítio A – período chuvoso, 2018; □ = sítio B – período seco; ● = sítio B – período de transição para chuvoso, 2019; Saz = períodos sazonais (seco, transição para chuva, chuvoso); Ht= altura total da árvore; Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); Hp = altura de prospecção (cm); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s); Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); PRM = porcentagem de perda de resistência mecânica (%); LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); Asa = área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (cm^2); Vol = volume de oleorresina (mL).

Na CP1 (27,12%) reconhecem-se LSa% e ASa como as variáveis que apresentaram os maiores pesos, demonstrando a importância que possuem como indicadoras do *status* do tomograma, utilizado como referência para a avaliação não invasiva do tronco. Na CP2 (19,08%), VmPOM e Saz apresentaram os maiores pesos, sendo esses negativamente correlacionados, significando que nos períodos mais secos as VmPOM se elevaram. A CP3 e a CP4 revelaram a associação entre as variáveis relacionadas com as alturas (Hp% e Hp) e os PRM, assim quanto mais elevadas as alturas menores os valores de PRM. Porém, em relação à Ht, a análise sugere que a PRM é menor em alturas maiores. Ampliando-se a análise para uma explicação de 92,98%, Vol e Vmin de destacaram como variáveis com pesos fortes (Tabela 4).

Tabela 4. Sumário da Análise de Componentes Principais de 13 dimensões (variáveis), empregadas para a predição de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

Sumário da ACP				Pesos											
CP	λ	%	% acc.	Saz	Ht	Hp%	Hp	Dhp	VmPOM	Vmin	Vmax	PRM	LSa%	ASa	Vol
1	3,255	27,12	27,12	-0,128	0,085	-0,300	-0,327	**0,395**	0,112	0,158	0,302	0,351	**0,404**	**0,438**	0,133
2	2,290	19,08	46,21	**-0,476**	0,006	0,133	0,046	-0,005	**0,591**	0,359	**0,386**	-0,175	-0,207	-0,183	-0,140
3	1,956	16,30	62,50	0,200	0,109	**0,516**	**0,513**	-0,182	0,015	0,113	0,278	**0,427**	0,332	0,046	0,022
4	1,186	9,89	72,39	0,027	**0,726**	0,091	0,243	0,376	0,094	-0,202	-0,118	-0,245	-0,111	0,270	-0,236
5	1,097	9,14	81,53	0,085	0,443	-0,163	-0,053	-0,216	0,190	-0,138	0,109	0,048	-0,109	-0,258	0,757
6	0,698	5,82	87,35	0,398	0,309	-0,219	-0,120	-0,214	-0,054	0,754	-0,155	-0,049	0,028	-0,071	-0,186
7	0,676	5,64	92,98	-0,366	-0,069	0,273	0,186	0,277	-0,272	0,436	-0,381	-0,120	-0,029	0,134	0,484
8	0,371	3,09	96,08	0,599	-0,315	0,080	0,081	0,391	0,123	0,101	0,293	-0,160	-0,408	0,171	0,207
9	0,217	1,81	97,89	0,025	-0,105	0,019	0,019	-0,510	0,202	-0,039	-0,011	-0,472	0,202	0,635	0,138
10	0,132	1,10	98,99	0,217	-0,128	0,061	0,011	0,290	0,396	-0,049	-0,267	-0,304	0,621	-0,370	0,060
11	0,074	0,62	99,61	0,058	-0,104	0,001	0,015	-0,053	0,551	-0,023	-0,574	0,494	-0,252	0,202	-0,018
12	0,047	0,39	100,00	0,085	0,142	0,677	-0,714	-0,027	-0,009	-0,031	-0,018	0,000	-0,038	0,014	-0,006

Legenda: Saz = períodos sazonais (seco, transição para chuva, chuvoso); Ht= altura total da árvore; Dhp = diâmetro em determinada Hp% (cm); Hp% = altura de prospecção (%); Hp = altura de prospecção (cm); VPOM = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); VmPOM = velocidade média de propagação da onda mecânica (m/s); Vmin = VPOM mínima (m/s); Vmax = VPOM máxima (m/s); PRM = porcentagem de perda de resistência mecânica (%); LSa% = porcentagem de área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (%); Asa = área com baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas (cm2); Vol = volume de oleorresina (mL).

Como as variáveis Hp% e Hp, LSa% e ASa apresentaram pesos em patamares muito próximos, respectivamente, 0,516 e 0,513; 0,404 e 0,438, poderia ter sido feita a opção por apenas uma de cada tipo de variável. Entretanto, como uma RNA é treinada em função da associação e da ponderação entre variáveis, considerou-se pertinente ensinar as redes sobre a variabilidade que os dados de determinada variável pode assumir, uma vez que, as Hp% assumem valores pré definidos (0, 25, 50, 75 e 100). Todavia, essas posições podem assumir qualquer valor discreto, dependendo da altura da árvore até a primeira bifurcação do fuste, explicação também adotada para o caso de LSa% e ASa.

De acordo com Hair *et al.* (2009) a ACP tem a função de condensar as diferentes variáveis originais em um conjunto menor de fatores, de modo a haver perda mínima de informação e demonstrando a inter-relação existente entre as mesmas, e que, embora diferentes, seus efeitos não podem ser significativamente interpretados separadamente. Com relação às variáveis empregadas no presente estudo, fica demonstrada essa inter-relação.

Na Tabela 5 são apresentadas as médias dos parâmetros de qualidade obtidas para os diferentes tipos de configuração de RNA testados para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp., na qual se observa que, na etapa de treinamento todos os tipos de RNA foram extremamente eficientes, alcançando *R* médias superiores a 0,90, enquanto na etapa de validação os três tipos de RNA (4N-5000, 16N-3000 e 30N-5000) apresentaram *R* satisfatória, cujas médias foram, respectivamente, 0,808, 0,803 e 0,766. Portanto foram as configurações selecionadas para a etapa 2 de treinamento e validação. Dentre esses, o tipo 16N-3000 apresentou o melhor equilíbrio entre os parâmetros, sendo seguido pelo tipo 4N-5000 e por conseguinte por 30N-5000. Embora a *R* média alcançada por esse último no treinamento (0,993) tenha superado as demais, na validação ela foi inferior a 0,80, enquanto 4N-5000 e 16N-3000 superaram esse patamar de precisão, porém, na prática não inviabilizaria a utilização das mesmas. A comparação, quanto os *bias* e as s^2, colocou 30N-5000 em vantagem sobre os demais tipos no treinamento, por apresentar uma s^2 média mais alta para um *bias* médio intermediário, mas na validação 16N-3000 apresentou o menor *bias* médio para uma s^2 média um pouco mais elevada. Os RQME médio do tipo 4N-5000 foram os mais elevados no treinamento e na validação (44,71; 80947,3) e no teste de aprendizado, as configurações 30N-5000 (39,95; 225,10) e 16N-3000 (42,83; 208,10) se mostraram as mais promissoras.

Tabela 5. Parâmetros de qualidade médios dos tipos de Redes Neurais Artificiais (RNA) ensinadas para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

Tipo de RNA	Aprendizagem	*R*	*bias*	SQR	RQME	s^2	CV%
2N-3000	T	0,90712	0,702	955543,686	67,843	11355,536	0,691
2N-3000	V	0,39361	16,331	990217,391	71,112	24760,154	1,020
2N-5000	T	0,97569	1,081	319543,484	44,127	3783,987	0,399
2N-5000	V	0,32518	12,762	1271798,817	67,730	32127,936	1,162
2N-10000	T	0,88157	0,540	1089903,289	71,432	12964,210	0,738
2N-10000	V	0,34692	16,150	934352,433	65,976	23352,250	0,990
4N-3000	T	0,97627	0,925	293133,250	42,738	3476,793	0,382
4N-3000	V	0,38330	4,977	433317,740	38,298	11109,961	0,683
4N-5000	T	**0,98129**	2,429	555053,431	44,708	6038,595	0,504
4N-5000	V	**0,80871**	42,771	3118841,368	247,303	80947,287	1,844
4N-10000	T	0,97849	0,793	250122,578	40,735	2967,259	0,353
4N-10000	V	0,39850	4,296	417901,151	35,248	10670,095	0,669
8N-3000	T	0,98903	3,035	614797,608	40,925	6165,622	0,509
8N-3000	V	0,40082	5,028	544264,981	36,793	12720,827	0,731
8N-5000	T	0,98968	1,824	306530,524	39,879	3520,241	0,385
8N-5000	V	0,41068	4,288	440172,604	36,035	11233,205	0,687
8N-10000	T	0,99173	2,173	343687,867	38,768	3655,928	0,392
8N-10000	V	0,42362	6,038	624337,271	40,995	15185,783	0,799
16N-3000	T	**0,98925**	4,156	910241,313	42,834	8824,030	0,609
16N-3000	V	**0,80309**	41,242	2184489,541	208,095	54138,847	1,508
16N-5000	T	0,99226	1,904	283368,843	38,232	3172,599	0,365
16N-5000	V	0,44571	2,917	345525,595	25,835	7877,670	0,575
16N-10000	T	0,99058	3,208	707595,569	41,033	6858,111	0,537
16N-10000	V	0,46547	4,325	536299,583	27,715	10403,605	0,661
20N-3000	T	0,99085	2,503	387291,764	39,782	4114,442	0,416
20N-3000	V	0,45597	2,359	270426,462	24,082	6272,048	0,513
20N-5000	T	0,98932	6,565	1667922,928	45,226	12815,314	0,734
20N-5000	V	0,46509	7,390	990443,737	26,422	10632,005	0,668
20N-10000	T	0,98891	3,629	719469,641	42,361	6822,384	0,535
20N-10000	V	0,44824	4,402	538058,643	26,926	10408,663	0,661
30N-3000	T	0,99249	1,592	156111,145	37,011	1841,507	0,278
30N-3000	V	0,46990	0,123	49422,818	16,100	1299,845	0,234
30N-5000	T	**0,99263**	3,569	892384,698	39,946	7365,421	0,556
30N-5000	V	**0,76590**	47,760	2629956,803	225,103	61151,011	1,603
30N-10000	T	0,98946	5,075	1094903,433	43,032	9186,964	0,621
30N-10000	V	0,48259	5,114	649097,499	22,223	9315,040	0,625

Legenda: RNA = rede neural artificial; T = treinamento; V = validação; *R* = coeficiente de correlação; *bias* = vies, limiar, junção aditiva ou elo sináptico; SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; s^2 = variância; RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro; CV% = coeficiente de variação.

Na Figuras 5 e 6 são apresentados os gráficos comparativos dos parâmetros de qualidade das RNA testadas na etapa de teste.

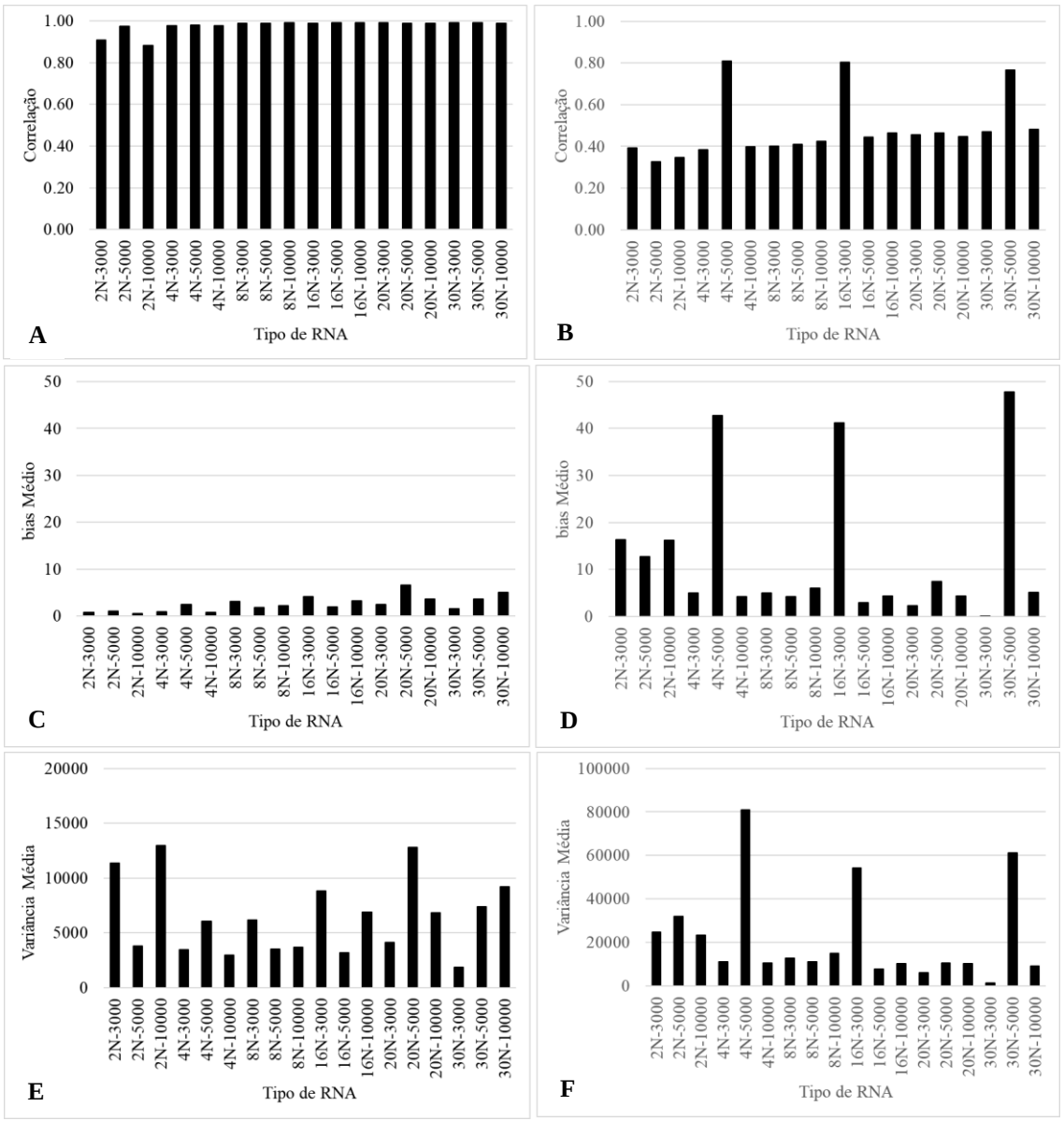


Figura 5. Representação gráfica de parâmetros estatísticos (de qualidade) médios dos tipos de configuração de RNA ensinadas para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil. Treinamento: A. *R* média; C. *bias* médio; E. s^2 média; Validação: B. Correlação *R* média; D. *bias* médio; F. s^2 média.

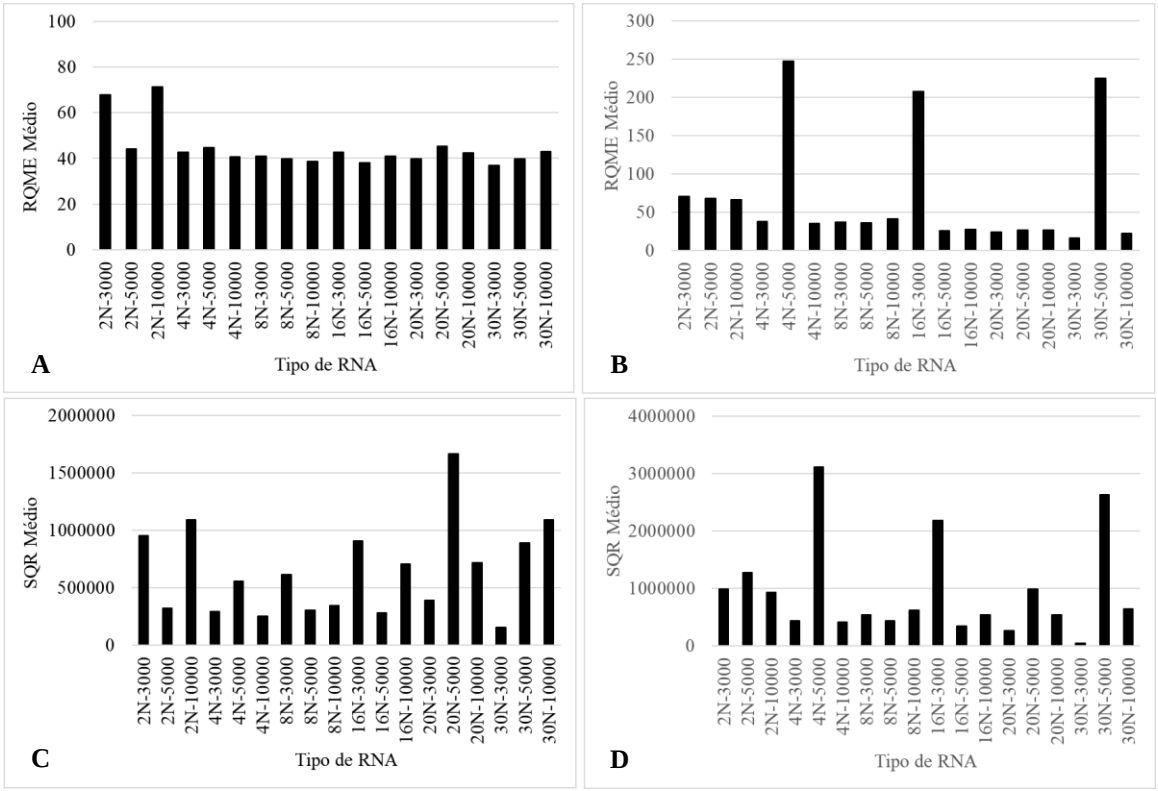


Figura 6. Representação gráfica dos parâmetros estatísticos (de qualidade) médios dos tipos de configuração de RNA ensinadas para a predição de oleorresina de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil. Treinamento: A. RQME médio; B. SQR médio; Validação: C. RQME médio; D. SQR médio.

Todas as médias dos parâmetros de qualidade das RNA foram mais elevadas na validação. Esse, no entanto, não é um resultado incomum, incluindo-se um erro mais elevado, em função dos dados nesta parte da avaliação não serem treinados. Além disso, é desejável que exista variância relativamente mais elevada, pois esse parâmetro de qualidade é observado em associação com o *bias*, que deve ser o menor possível, para gerar maior acurácia preditiva. Segundo Ludwig Jr. e Montgomery (2007, p. 14), "o *bias* possibilita que um neurônio apresente saída não nula ainda que todas as suas entradas sejam nulas", pois tem a função de "aumentar o grau de liberdade da função".

Destaca-se que, nenhuma RNA treinada com 10000 ciclos apresentou resultado satisfatório. Embora a determinação do número de ciclos seja relativa, é importante que seja garantido um número mínimo, pois o número de ciclos tem relação com a convergência dos parâmetros da rede (do algoritmo), e a partir do momento que ocorre não importa, necessariamente, o número de ciclos excedentes, pois a diferença que se obterá nas estimativas dos parâmetros será mínima, algo em torno de 10^{-12}, em termos de diferença de escala decimal. Para Silva, Spatti e Flauzino (2010), a convergência, ou seja, o critério de parada, está relacionada com um valor suficientemente pequeno de RQME conseguido entre duas épocas sucessivas de iteração, e a diferença entre o erro atual e o erro anterior indica a sua precisão.

Enfatiza-se que, a admissão dos dados das variáveis, que constituem a camada de entrada da RNA e serão treinados, pode interferir no número de ciclos, devido a aleatoriedade estocástica da atribuição dos pesos iniciais, uma vez que, a função degrau realiza a filtragem do dado resultante (estimado), classificando-o.

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os parâmetros de qualidade obtidos para as RNA testadas na etapa 2 (13x4x1 – 5000 ciclos; 13x16x1 – 3000 ciclos; 13x30x1 – 5000 ciclos). A partir desses resultados, foi possível selecionar, dentro de cada conjunto, as RNA que obtiveram os melhores resultados, inclusive considerando-se seus respectivos coeficientes de variação (CV%). Na Tabela 5 foram selecionadas as RNA 2 (13 x 4 x 1) e RNA 9 (13 x 4 x 1), na Tabela 6 a RNA 5 (13 x 16 x 1) e na Tabela 7 a RNA 5 (13 x 30 x 1).

Tabela 6. Critérios de qualidade de aprendizado de dez RNA com arquitetura 13x4x1(5000 ciclos), utilizadas para a estimativa da ocorrência de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

RNA	Aprendizagem	*R*	*bias*	SQR	RQME	s^2	CV%
1	T	0,997	0,237	53902,564	25,182	641,640	25,331
	V	0,880	5,894	64785,989	41,290	1715,291	41,416
2	T	0,994	-0,177	100735,669	34,426	1199,202	34,630
	V	1,000	-2,101	3133,107	9,080	80,145	8,952
3	T	0,995	0,815	99206,632	34,163	1180,359	34,356
	V	0,686	-1,301	3543,364	9,656	94,027	9,697
4	T	0,994	1,539	103454,992	34,887	1229,210	35.060
	V	0,925	-1,256	6137,744	12,709	164,266	12,817
5	T	0,990	3,949	150166,340	42,032	1771,913	42,094
	V	0,329	0,154	4747,264	11,177	128,280	11,326
6	T	0,994	1,862	98331,067	34,012	1167,100	34,163
	V	0,389	-2,161	4081,076	10,363	105,505	10,272
7	T	0,995	0,792	85934,969	31,796	1022,400	31,975
	V	0,114	-1,842	3270,568	9,277	84,908	9,215
8	T	0,994	1,483	103129,616	34,832	1225,507	35,007
	V	0,740	0,787	12880,746	18,411	347,492	18,641
9	T	0,995	-1,223	83950,843	31,427	997,903	31,590
	V	0,994	-1,994	3120,984	9,063	80,269	8,959
10	T	0,993	1,650	105352,708	35,206	1251,444	35,376
	V	0,093	-1,610	5490,198	12,020	145,722	12,072

Legenda: RNA = rede neural artificial; T = treinamento; V = validação; *R* = coeficiente de correlação; *bias* = viés, limiar, junção aditiva ou elo sináptico; SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; s^2 = variância; RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 7. Critérios de qualidade de aprendizado de dez RNA com arquitetura 13x16x1(3000 ciclos), utilizadas para a estimativa da ocorrência de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

RNA	Aprendizagem	*R*	*bias*	SQR	RQME	s^2	CV%
1	T	0,995	0,935	95697,952	33,554	1138,377	2,309
	V	0,995	-1,014	125910,458	38,488	1497,894	2,648
2	T	0,996	1,286	76831,496	30,065	912,988	2,067
	V	0,991	0,415	172799,509	45,088	2056,963	3,103
3	T	0,994	1,620	108661,548	35,754	1290,933	2,458
	V	0,994	2,215	107089,278	35,495	1269,910	2,438
4	T	0,985	5,732	239236,638	53,052	2814,807	3,630
	V	0,994	2,568	104124,740	35,000	1232,908	2,403
5	T	0,993	2,893	109215,151	35,845	1291,710	2,459
	V	0,995	1,810	93387,056	33,146	1108,437	2,278
6	T	0,768	23,724	553474,734	120,686	14380,760	0,071
	V	0,341	-0,281	5697,346	12,245	153,901	0,007
7	T	0,061	-1,546	5178,863	11,674	137,513	0,007
	V	-0,056	250,277	25107812,968	812,854	614258,025	0,462
8	T	0,996	3,831	33076,392	29,503	878,886	0,017
	V	0,769	0,791	9099,586	15,475	245,293	0,009
9	T	0,081	294,667	33286920,204	935,934	810471,312	0,531
	V	0,017	118,716	7806797,116	453,257	196520,092	0,262
10	T	0,844	37,243	1070837,594	167,869	27517,058	0,098
	V	0,040	34,208	1156965,324	174,489	30067,521	0,102

Legenda: RNA = rede neural artificial; T = treinamento; V = validação; *R* = coeficiente de correlação; *bias* = viés, limiar, junção aditiva ou elo sináptico; SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; s^2 = variância; RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 8. Critérios de qualidade de aprendizado de dez RNA com arquitetura 13x30x1(5000 ciclos), utilizadas para a estimativa da ocorrência de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

RNA	Aprendizagem	*R*	*bias*	SQR	RQME	s^2	CV%
1	T	0,9937	0,611	100792,5635	34,4354	1199,5343	2,692
	V	0,9944	1,346	94528,5591	33,3482	1123,5079	2,605
2	T	0,9967	-3,482	138289,0561	40,3352	1634,0314	3,142
	V	0,9939	0,884	106683,2568	35,4274	1269,2489	2,769
3	T	0,9954	-1,324	134638,2259	39,7992	1601,063	3,110
	V	0,9936	1,118	106025,2427	35,3179	1260,9407	2,760
4	T	0,9953	0,932	82188,3053	31,0954	977,5533	2,430
	V	0,9941	1,025	109277,1675	35,8555	1299,8554	2,802
5	T	0,9931	4,398	108107,5162	35,663	1267,4259	2,767
	V	0,9941	1,109	103733,375	34,9341	1233,6759	2,730
6	T	0,8893	-1,443	4052,6227	10,3271	107,3924	0,805
	V	0,5985	-0,429	6403,5172	12,9813	172,8792	1,022
7	T	0,8081	-2,573	3505,3303	9,6045	87,9398	0,729
	V	0,4924	-1,153	3883,8332	10,1097	103,6033	0,791
8	T	0,9584	-0,851	5118,0358	11,6054	137,5813	0,912
	V	0,1509	0,934	21741,7484	23,9197	586,7182	1,883
9	T	0,0429	0,128	6397,7275	12,9754	172,8946	1,022
	V	0,3181	0,099	7638,438	14,1779	206,4341	1,117
10	T	0,5597	-0,319	5392,2224	11,9122	145,6314	0,938
	V	0,5232	-0,065	6522,4129	13,1012	176,277	1,032

Legenda: RNA = rede neural artificial; T = treinamento; V = validação; *R* = coeficiente de correlação; *bias* = viés, limiar, junção aditiva ou elo sináptico; SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; s^2 = variância; RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro; CV% = coeficiente de variação.

Na Tabela 9 são apresentados os critérios de qualidade de aprendizado das RNA consideradas finalistas, além dos respectivos valores de CV%, que corroboraram a classificação das RNA. Os resultados obtidos para os parâmetros *Syx* e *Syx%* e os gráficos de dispersão (Figura 5) sinalizam a RNA 5 / 16N-3000 como a mais eficiente no treinamento e na validação.

Tabela 9. Critérios de qualidade de aprendizado das Redes Neurais Artificiais (RNA) finalistas (13x4x1 – 5000 ciclos; 13x16x1 – 3000 ciclos; 13x30x1 – 5000 ciclos), utilizadas para a estimatimação da ocorrência de oleorresina em árvores de *Copaifera* sp., nativas na Amazônia Ocidental, Brasil.

Classificação		1º		2º		3º		4º	
RNA		4N-5000				30N-5000		16N-3000	
		9		2		5		5	
Aprendizado		T	V	T	V	T	V	T	V
bias	10	-1,22	-1,99	-0,18	-2,10	-1,32	-0,85	1,62	3,83
RQME		31,43	9,06	34,43	9,08	39,80	11,61	35,75	29,50
s^2		997,90	80,27	1199,20	80,14	1601,06	137,58	1290,93	878,89
SQR		83950,84	3120,98	100735,67	3133,11	134638,226	5118,04	108661,55	33076,39
R		0,995	0,994	0,994	0,999	0,995	0,958	0,994	0,996
CV%		0,62	0,76	0,68	0,76	0,79	0,99	0,71	2,52
Syx		637,60	561,51	399,02	564,30	384,16	543,29	191,08	268,68
Syx (%)		1001,59	788,84	796,11	621,95	766,46	598,79	381,24	296,12
bias	1000	2,43	42,77	-	-	3,57	47,76	4,16	41,24
RQME		44,71	247,30	-	-	39,95	225,10	42,83	208,10
s^2		6038,60	80947,29	-	-	7365,42	61151,01	8824,03	54138,85
SQR		555053,43	3118841,37	-	-	892384,70	2629956,80	910241,31	2184489,54
R		0,981	0,809	-	-	0,993	0,766	0,989	0,803
CV%		0,35	0,14	-	-	0,39	0,13	0,42	0,12

Legenda: RNA = rede neural artificial; T = treinamento; V = validação; *R* = coeficiente de correlação; *bias* = vies, limiar, junção aditiva ou elo sináptico; SQR = Soma dos Quadrados dos Resíduos; s^2 = variância; RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro; *Syx* = Erro-padrão da estimativa; *Syx* (%) = Erro padrão da estimativa relativo; CV% = coeficiente de variação.

Outrossim, pode-se inferir como ilustrado na Figura 7 que, nas validações o maior volume de reservatório (3600 mL) foi o dado que gerou os maiores erros, devido à sua baixa ocorrência no conjunto de dados.

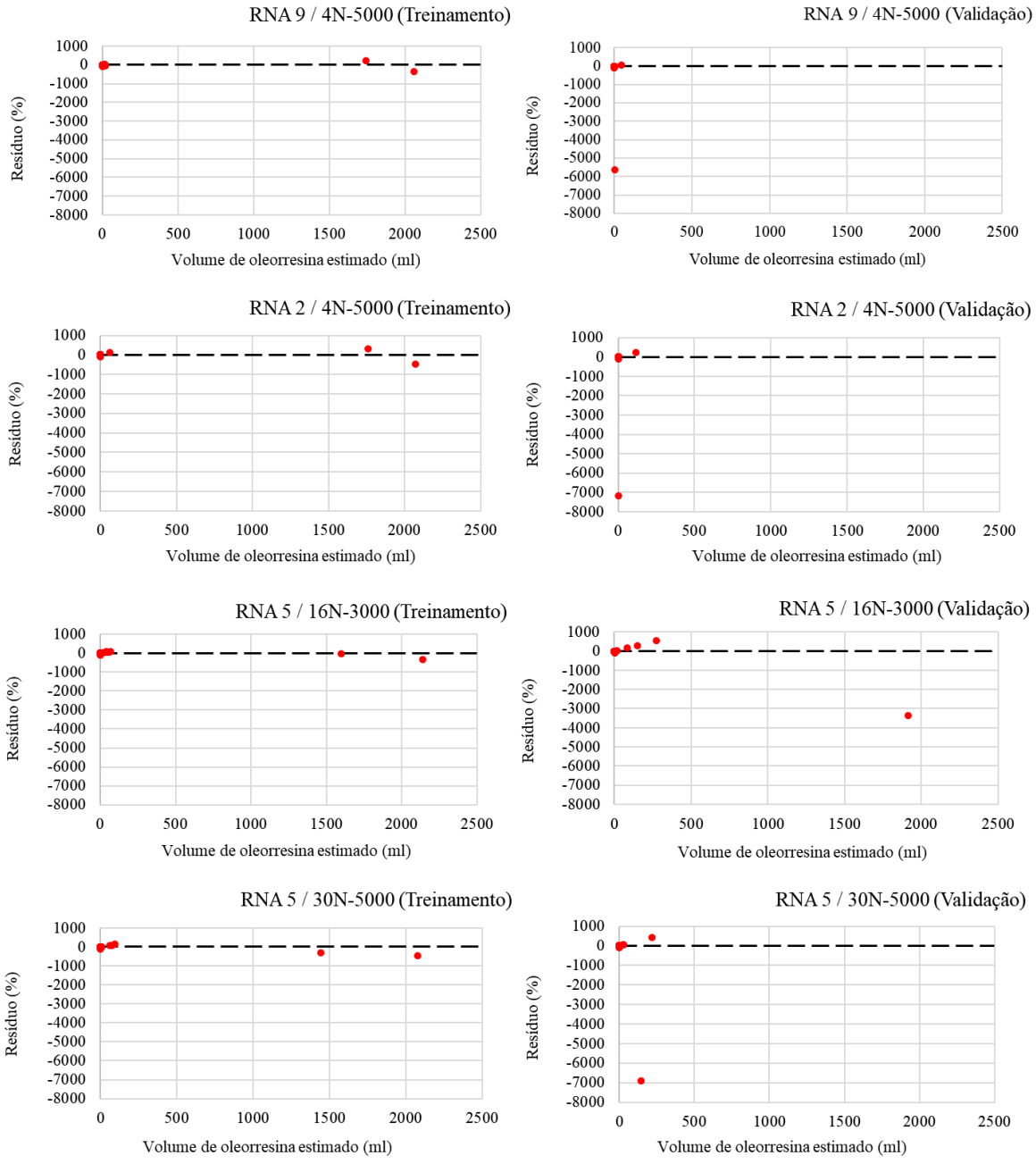


Figura 7. Dispersão dos erros percentuais das estimativas de conteúdo de oleorresina por Redes Neurais Artificiais (y), em função dos valores observados do volume de oleorresina (x); N treinamento = 82 tomogramas; N validação = 41 tomogramas.

De modo geral, as distribuições dos erros se mostraram bastante concentrados próximos ao ponto zero dos eixos, devido a proporção entre as seções prospectadas, pois, no treinamento as seções sem oleorresina representaram 78% das ocorrências, e na validação

75.6%, isso tende a se modificar à media em que novas árvores sejam prospectadas, aumentanto o registro de volume de oleorresina.

Valente e Valente (2021) testaram RNA para realizar a regressão entre o volume de madeira calculado pela equação de Takata e DAP, identificando que 10 neurônios na camada oculta, apresentou uma correlação de 0,99, e indicaram seu uso como uma alternativa às equações hipsométricas tradicionais, inserido as tomadas de decisão do manejo florestal na indústria 4.0.

O ajuste das curvas representa o resultado da aprendizagem da RNA, e considera-se que esta é capaz de generalizar bem quando os valores estimados forem coerentes com os valores reais, significando que esta realiza uma boa interpolação não-linear (HAYKIN, 2001). Esse ajuste é importante porque o número de neurônios na camada oculta interfere na capacidade de memorização dos dados de treinamento, que poderá ser excessiva, sendo importante optar por uma distribuição suave, mas não linear, entre os dados de entrada e saída (HAYKIN, 2001).

A ocorrência de oleorresina das árvores deste estudo está de acordo com o os resultados obtidos por Roquette *et al.* (2018), cujo rendimento médio foi de 0,124 ± 0,079 L árvore^{-1} 24h^{-1}, com valor máximo de 2,352 L árvore^{-1} 24h^{-1}, sendo que, apresentaram alta produção árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) entre 0,54 m e 0,66 m. Além disso, em cada hectare foram encontradas menos de três árvores. Essas informações são importantes porque demonstram uma condição inerente das árvores de *Copaifera*, que é também um dificultador para a construção de um grande banco de dados. No entanto, é importante que os inventários deste gênero prossigam.

Por outro lado, os novos conhecimentos relacionados à prospecção de oleorresina atendem, não apenas as árvores nativas, mas contribuem para o desenvolvimento de sistemas produtivos plantados, que poderão ser frequentemente monitorados com a utilização de novas tecnologias.

4 CONCLUSÕES

As variáveis testadas neste estudo são, à princípio, suficientes para estimar, através de RNA, o volume de oleorresina esperado para determinada seção do tronco de árvores de *Copaifera* sp., devido à existência de correlação não linear verificada entre as mesmas. Outras variáveis como a biomassa foliar, a densidade da madeira e outras devem ser testadas futuramente, a fim de se aperfeiçoar esse método de predição.

Diferentes configurações de RNA, que utilizaram as variáveis constituintes da camada de entrada, são capazes de estimar com boa precisão volumes de oleorresina que variaram de 0 mL a 3600 mL. No entanto, é importante a ampliação do número de árvores prospectadas, pois assim será possível realizar predições para um intervalo maior de volume de oleorresina.

O número de iterações necessárias para garantir um baixo erro de estimativa, considerando as alternativas avaliadas, são 3000 ou 5000 ciclos, pois 10000 ciclos não significaram acréscimo de precisão.

Destacou-se a RNA 5, com configuração 13x16x1/3000 ciclos de iteração, como a mais indicada para a predição do volume de oleorresina de *Copaifera* sp.. Essa RNA deve ser executada mediante a realização de tomografia de impulso (TI) e mensurações dendrométricas, para a obtenção das variáveis de entrada.

O treinamento de uma RNA específica aproxima o manejo de oleorresina de *Copaifera* sp. a outras tecnologias interessantes para seu planejamento e gestão, como aplicativos para melhorar a interface RNA-usuário, de modo a otimizar a etapa de inventário e, principalmente, a análise do custo-benefício associado à uma área de manejo. A utilização dessa ferramenta de IA oferece uma alternativa de alta precisão e adaptável ao *deploy* para sistemas de monitoramento.

Sendo possível, futuramente realizar a integração, da melhor RNA para predição de oleorresina de *Copaifera* sp., a um sistema abastecido com dados obtidos diretamente na floresta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIODUN, O. I.; JANTAN, A.; OMOLARA, A. E.; DADA, K. V.; MOHAMED, N. A.; ARSHAD, H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. **Heliyon**, v. 4, n. 11, 2018. DOI 10.1016/j.heliyon. 2018.e00938.

ANGELO, H.; CALDERON, R. A.; ALMEIDA, A. N.; PAULA, M. F.; MEIRA, M.; MIGUEL, E. P.; VASCONCELOS, P. G. A. Analysis of the non-timber forest products market in the Brazilian Amazon. **Australiam Journal of Crop Science**, v. 12, n. 10, p.1640-1644, 2018. DOI 10.21475/ajcs.18.12.10.pne1341.

ARAÚJO, L. O.; ANTENOR, M. C.; ANDRADE, J. S.; FERNANDES, R. F.; GALDINO, S. M; BARROS FILHO, M. M. L. Mapeamento tecnológico da copaíba: Análise prospectiva no Brasil e no mundo. **Cad. Prospec**, v.11, n. 1, p.146-157, 2018. DOI 10.9771/cp.v11i1.23225.

ASCENSÃO, L. Estruturas secretoras em plantas. Uma abordagem morfo-anatómica. *In*.: Figueiredo, A. C.; Barroso, J. G.; Pedro, L. G. **Potencialidades e Aplicações das Plantas Aromáticas e Medicinais**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 3. ed., 2007. Disponível em: http://cbv.fc.ul.pt/PAM/PAM3_PAM1_Indice_Pagina_CBV.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

BINOTI, M. L. M. S. **Emprego de Redes Neurais Artificiais em mensuração e manejo florestal**. 2012. 130f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BINOTI, D.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. Configuração de Redes Neurais Artificiais para estimação do volume de árvores. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, v. 5, n. 1, p.58-67, 2014. DOI 10.12953/2177-6830.v05n01a06.

BONETE, I. P.; LANSSANOVA, L. R. Redes Neurais Artificiais na estimação de diâmetros de *Tectona grandis* L.f. *In:* SENHORAS, E., M. (Org.***)*** **A produção do conhecimento interdisciplinar nas ciências ambientais,** 3. Ponta Grossa, Paraná: Atena, 2020. DOI 10.22533/at.ed.089200203.

CARLQUIST, S. How wood evolves: a new synthesis. **Botany**, n.90, p. 901–940, 2012. DOI 10.1139/B2012-048.

CHEN, F.; AL-AHMAD, H.; JOYCE, B.; ZHAO, N.; KÖLLNER, T. G.; DEGENHARDT, J.; STEWART JR., C. N. Within-plant distribution and emission of

sesquiterpenes from *Copaifera officinalis*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, p. 1017-1023, 2009. DOI 10.1016/j.plaphy.2009.07.005.

LUDWIG JR. O.; MONTGOMERY, E. M. **Redes Neurais: Fundamentos e Aplicações com programas em C**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2007.

CASCON, V.; GILBERT, B. Characterization of the chemical composition of oleoresins of *Copaifera guianensis* Desf., *Copaifera duckei* Dwyer and *Copaifera multijuga* Hayne. **Phytochemistry**, v. 55, n. 7, p. 773–778, 2000. DOI 10.1016/s0031-9422(00)00284-3.

CISTERNAS, I.; VELÁSQUEZ, I.; CARO, A.; RODRÍGUEZ, A. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, 2020. DOI 10.1016/j.compag.2020.105626.

DAP Florestal. **Neuro – Sistema para Geração e Aplicação de Redes Neurais Artificiais: Neuro DAP 4.0**., 2021.

DE AZEVEDO, G. B.; TOMIAZZI, H. V.; AZEVEDO, G. T. O. S.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E.; SOUZA, M. T. P.; BATISTA, T. S.; EUFRADE-JUNIOR, H. J.; GUERRA, S. P. S. Multi-volume modeling of *Eucalyptus* trees using regression and artificial neural networks. **PloS ONE**, v. 15, n. 9, 2020. DOI 10.1371/journal.pone.0238703.

DIAMANTOPOULOU, M. J. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 2, n. 4, p. 190–197, 2012. DOI 10.1016/j.suscom.2012.10.002.

DUARTE, A. F. Climatologia das chuvas e efeitos antrópicos da urbanização na Bacia do Rio Acre, Amazônia Ocidental. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 11 n. 1, p. 199-213, 2017. DOI 10.19180/2177-4560.v11n12017p199-213.

DUARTE, A. F.; MASCARENHAS, M. D. M. Manifestações do bioclima do Acre sobre a saúde humana no contexto socioeconômico da Amazônia. *In:* **Amazônia Ciência e Desenvolvimento**, v. 3, n. 5, p. 149-162, Belém, 2007. Disponível em: https://www.bancoamazonia.com.br/index.php/component/edocman/revista-amazonia-ciencia-e-desenvolvimento-edicao-05/viewdocument/1864?Itemid=. Acesso em: 27 set. 2021.

ESRI, 2018. ArcGIS Desktop. Redlands, CA.

FERNANDES, M. M.; SOUSA, F. L.; SILVA, J. P. M.; ARAÚJO, E. F.; FERNANDES, M. R. M.; NÓBREGA, R. S. A. Redes Neurais Artificiais na estimação de variáveis

biométricas de mudas de espécies florestais produzidas em diferentes substratos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, 2019. DOI 10.5965/223811711812019047.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. 3. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2018. 624 p.

FIGUEIREDO, C. J. J.; SILVA, M. H. L.; MOREIRA, F. C. Aplicação de Redes Neurais Artificiais em processo de destilação de óleo essencial. **ENGEVISTA**, v. 15, n. 1. p. 36-42, 2013. DOI 10.22409/engevista.v15i1.402.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E.; HELMANN, A. C.; ANDRADE, M. A. M. Redes Neurais Artificiais: princípios básicos. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 13, p. 47-57, 2016. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/viewF ile/4330/Leandro. Acesso em: 19 set. 2021.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics. Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, n. 4, n. 1, 2001.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. Tradução: Sant'Anna, A. S. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Tradução: Paulo M. Rangel. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HECK, M. C.; VIANA, L. A.; VICENTINI, V. E. P. Importância do óleo de *Copaifera* sp. (Copaíba). ***SaBios: Revista de Saúde e Biologia***, v. 7, n. 1, p. 82-90, 2012. Disponível em: https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/vi ew/992. Acesso em: 18 set. 2021.

HEIDARI, E.; HOSSAM, F.; ALJARAH, I.; MIRJALILI, S. An efficient hybrid multilayer perceptron neural network with grasshopper optimization. **Soft Comput**, *v.* 23, p. 7941–7958, 2019. DOI 10.1007/s00500-018-3424-2.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **BdiA – Banco de dados de informações ambientais: Vegetação,** versão 2.3.1. Brasil, 2020. Disponível em: https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao. Acesso em: 21. 2021.

LOPES, L. S. S.; RODE, R.; PAULETTO, D.; BALONEQUE, D. D. Uso de regressão e Redes Neurais Artificiais na estimativa do volume de *Khaya ivorensis*. **Ciência da Madeira**. v. 11, n. 2, 2020. DOI 10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p74-84.

MARQUES, A. C. C. Bioprospecção como meio de desenvolvimento sustentável no Brasil. *In*: **Revista Jus Navigandi**. 13 ago. 2020. Disponível em: https://jus.com.br/artigos/84644/bioprospeccao-como-meio-de-desenvolvimento-sustentavel-no-brasil. Acesso em: 28 set. 2021.

MARTINS, K.; RIGAMONTE-AZEVEDO, C., SILVA, M. G. C.; WADT, L. H. O. Copaíba: aspectos ecológicos e potencial de uso do oleorresina. *In*: SIVIERO, A.; MING, L. C.; SILVEIRA, M.; DALY, D.; WALLACE, R. **Etnobotânica e Botânica Econômica do Acre**. Rio Branco: Edufac, 2016, 428 p. Il. ISBN 978-85-8236-027-9.

MEDEIROS, R. S.; VIEIRA, G.; DE ALMEIDA, D. R. A.; TOMAZELLO FO, M. New information for managing *Copaifera multijuga* Hayne for oleoresin yield. **Forest Ecology and Management**, v. 414, p. 85–98, 2018. DOI 10.1016/j.foreco.2018.02.009.

MIGUEL, E. P.; MELO, R. R.; SERENINI JUNIOR, L.; MENEZZI, C. H. S. del. Using artificial neural networks in estimating wood resistance. **Maderas, Cienc. tecnol**. [on line], v. 20, n. 4, p. 531-543, 2018. DOI 10.4067/S0718-221X2018005004101.

NEWTON, P.; WATKINSON, A. R.; PERES, C. A. Determinants of yield in a non-timber forest product: *Copaifera* oleoresin in Amazonian extractive reserves. **Forest Ecology and Management**. v. 261, n. 2, p. 255- 64, 2011. DOI 10.1016/j.foreco.2010.10.014.

PACHECO, T. A. R. C.; BARATA, L. E. S.; DUARTE, M. C. T. Antimicrobial activity of copaíba (*Copaifera* spp.) balsams. ***Revista Brasileira de Plantas Medicinais***, n. 8, p. 123-124, 2006. Disponível em: https://www1.ibb.unesp.br /Home/Departamentos/Botanica/RBPMRevistaBrasileiradePlantasMedicinais/8esp_123_124.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA, M. A. A. Óleo de copaíba (*Copaifera* sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais. **Rev. bras. plantas med.**, v. 11, n. 4, 2009. DOI 10.1590/S1516-05722009000400016.

PINHEIRO, Á. F. **Inteligência Artificial Fundamentos e Aplicabilidades**. Governo do Estado de Pernambuco, Secretaria de Administração, Centro de Formação dos Servidores e Empregados Públicos do Poder Executivo Estadual. Recife, Cefospe, 2020. 62p. Disponível em: http://www.cefospe.pe.gov.br/c/document_library/get_file?p_l_id=30580954&folderId=61591351&name=DLFE-461509.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

RAUBER, T. W. **Redes Neurais Artificiais**. Departamento de Informática, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228686464_Redes_neurais_artificiais/download. Acesso em: 19 set. 2021.

REIS, L. P.; DE SOUZA, A. L.; DOS REIS, P. C. M.; MAZZEI, L.; SOARES, C. P. B.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; RUSCHEL, A. R.; RÊGO, L. J. S.; LEITE, H. G. Estimativa da mortalidade e sobrevivência de árvores individuais após a colheita de madeira usando Redes Neurais Artificiais na floresta amazônica. **Engenharia Ecológica**, v. 112, p. 140-147, 2018, DOI 10.1016/j.ecoleng.2017.12.014.

RIGAMONTE-AZEVEDO, O. C.; WADT, S. P. G.; WADT, L. H. O. Potencial de produção de óleo-resina de copaíba (*Copaifera* sp.) de populações naturais do sudoeste da Amazônia. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 583-591, 2006. DOI 10.1590/S0100-67622006000400011.

ROQUETTE, J. G.; DRESCHER, R.; BRONDANI, G. E.; SOUZA, E. C.; RONDON NETO, R. M. R.; EBERT, A.; TEIXEIRA, L. B.; DIAS, A. P.; GAVA, F. H. Age and growth affect oleoresin yield from copaíba trees in the Cerrado–Amazônia ecotone. **CERNE**, v. 24, n. 2, p. 106-113, 2018. DOI 10.1590/01047760201824022527.

SACCARO JUNIOR, N. L. (2011). **Desafios da bioprospecção no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Texto para discussão, n.1569. 38p., 2011. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1569.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

SANTOS, E. S. dos. **Projeto e construção de um controlador adaptativo por realimentação de estados de um pêndulo invertido utilizando inteligência computacional**. 2013. 93f. Dissertação. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional) – Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em: https://mpoic.ucam-campos.br/wp-content/uploads/2013/11/Edson-Sim%C3%B5es-dos-Santos.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

SEMA – Secretaria de Meio Ambiente do estado do Acre. Aspectos socioeconômicos: População e as condições de vida, infraestrutura e a economia do Acre. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre**. Livro temático, v. 5, 2011. Disponível em: https://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Livro_Tematico_ZEE_Aspectos_socioeconomicos_Volume_5.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

SEMA – Secretaria de Meio Ambiente do estado do Acre. Recursos naturais: biodiversidade e ambientes do Acre. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre**. Livro temático, v. 3, 2010a. Disponível em: https://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acre/Fase%202/Livro_Tematico_ZEE_Aspectos_socioeconomicos_Volume_5.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

SEMA – Secretaria de Meio Ambiente do estado do Acre. Recursos naturais: biodiversidade e ambientes do Acre. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-**

Econômico do Estado do Acre. Livro temático, 2. ed., 2010b. Disponível em: http://www.amazonia.cnptia.embrapa.br/publicacoes_estados/Acr e/Fase%202/Documento_Sintese.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

SHANLEY, P.; MEDINA, G. Frutíferas e plantas úteis na vida Amazônia. *In:* CYMERYS, M. *et al*. **Copaíba: *Copaifera* L. f.,** p.183-187. Belém: CIFOR, Imazon, 2005.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas: Fundamentos teóricos e aspectos práticos**. 2. ed. São Paulo, Brasil: Artliber, 2010.

LPWG – The Legume Phylogeny Working Group. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. **TAXON**, v. 66, n. 1, p. 44-77, 2017. DOI 10.12705/661.3.

VALENTE, E. de O.; VALENTE, G. de F. S. Simulação de Redes Neurais Artificiais para estimativa de volume de madeira florestal a partir do DAP. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 4, n. 3, p. 3748-3757, 2021. DOI 10.34188/bjaerv4n3-080.

VEIGA JUNIOR, V., F.; PINTO, A., C. O gênero *Copaifera* L. **Quím. Nova**, v. 25, n. 2, p. 273-286, 2002. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/qn/v25n2/10455.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; CHAVES, A. G. S.; MEDEIROS, R. A.; SILVA, R. S.; SOUZA, H. S.; DRESCHER, R.; LEITE, H. G. Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* L.f. utilizando regressão e Redes Neurais Artificiais. **Nativa**, v. 5, n. 1, p. 52-58, 2017. DOI 10.31413/nativa.v5i1.3738.

VIEIRA, G. C., MENDONÇA, A. R., SILVA, G. F. S.; ZANETTI, S. S.; SILVA, M. M.; SANTOS, A. R. Prognoses of diameter and height of trees of eucalyptus using artificial intelligence. **Science of The Total Environment,** 619, 1473-1481, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.138.

WEISS, G.; LUDVIG, A.; ŽIVOJINOVIĆ, I. Four decades of innovation research in forestry and the forest-based industries – A systematic literature review. **Forest Policy and Economics**, n. 20, 2020. DOI 10.1016/j.forpol.2020.102288.

WEHLE, H-D. Machine Learning, Deep Learning, and AI: What's the Difference? Conference: Data Scientist Innovation Day. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318900216_Machine_Learning_Deep_Learning_and_AI_What's_the_Difference. Acesso em: 25 set. 2021.

CONCLUSÃO GERAL

Há um vasto campo para pesquisas sobre prospecção de reservatórios de oleorresina de *Copaifera* L., um gênero botânico riquíssimo, para o qual diversas pesquisas foram realizadas, dedicando-se ao seu cobiçado produto, mas o foco geralmente esteve direcionado para questões farmacológicas, químicas e ecológicas. Quanto ao manejo, as pesquisas têm como objetivo determinar o volume passível de ser extraído de cada árvore ou área de manejo, porém sempre considerando a prévia perfuração dos troncos, ainda que não produtivos, sendo, portanto, métodos invasivos.

O manejo da copaíba ocorre principalmente em florestas nativas, desse modo, reduzir o impacto sobre as populações manejadas é um objetivo fundamental, inclusive porque as copaibeiras são extremamente importantes para a fauna. Além disso, perfurar uma árvore para a extração do oleorresina é uma atividade demorada, que causa uma lesão profunda no tronco, expondo o organismo ao ataque de diversos agentes patogênicos que podem, inclusive, causar a sua morte. Viabilizar a perfuração de árvores que possam conter reservatórios e preservar aquelas que não os contenham, pode contribuir inclusive para a redução do custo do manejo, em função do tempo investido na perfuração desnecessária.

Existem diversas tecnologias e métodos, aplicáveis em testes laboratoriais e à campo, para indicar a incidência, a localização e o volume do produto armazenado. Contudo, esta é uma investigação que deve ser realizada em etapas e envolvendo testes com cada uma das tecnologias, e/ou combinando-as, podendo ser citadas: tomografia de impulso, ultrassom, espectroscopia no infravermelho próximo, densitometria de raios-X, ressonância magnética nuclear, radar de penetração no solo, dendrocronologia, bem como as Redes Neurais Artificiais, entre outras.

A demanda por tecnologias, que viabilizem o uso mais sustentável deste recurso renovável, justifica o desenvolvimento de práticas mais apropriadas para serem aplicadas, não apenas no manejo realizado na floresta nativa, mas em possíveis futuros povoamentos silviculturais de produção.

Os resultados obtidos na presente pesquisa confirmam que, a tomografia de impulso pode indicar com segurança árvores ocas e a exclusão de árvores que não possuem, necessariamente, reservatórios de oleorresina, e pode ser empregada para a prospecção, especialmente se associada às Redes Neurais Artificiais (RNA).

Os reservatórios com conteúdo significativo de oleorresina se encontram na altura do DAP (0%), e há indicativos de início de formação de acúmulo à 25% da altura do fuste. Árvores com cavidades no estágio inicial podem conter oleorresina acumulado, pois foram identificadas árvores com fissuras de pequena dimensão, reveladas por núcleos de incremento. Essas “cavidades” precursoras não são consideradas reservatórios significativos, mas demonstram existir um processo de acumulação de oleorresina que poderá, em tese, se tornar suficiente para uma extração futura.

A velocidade média de propagação de ondas mecânicas (VmPOM ou aMPS) e a área de seção do fuste afetada por velocidades baixas (LSa% e ASa) são indicadores importantes

para determinar a localização dos reservatórios de oleorresina, mas essa informação deve ser utilizada em conjunto com outros critérios relacionados ao estado geral das árvores.

Embora a TI tenha gerado falsos negativos, quando aplicada, principalmente, nas partes superiores dos troncos, onde não foram identificados reservatórios, podem ser realizados outros estudos à respeito do lenho das árvores de *Copaifera*, visando o aprimoramento do método.

Em um cenário em que a presença de reservatórios no fuste não é a regra, mas sim a exceção, o que foi demonstrado nesta pesquisa, a TI permite que sejam descartadas imediatamente árvores cujos tomogramas não apresentem as cores características consideradas indicadoras (laranja, vermelho e rosa), desde que sejam aplicadas as configurações adotadas neste estudo. Além disso, todos os reservatórios identificados se encontravam na região indicada no tomograma, ou seja, a TI permitiu que a perfuração fosse realizada em posição viável para a extração.

Quanto às limitações inerentes à prospecção de reservatórios de oleorresina, ressalta-se que esta pesquisa não pretendeu esgotar todos os aspectos relacionados ao tema, mas, sim, verificar qual o potencial da TI, quando aplicada diretamente no tronco das árvores e discutir, com base na literatura, quais aspectos deverão ser aprofundados em pesquisas futuras. Acredita-se que a tomografia de impulso 3D poderá ajudar a melhorar a compreensão sobre a extensão e conecção entre fissuras e reservatórios.

Conforme apresentado, os diferentes períodos sazonais que caracterizam o estado do Acre (seco e transição para chuva) interferiram nas velocidades de propagação das ondas mecânicas (VPOM) e nas VmPOM, independentemente, da altura de prospecção. Desse modo, demonstrou-se que a TI é sensível às mudanças relacionadas com o conteúdo de água no tronco das árvores e no ambiente. Porém, não há evidências de que a alteração das VPOM, ocasionada pela sazonalidade, resulte em mascaramento importante do resultado da TI, pois características marcantes da ocorrência de VPOM baixas (ocos, oleorresina, fissuras, diferenças de densidade da madeira e outras) não são alteradas em função da variação ocasional do conteúdo de água no xilema.

Além dos tomogramas, a TI forneceu variáveis, à princípio, suficientes para a predição, através de RNA, do volume de oleorresina esperado para determinada seção do tronco das árvores de *Copaifera* sp., devido a uma possível correlação não linear existente entre elas. Futuramente, variáveis como biomassa da copa, densidade da madeira, entre outras, poderão ser inseridas nos treinamentos das redes, a fim de se aperfeiçoar a RNA proposta neste estudo.

Foi confirmada a aplicabilidade de diferentes configurações de RNA para estimar com precisão volumes de oleorresina que variaram de 0 a 3600 mL. No entanto, é importante a ampliação do número de árvores prospectadas, para que seja possível realizar predições para uma maior amplitude de volume. Além disso, descartou-se a necessidade de realização de um número muito elevado de iterações para garantir um baixo erro de estimativa, considerando-se as alternativas avaliadas, pois que, 16 neurônios e 3000 ciclos são suficientes.

A RNA 5, com configuração 13x16x1/3000 ciclos é indicada para a predição do volume de oleorresina de *Copaifera* sp.. Essa RNA deve ser executada mediante a realização de TI e mensurações dendrométricas, para a obtenção das variáveis definidas como entrada.

O treinamento de uma RNA específica aproxima o manejo de oleorresina de *Copaifera* sp. a outras tecnologias interessantes para seu planejamento e gestão, como aplicativos de melhor interface RNA-usuário (*deploy*), de modo a otimizar a etapa de inventário e, principalmente, a análise do custo-benefício associado à uma área de manejo. Sendo possível, futuramente realizar sua integração a um sistema abastecido com dados obtidos diretamente na floresta, fornecendo um resultado imediato.

Assim, a prospecção de oleorresina de *Copaifera* se apresenta como uma promissora linha de pesquisa que demanda e oportuniza a realização de inúmeras pesquisas complementares, a serem desenvolvidas ao longo do tempo.

ANEXOS

Anexo I: Representação esquemática do método de prospecção de oleorresina em *Copaifera* sp. árvores usando tomografia de impulso.

Anexo II: Tomogramas e os respectivos tratamentos para a classificação LSa% das seções transversais obtidas na altura do DAP de árvores de *Copaifera* sp.

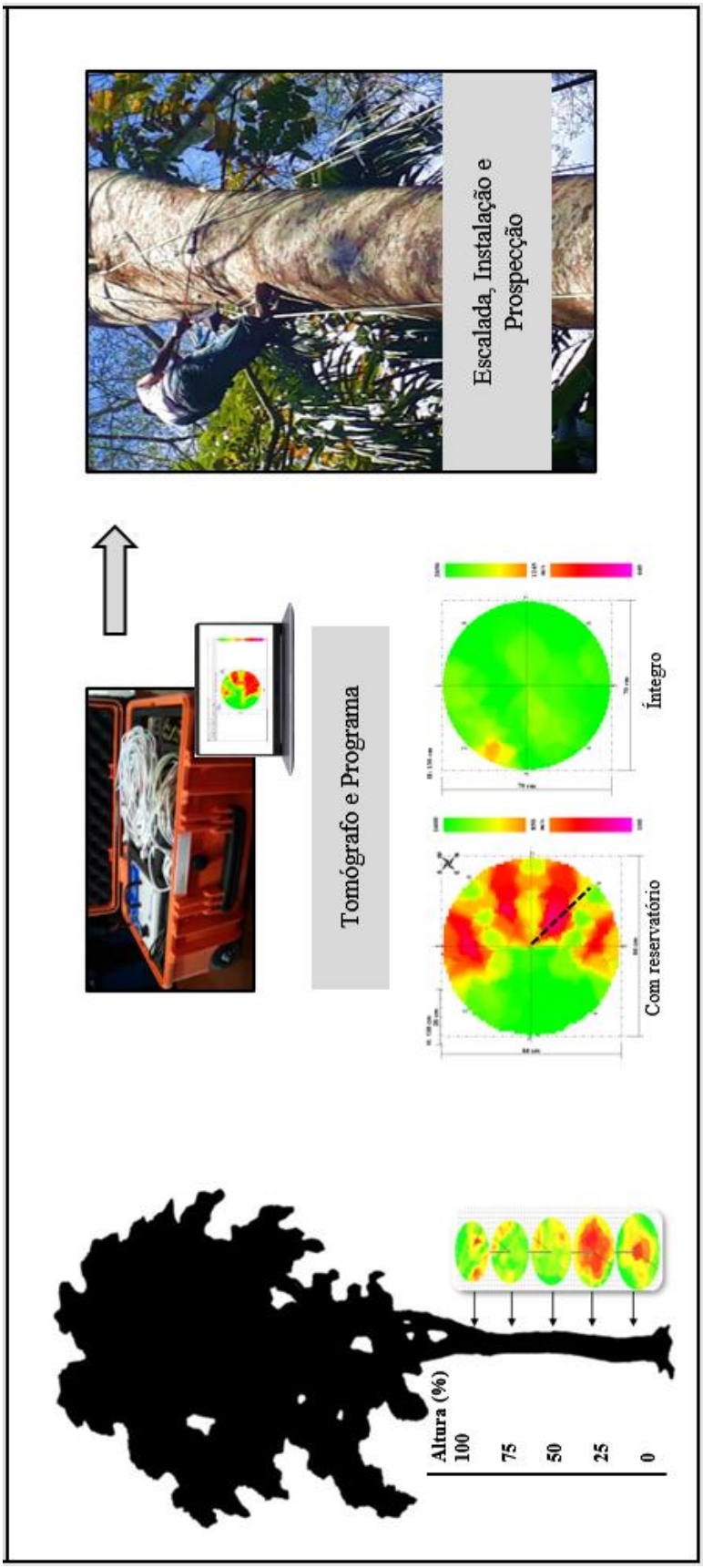
Anexo III: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 25% e percentual de perda de resistência mecânica.

Anexo IV: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 50% e percentual de perda de resistência mecânica.

Anexo V: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 75% e percentual de perda de resistência mecânica.

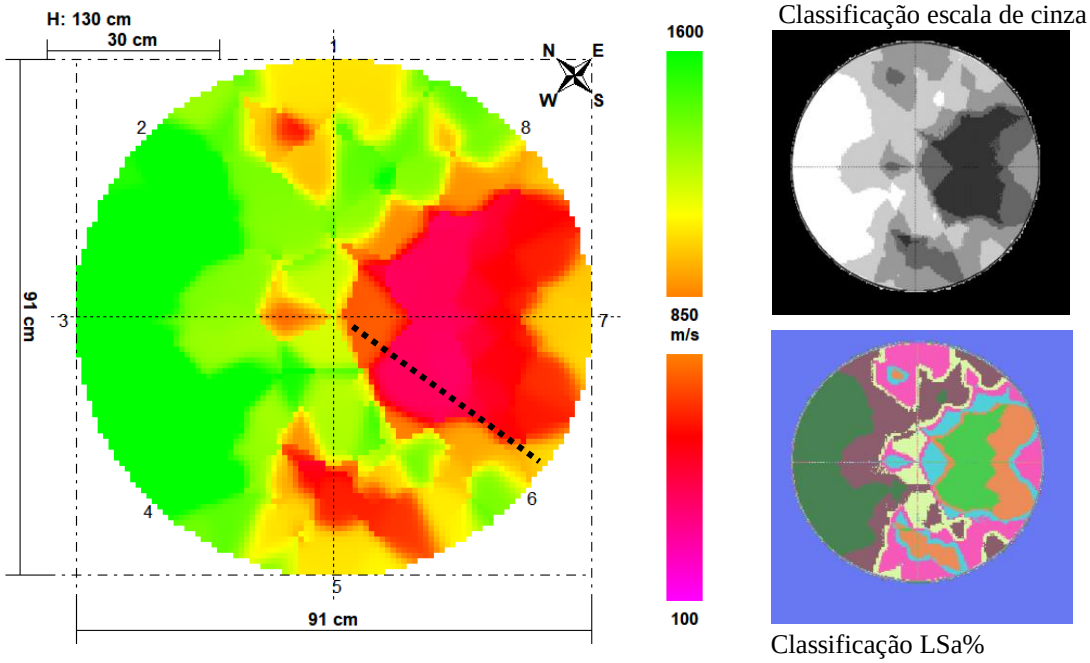
Anexo VI: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 100% e percentual de perda de resistência mecânica.

Anexo I: Representação esquemática do método de prospecção de oleorresina em *Copaifera* sp. árvores usando tomografia de impulso.

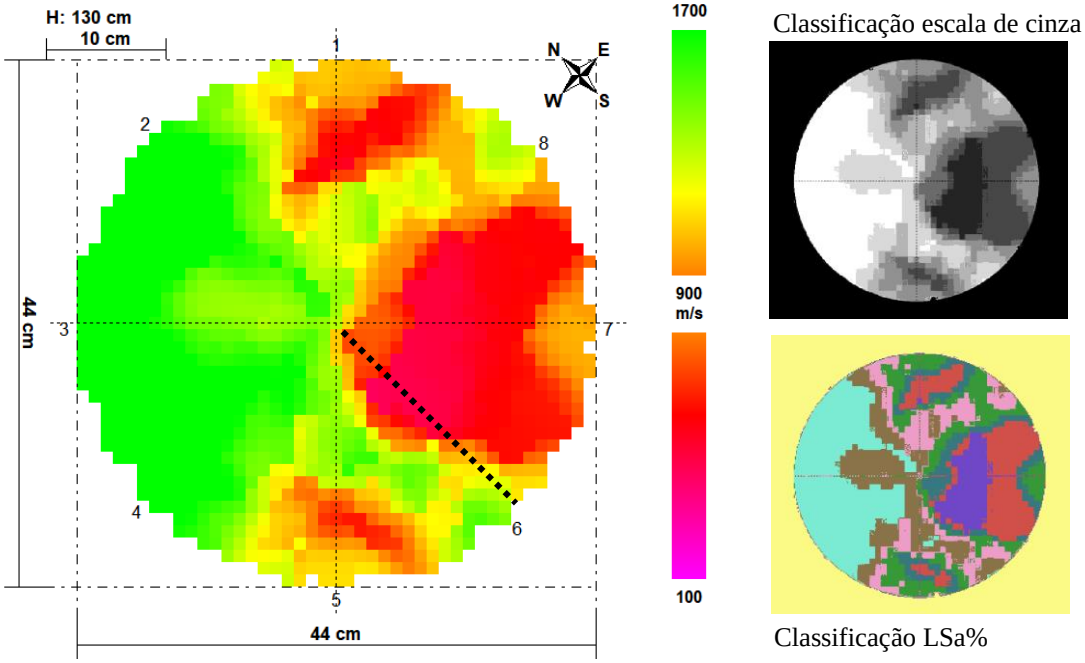


Anexo II: Tomogramas e os respectivos tratamentos para a classificação LSa% das seções transversais obtidas na altura do DAP (0 % do fuste; 1,30 m do solo) de árvores de *Copaifera* sp..

Árvore 01 – Tomograma original

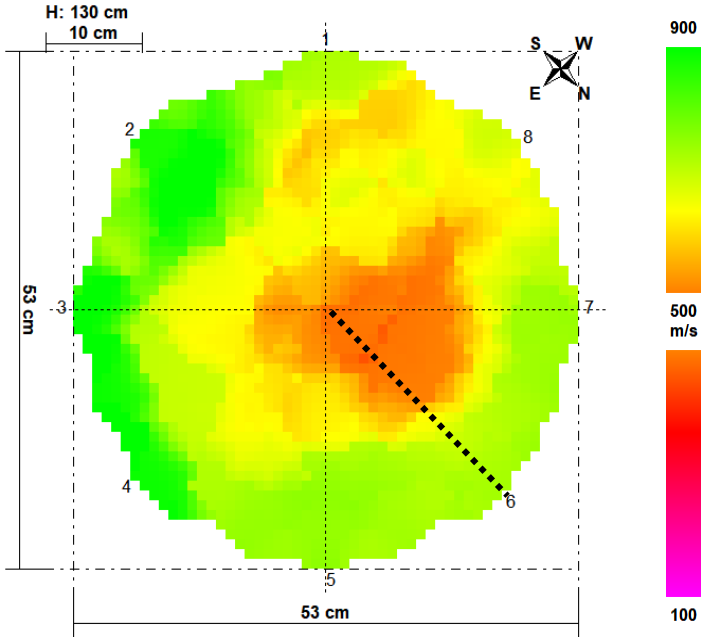


Árvore 02 – Tomograma original

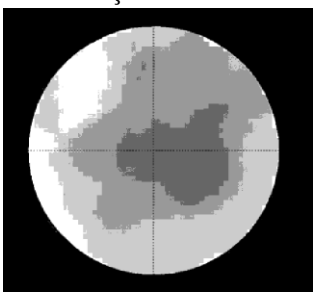


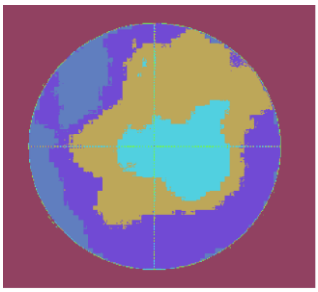
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 03 – Tomograma original



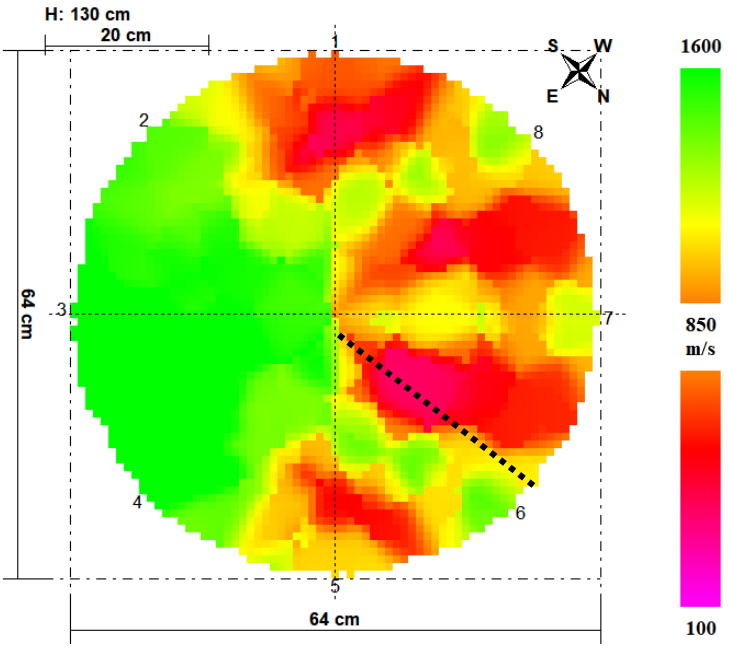
Classificação escala de cinza



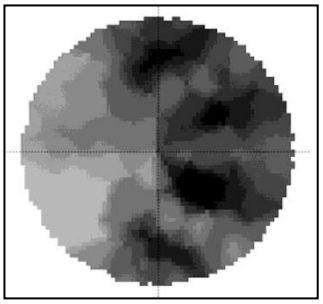


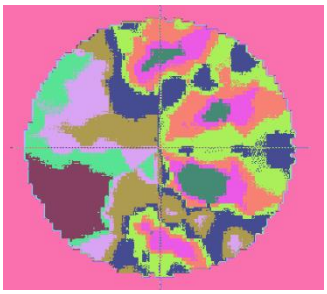
Classificação LSa%

Árvore 04 – Tomograma original



Classificação escala de cinza

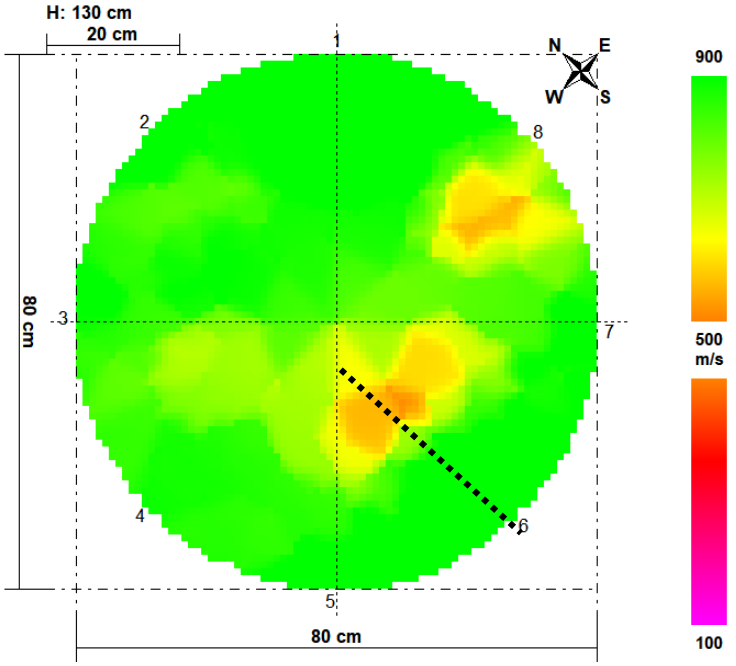




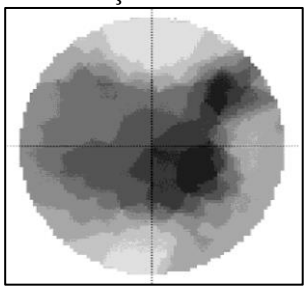
Classificação LSa%

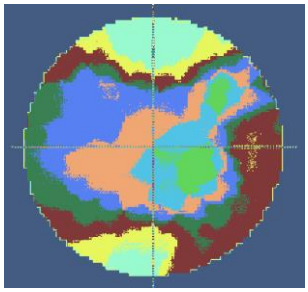
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 05 – Tomograma original



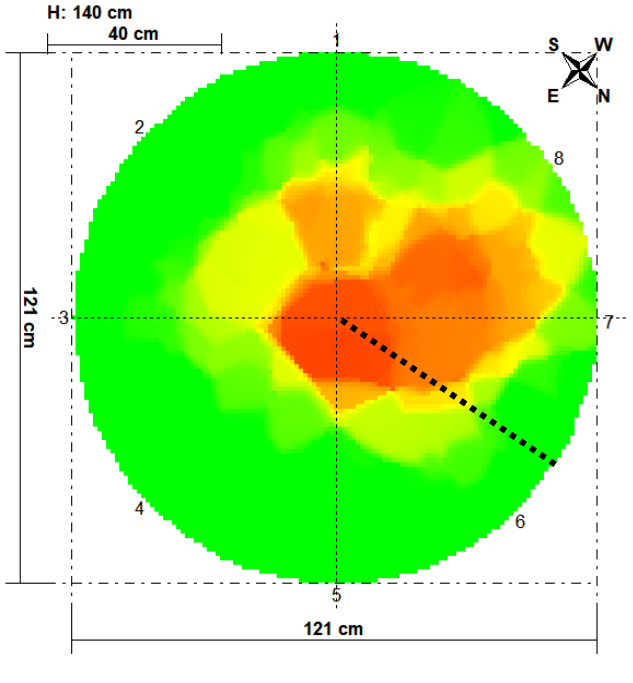
Classificação escala de cinza



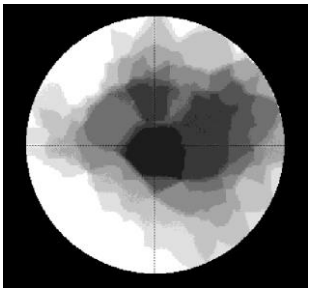


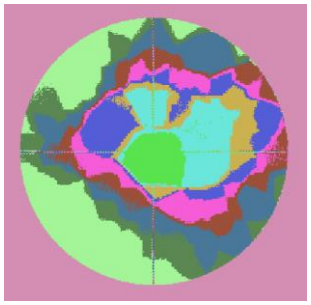
Classificação LSa%

Árvore 06 – Tomograma original



Classificação escala de cinza

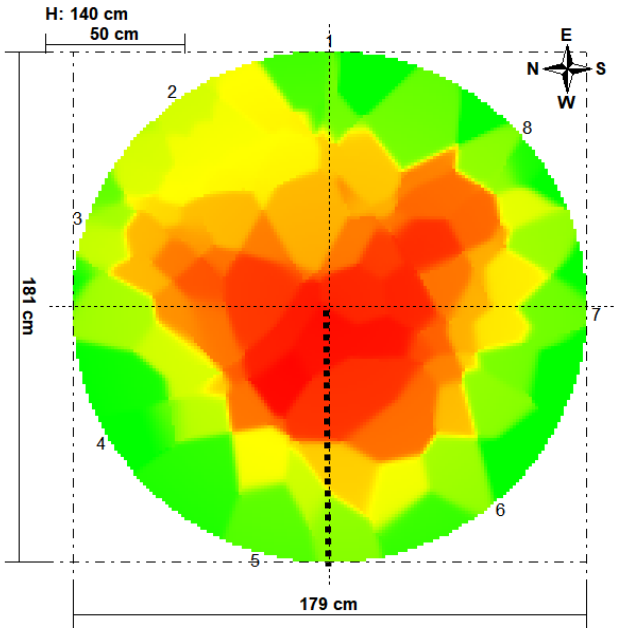


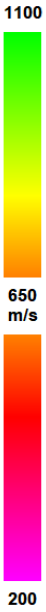


Classificação LSa%

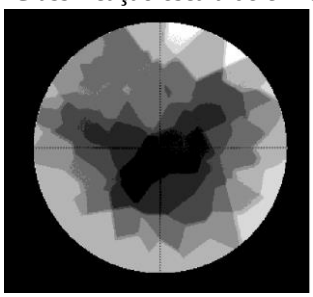
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

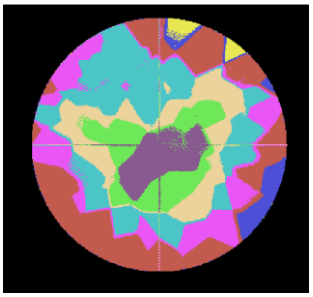
Árvore 07 – Tomograma original





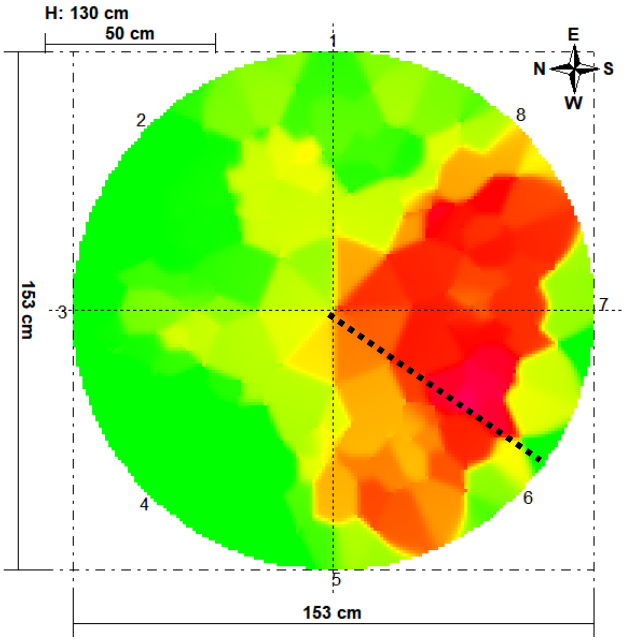
Classificação escala de cinza



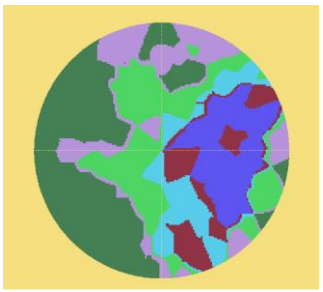


Classificação LSa%

Árvore 08 – Tomograma original



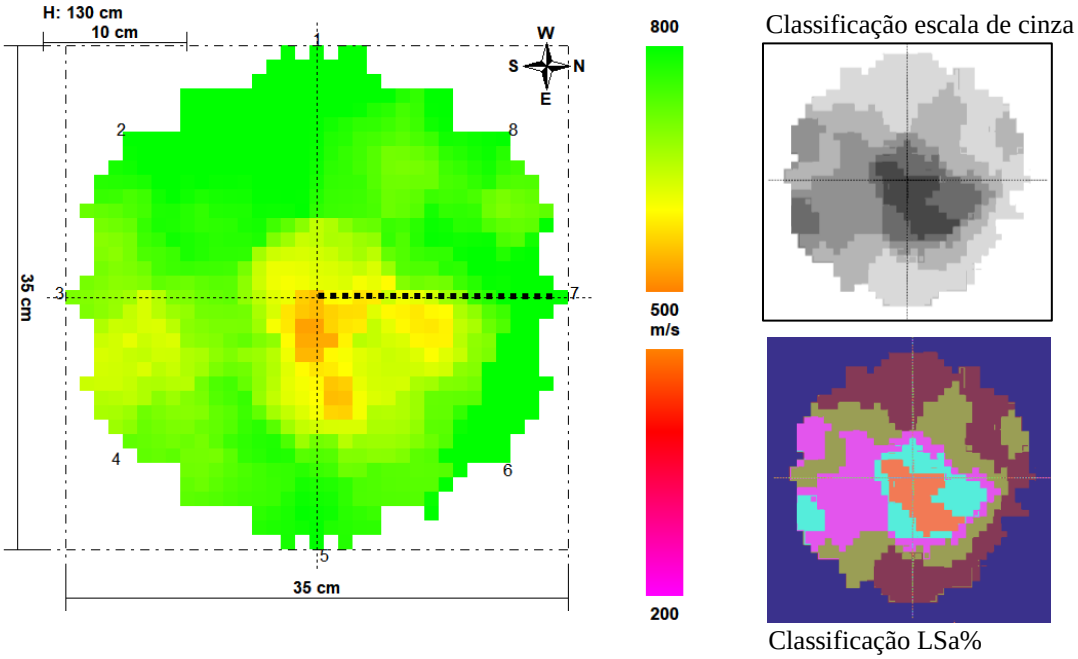
Classificação escala de cinza



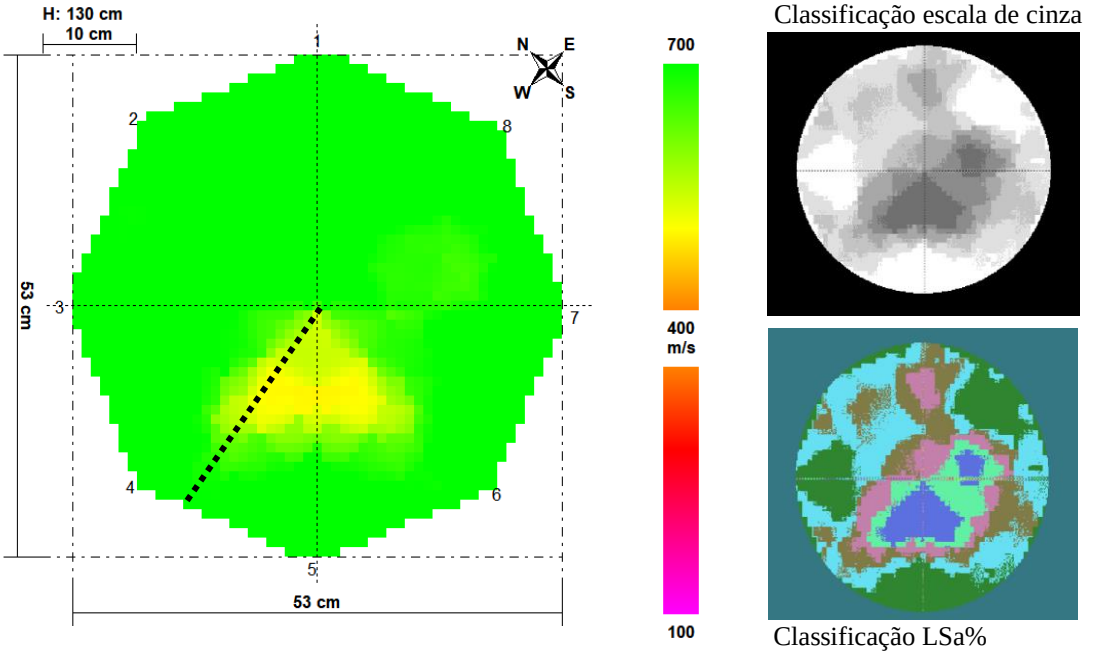
Classificação LSa%

*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 09 – Tomograma original

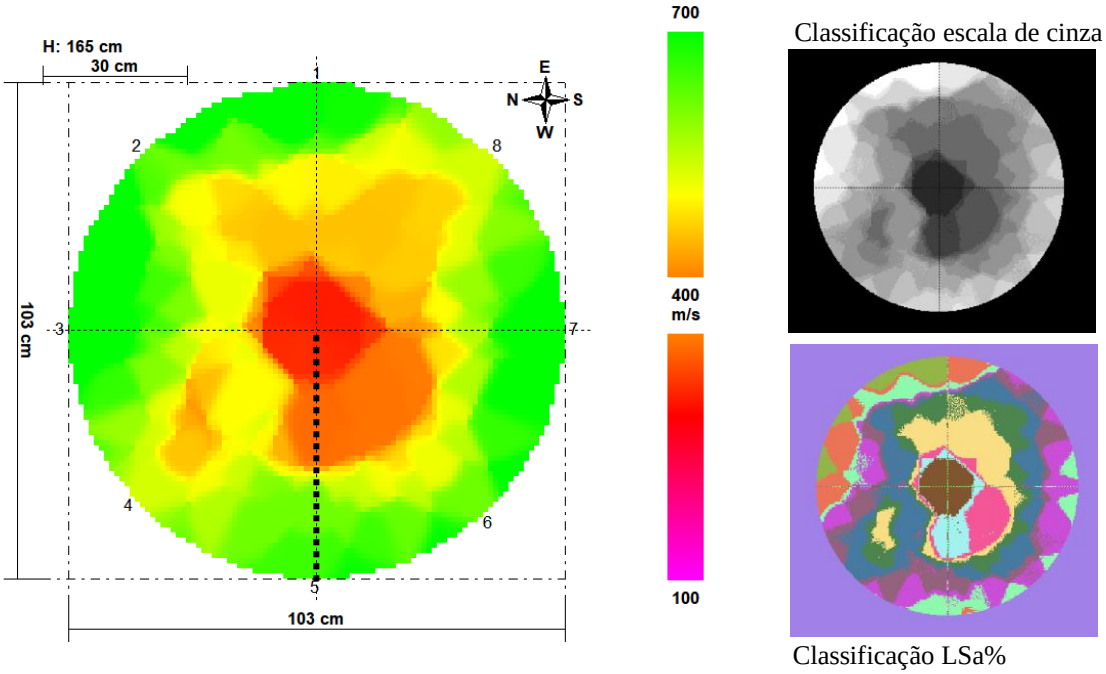


Árvore 11 – Tomograma original

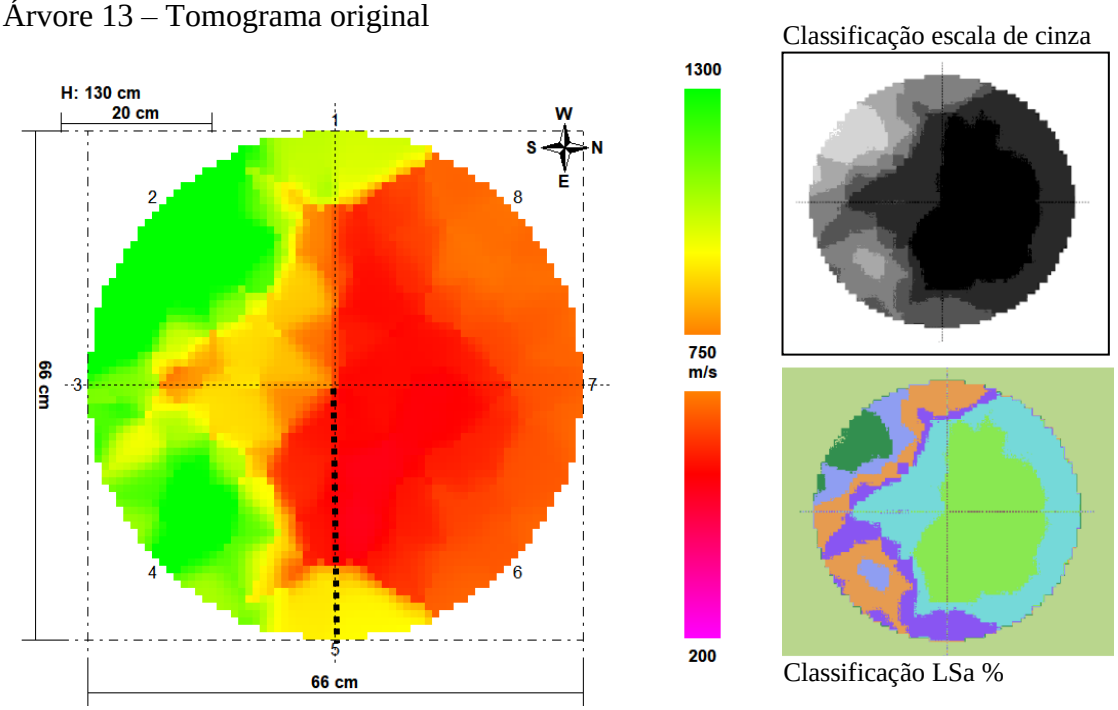


*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 12 – Tomograma original

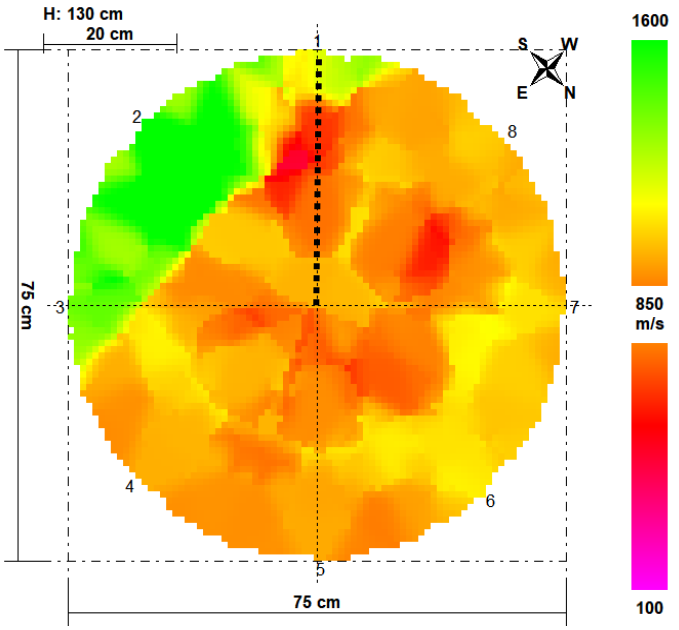


Árvore 13 – Tomograma original

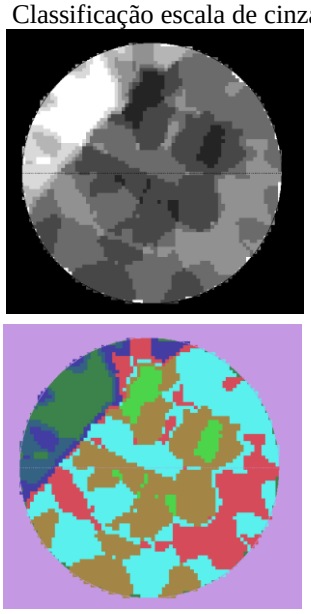


*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 14 – Tomograma original

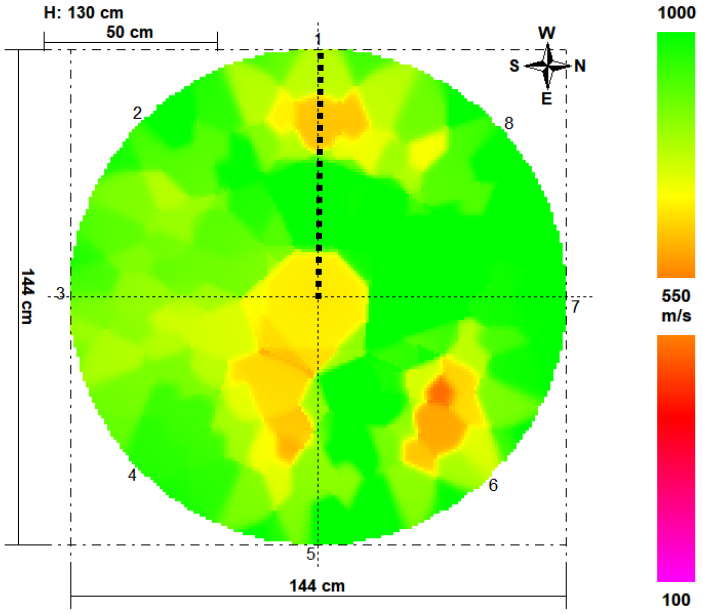


Classificação escala de cinza

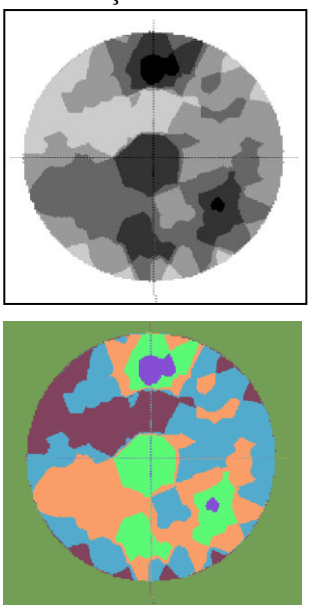


Classificação LSa%

Árvore 15 – Tomograma original



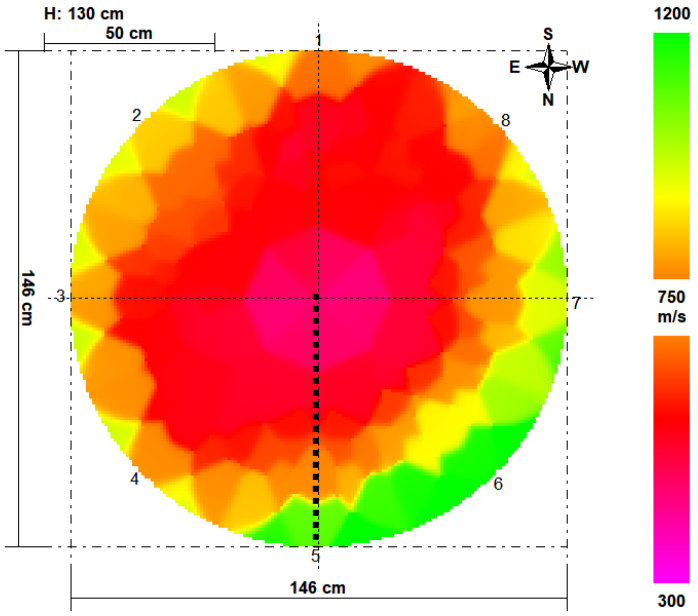
Classificação escala de cinza



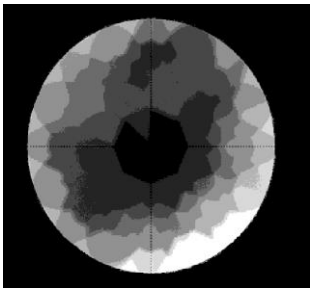
Classificação LSa%

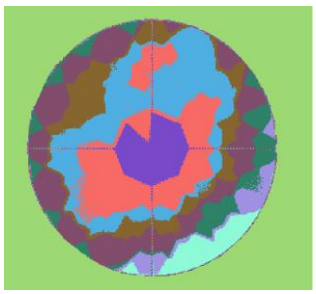
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 16 – Tomograma original



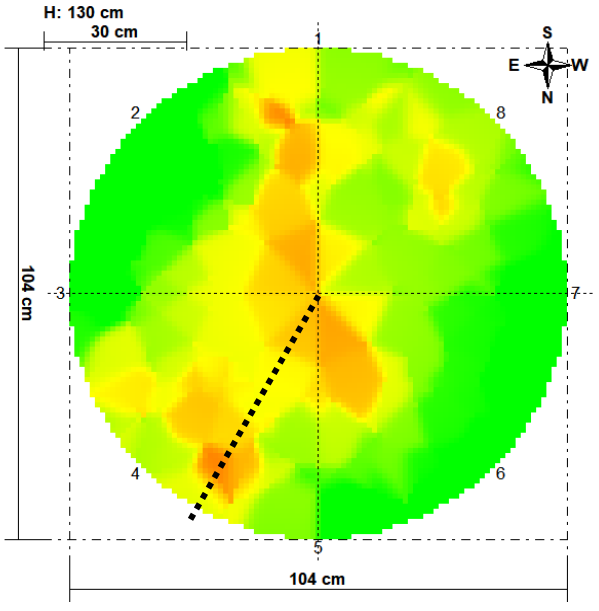
Classificação escala de cinza



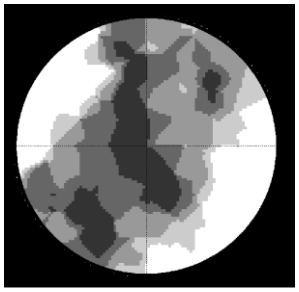


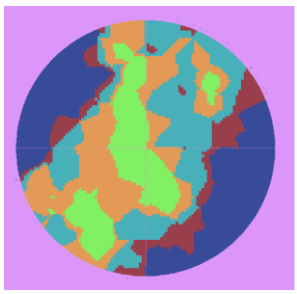
Classificação LSa%

Árvore 17 – Tomograma original



Classificação escala de cinza

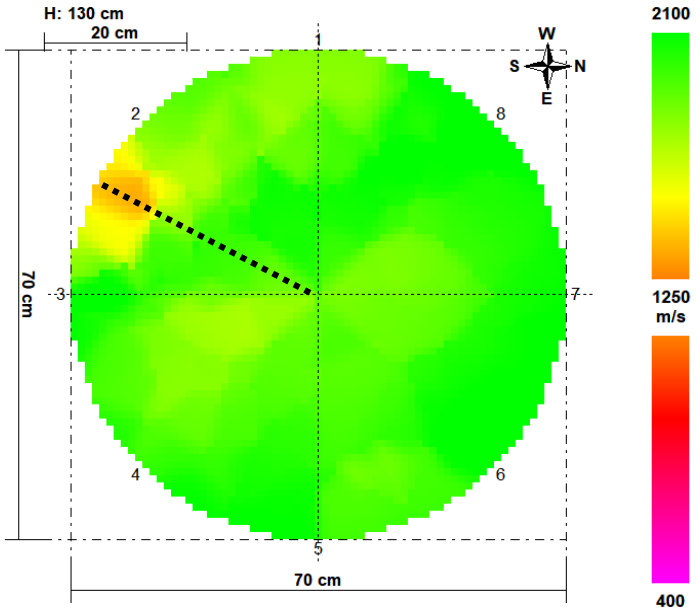




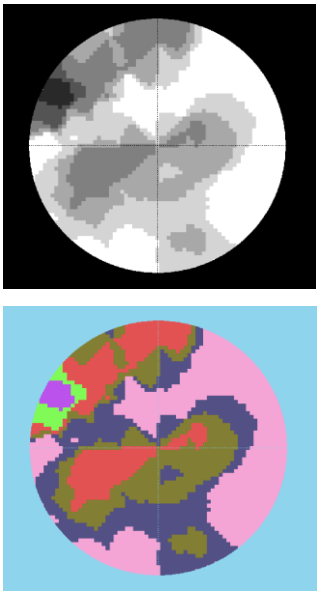
Classificação LSa%

*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 18 – Tomograma original

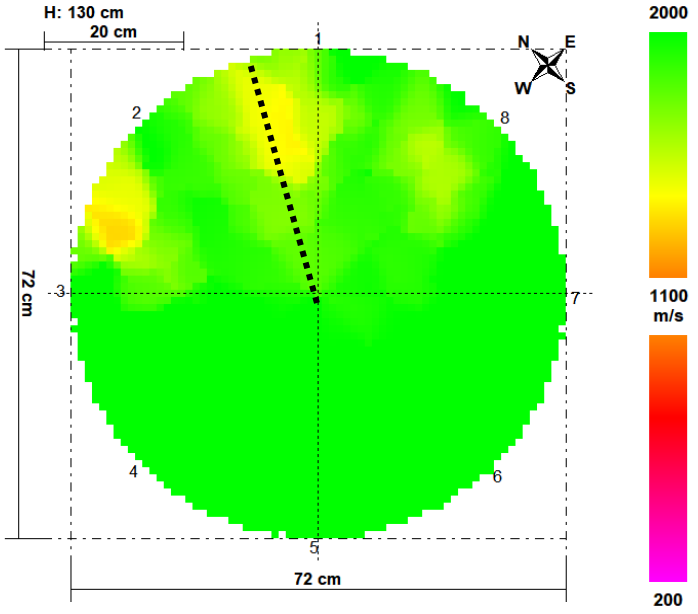


Classificação escala de cinza

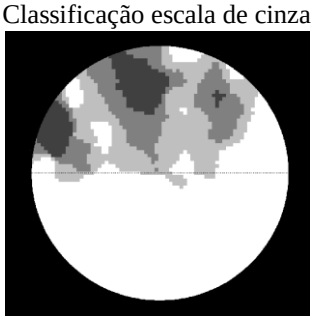


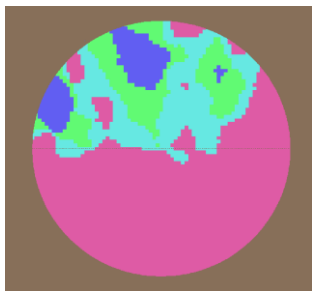
Classificação LSa%

Árvore 19 – Tomograma original



Classificação escala de cinza

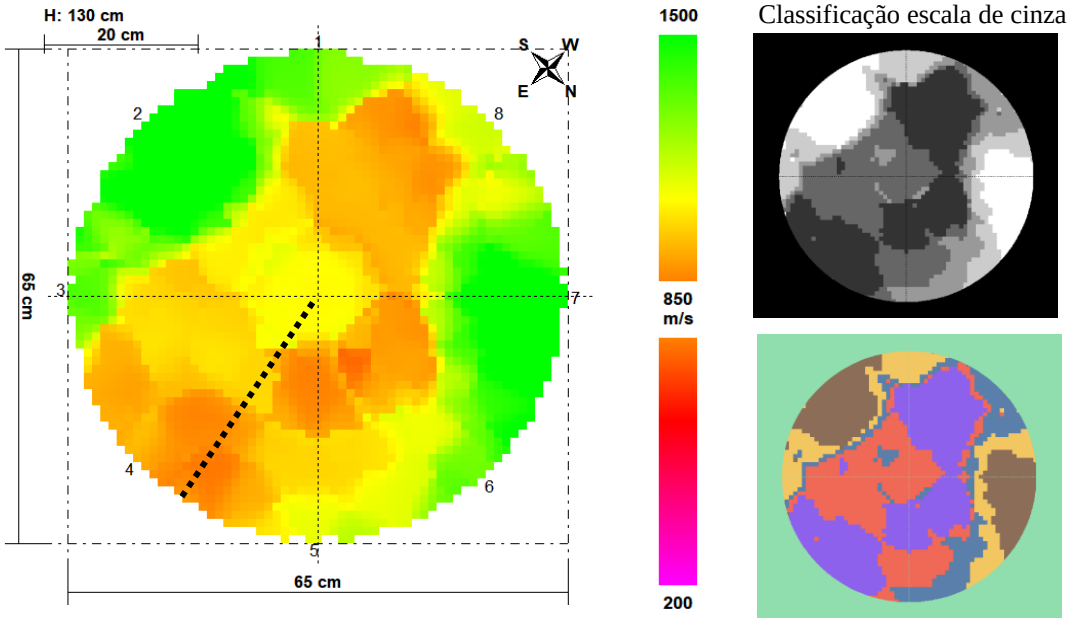




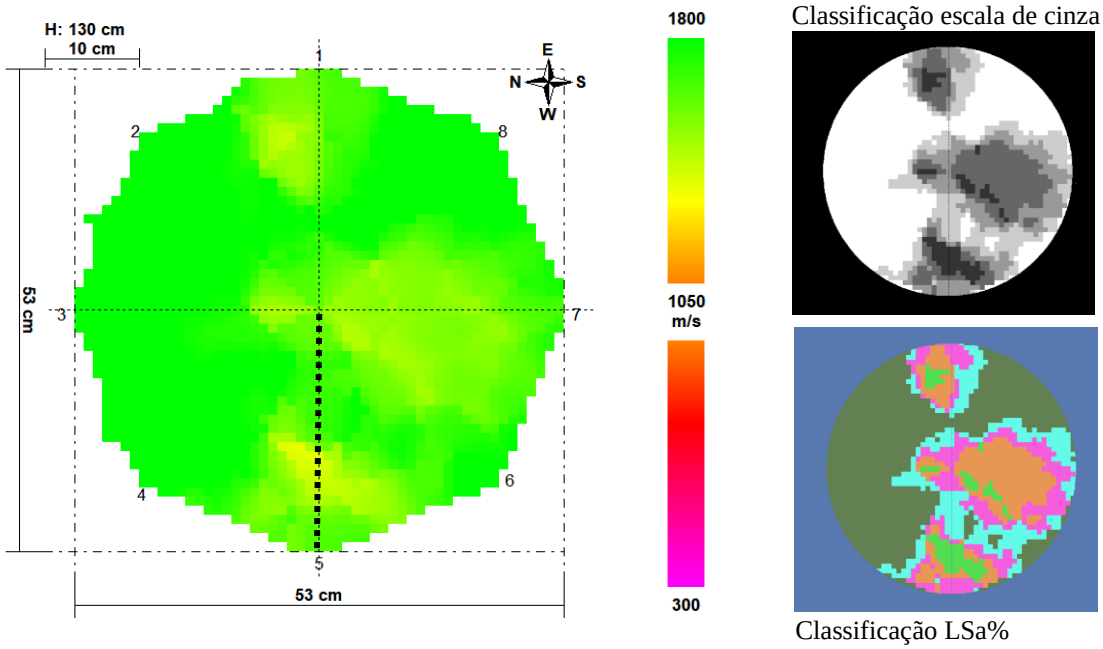
Classificação LSa%

*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 20 – Tomograma original

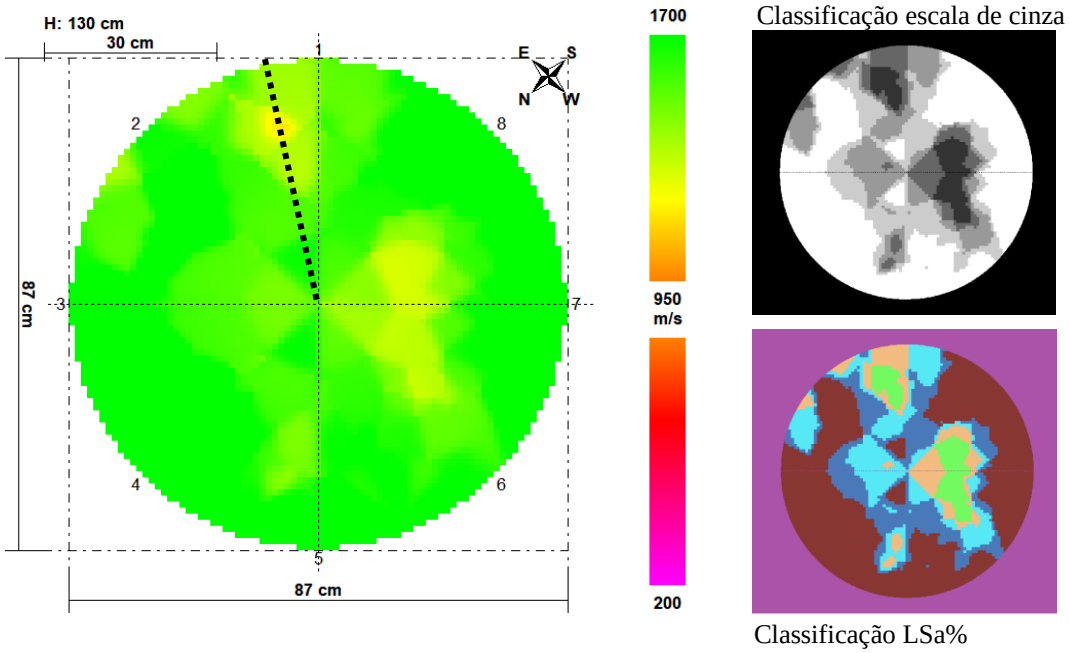


Árvore 21 – Tomograma original

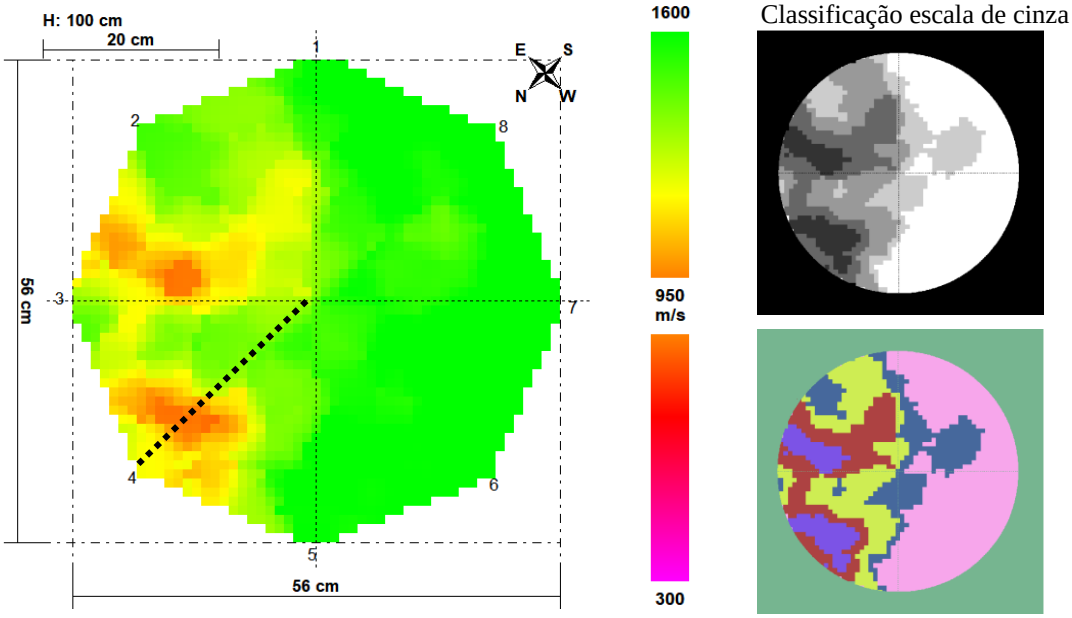


*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 22 – Tomograma original

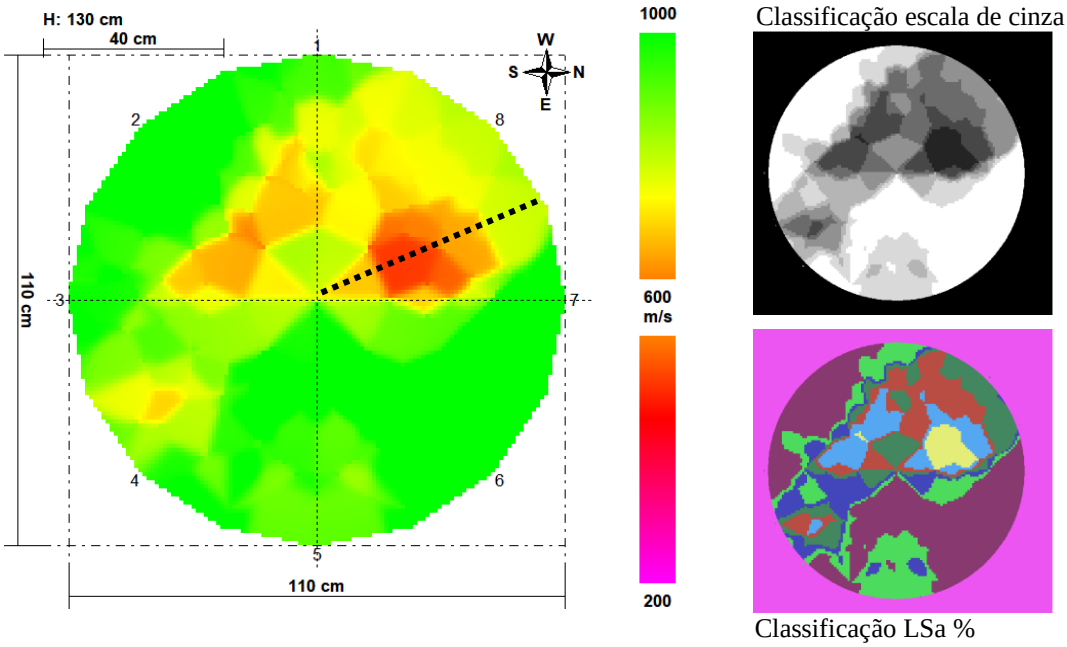


Tree 23 – Tomograma original

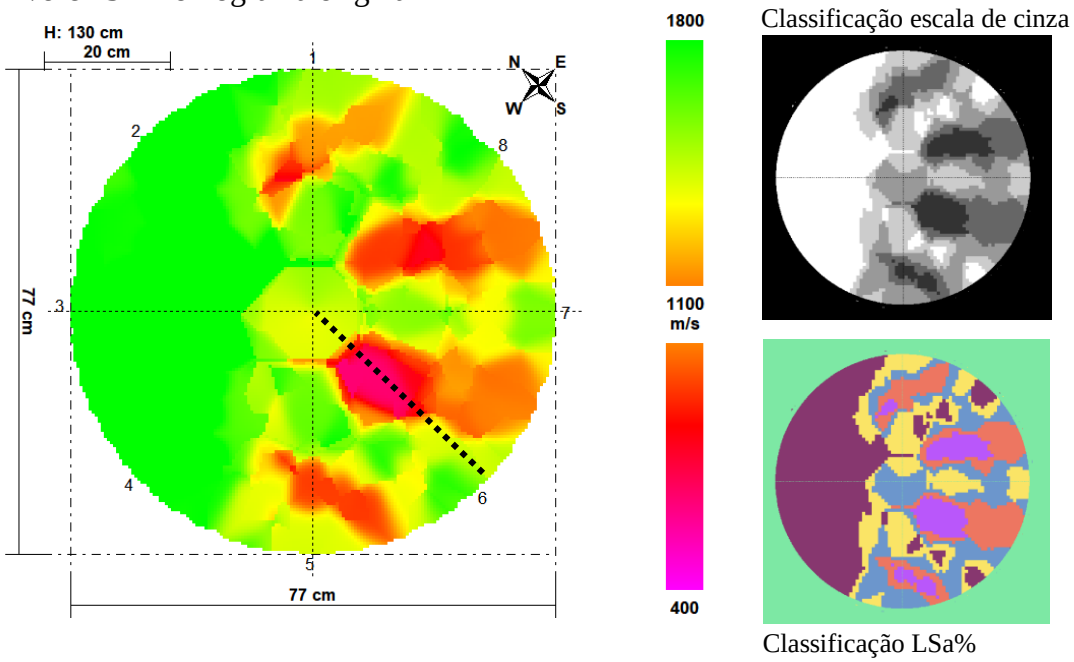


*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 24 – Tomograma original

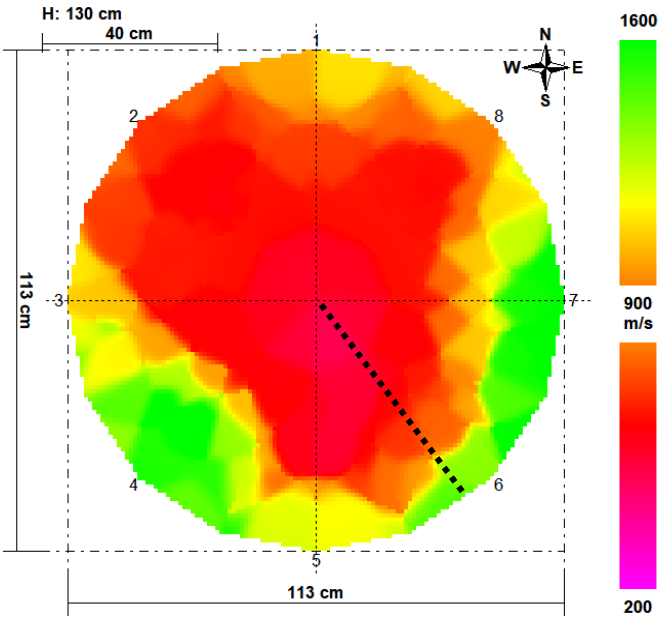


Árvore 25 – Tomograma original

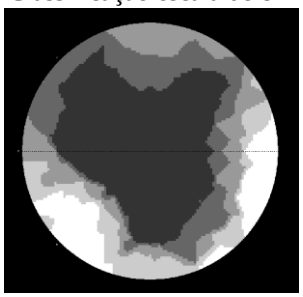


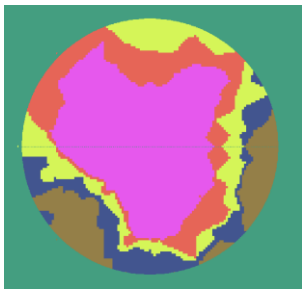
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 26 – Tomograma original



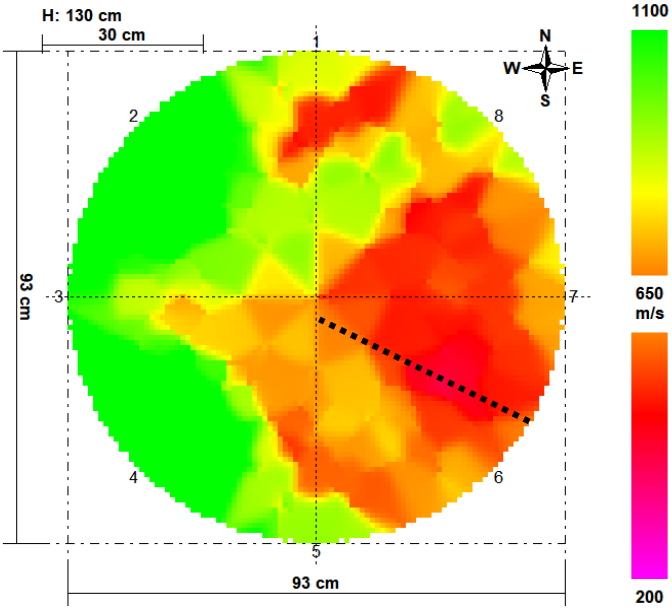
Classificação escala de cinza



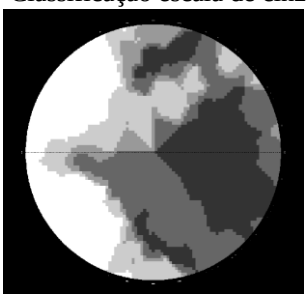


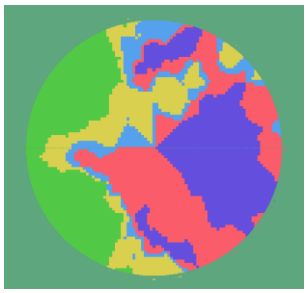
Classificação LSa%

Árvore 27 – Tomograma original



Classificação escala de cinza

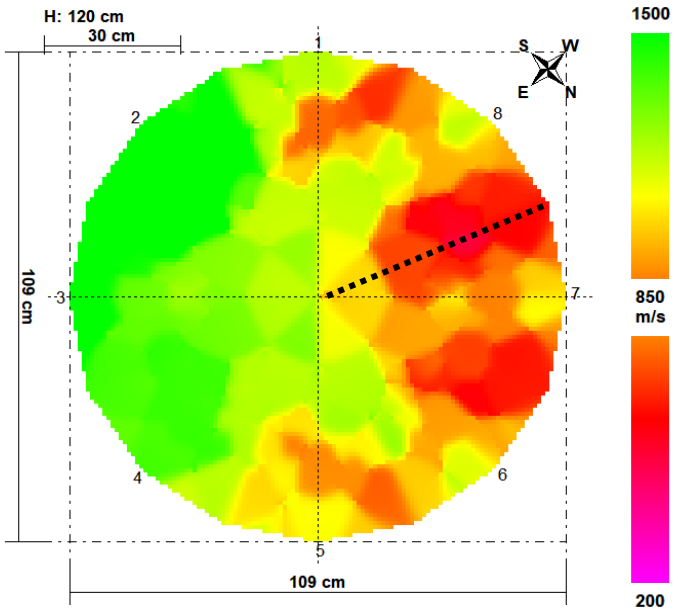




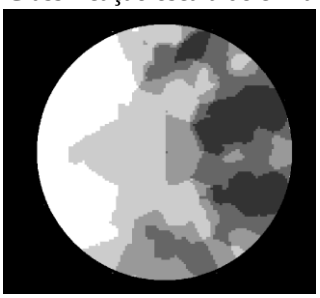
Classificação LSa%

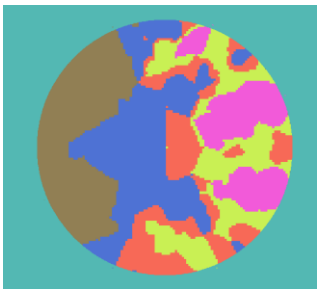
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 28 – Tomograma original



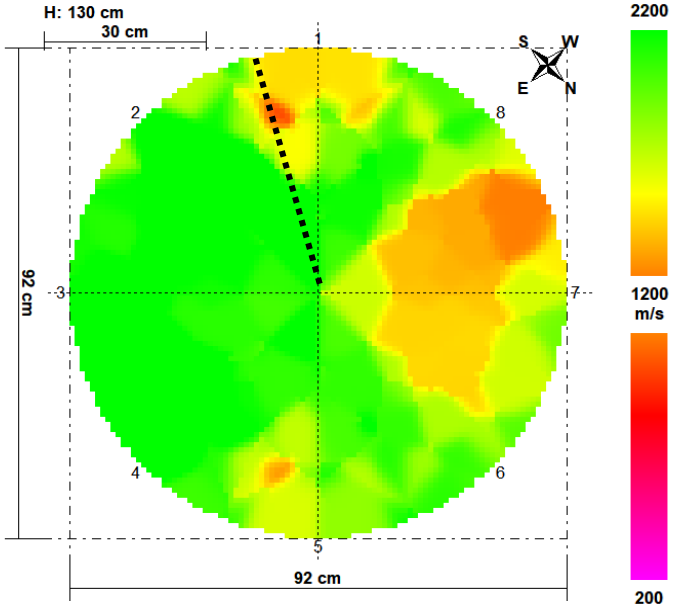
Classificação escala de cinza



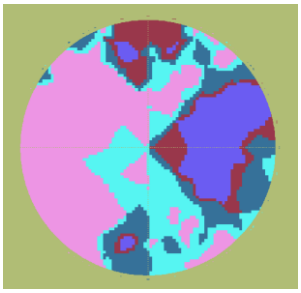


Classificação LSa%

Árvore 29 – Tomograma original



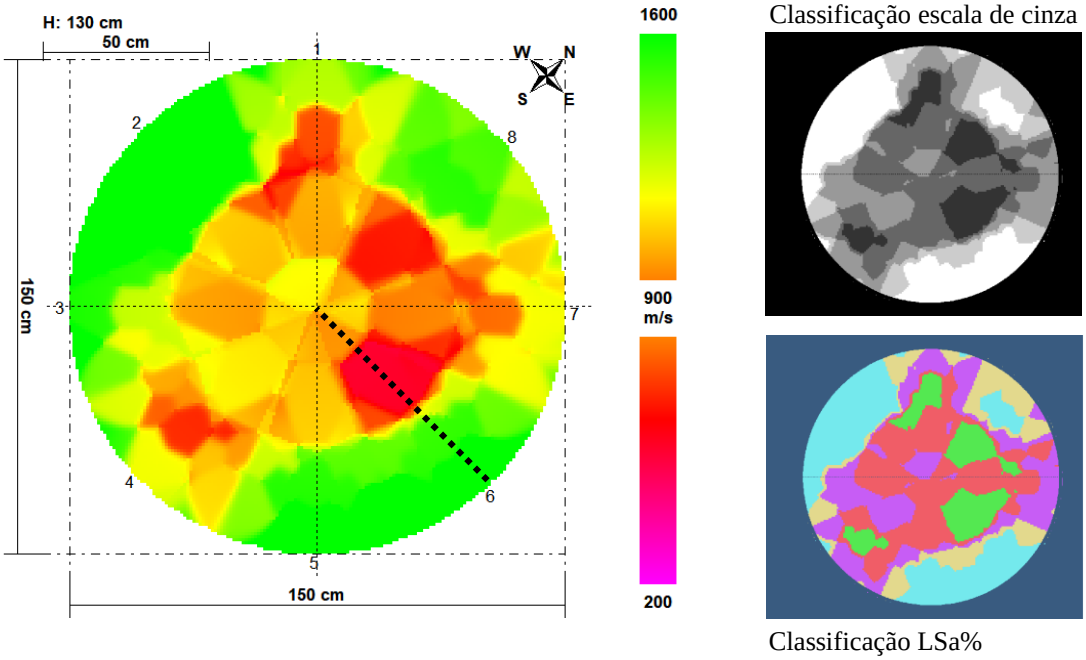
Classificação escala de cinza



Classificação LSa%

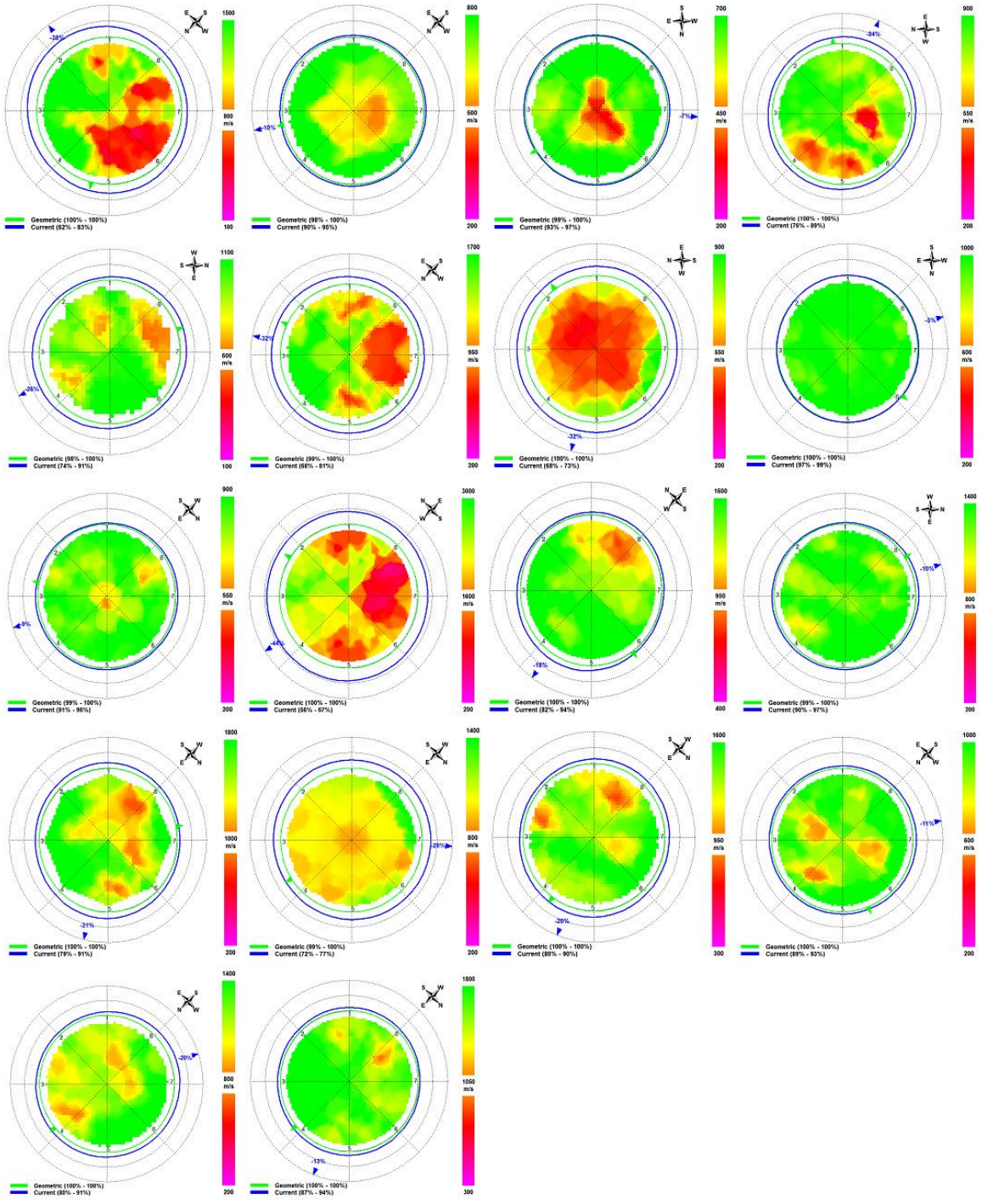
*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

Árvore 30 – Tomograma original

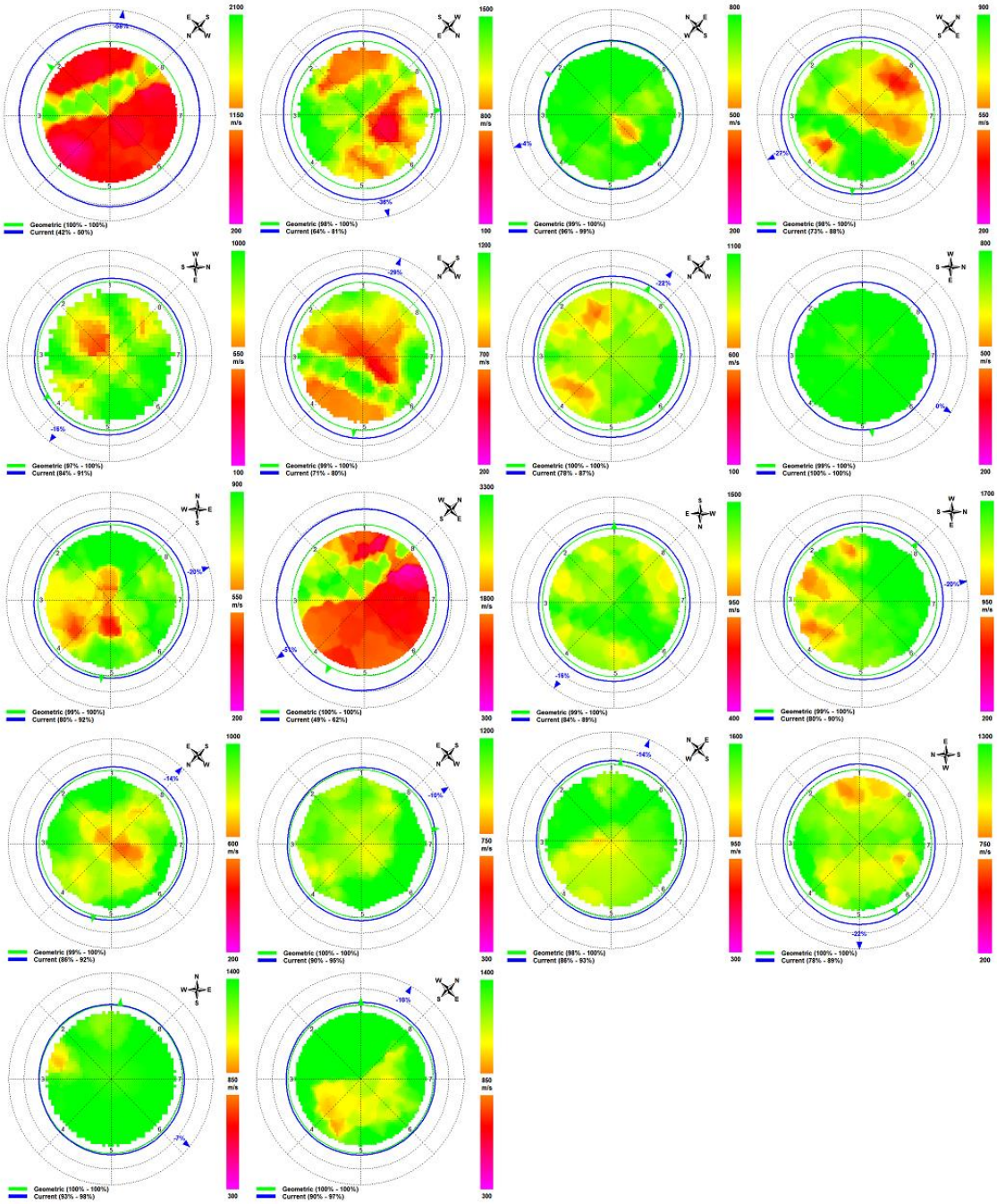


*Legenda: ---- = direção de remoção do núcleo radial (DRNr); LSa% = percentual de área afetada por velocidades de propagação de ondas mecânicas baixas.

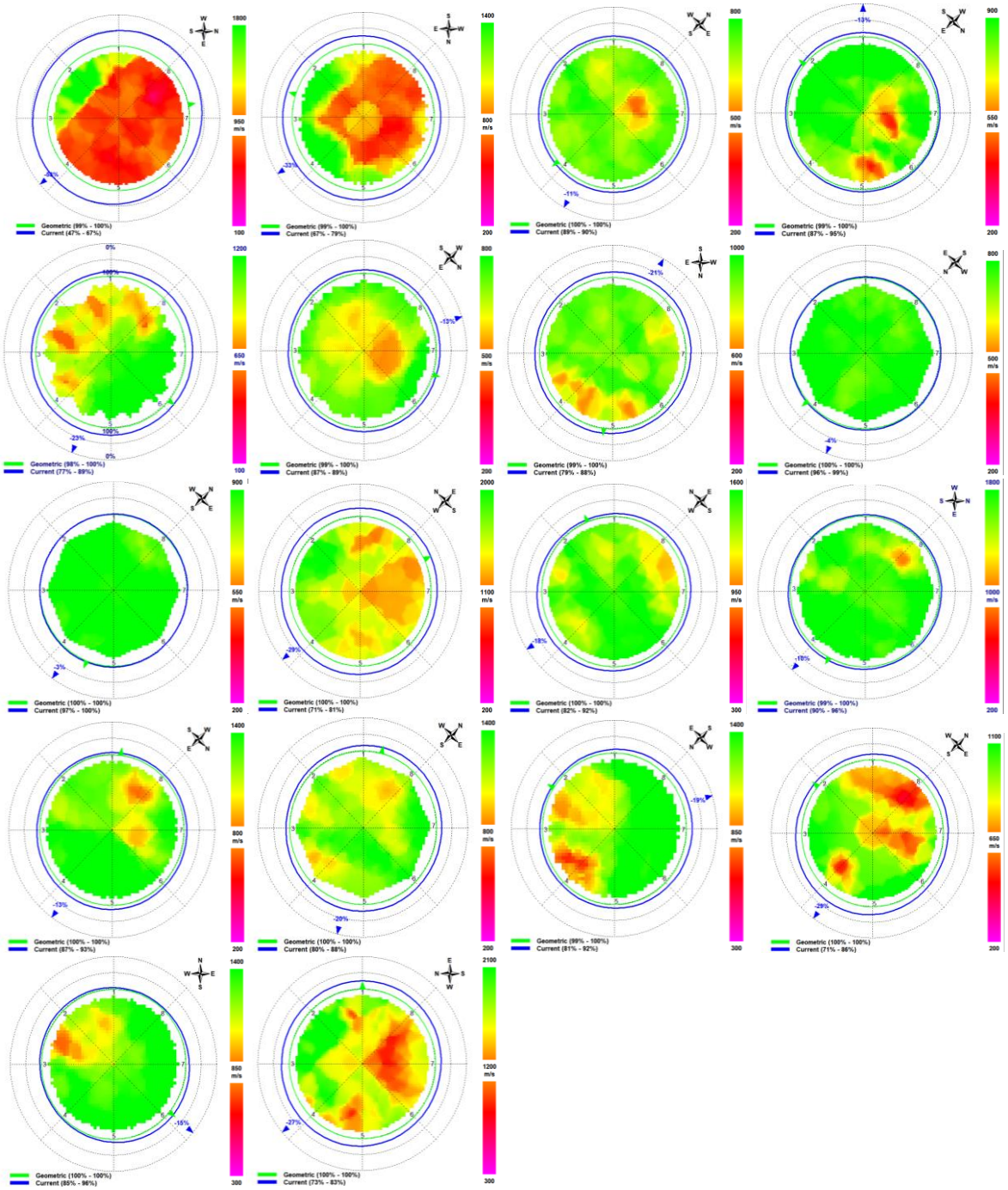
Anexo III: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp, na altura de 25% do fuste e percentual de perda de resistência mecânica.



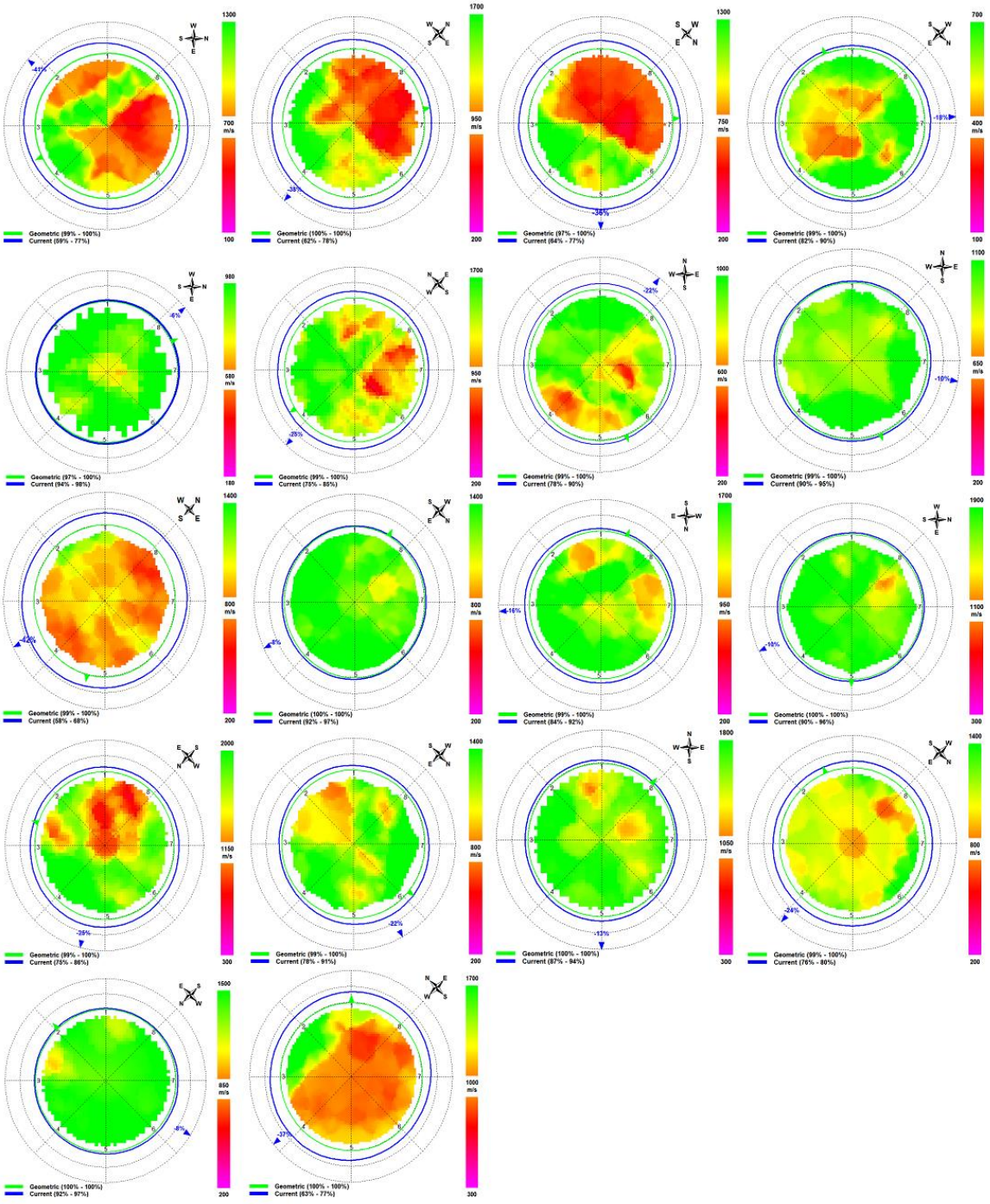
Anexo IV: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 50% do fuste e percentual de perda de resistência mecânica.



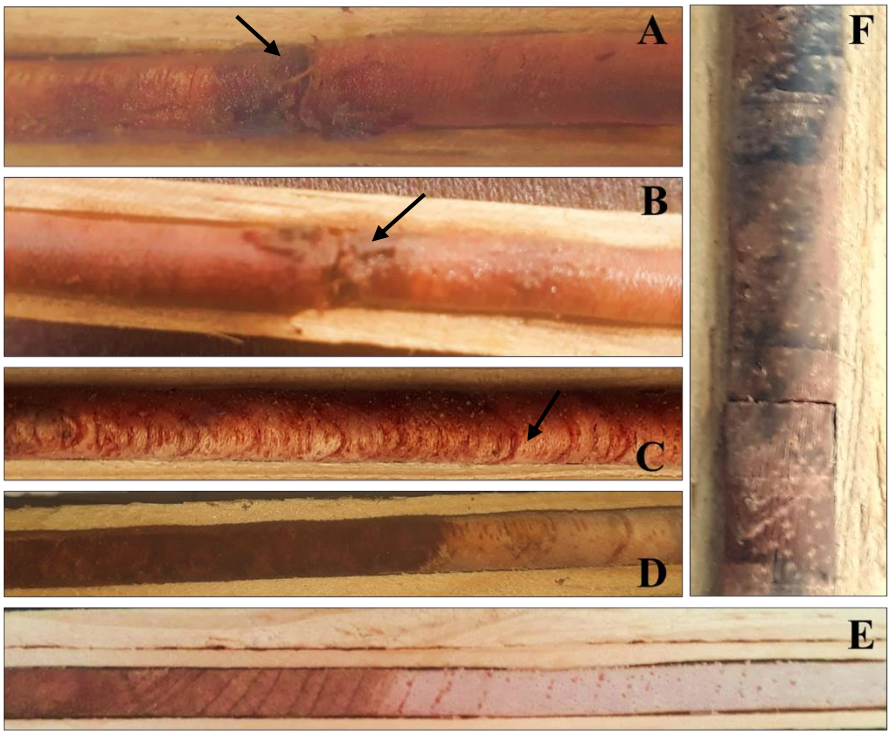
Anexo V: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 75% do fuste e percentual de perda de resistência mecânica.



Anexo VI: Tomogramas das seções transversais dos troncos de árvores de *Copaifera* sp., na altura de 100% do fuste e percentual de perda de resistência mecânica.



Anexo VII. Qualidade e defeitos internos identificados em núcleos de incremento, de seções transversais de árvores de *Copaifera* sp., obtidos com sonda *Pressler*.



Legenda: A. Núcleo de incremento apresentando fenda com adjacência irregular; B. Núcleo de incremento mostrando fissura com adjacência com deterioração inicial; C. Demarcação de faixas de parênquima axial; D e E. Diferenciação entre cerne (cor escura) e alburno (cor clara); F. Ruptura do núcleo de incremento na linha do parênquima axial.