



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

LARISSA TIAGO VOLPI

**DIFERENCIAÇÃO DE TIPOS DE DETERIORAÇÃO EM ÁR-
VORES POR MEIO DE FAIXAS DE VELOCIDADE DE UL-
TRASSOM E ESCALA DE CINZA EM IMAGENS TOMOGRÁ-
FICAS**

CAMPINAS

2025

LARISSA TIAGO VOLPI

DIFERENCIAÇÃO DE TIPOS DE DETERIORAÇÃO EM ÁRVORES POR MEIO DE FAIXAS DE VELOCIDADE DE ULTRASSOM E ESCALA DE CINZA EM IMAGENS TOMOGRÁFICAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, na Área de Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais Estruturas e Árvores.

Orientador: Profa. Dra. Raquel Gonçalves

Coorientador: Dra. Stella Stopa Assis Palma

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA LARISSA TIAGO VOLPI, E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. RAQUEL GONÇALVES.

CAMPINAS

2025

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V888d Volpi, Larissa Tiago, 1984-
Diferenciação de tipos de deterioração em árvores por meio de faixas de velocidade de ultrassom e escala de cinza em imagens tomográficas / Larissa Tiago Volpi. – Campinas, SP : [s.n.], 2025.

Orientador: Raquel Gonçalves.
Coorientador: Stella Stopa Assis Palma.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Propagação de ondas. 2. Testes não-destrutivos. 3. Ondas ultrassônicas. 4. Troncos de árvores. I. Gonçalves, Raquel, 1961-. II. Palma, Stella Stopa Assis, 1979-. III. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: Differentiation of types of tree deterioration through ultrasonic velocity bands and grayscale in tomographic images

Palavras-chave em inglês:

Wave propagation

Nondestructive testing

Ultrasonic waves

Tree trunks

Área de concentração: Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores

Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Raquel Gonçalves [Orientador]

Aderbal Gomes da Silva

Mariana Nagle dos Reis

Data de defesa: 27-02-2025

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

ODS: 11. Cidades e comunidades sustentáveis

ODS: 13. Ação contra a mudança global do clima

ODS: 15. Vida terrestre

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0009-9100-953X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1465299032117194>

Profa. Dra. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientador

Prof. Dr. Aderbal Gomes da Silva – Membro Titular

Dra. Mariana Nagle dos Reis – Membro Titular

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Dedico essa dissertação à família da Isabela Tibúrcio Fermino (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UNICAMP e à FEAGRI pela oportunidade de poder estudar e pesquisar em tão conceituada e maravilhosa Universidade. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela contribuição na minha formação.

À minha orientadora Profa. Dra. Raquel Gonçalves e à minha coorientadora Dra. Stella Stopa Assis Palma, por toda orientação, paciência, correções, aulas, amizade, incentivo, compreensão e principalmente por me incluírem em tão relevante projeto de pesquisa. Sou muito privilegiada pelo suporte que vocês me deram. Espero contribuir à altura tamanho comprometimento e dedicação à luta pela arborização urbana segura e de boa qualidade.

À Assistente Técnica de Apoio à Pós-Graduação Valéria Altmann Ferreira por todo suporte, gentileza e amizade.

Ao grande Prof. Dr. Aderbal Gomes da Silva, por toda troca de conhecimento durante o período em que esteve conosco no Grupo de Ensaios Não Destrutivos como professor visitante, pelo apoio durante os ensaios, pelas contribuições na qualificação e pela amizade.

À toda equipe do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, pelo apoio, suporte, amizade, troca de conhecimentos, à Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso, ao Dr. Paulo Gustavo Krejci Nunes, ao Dr. Rafael Gustavo Mansini Lorensani, ao Prof. Dr. William Martins Vicente, à M.Sc. Júlia Jane Oliveira Alves, à M.Sc. Karen Christina de Freitas, à Elidiani Melissa de Moura, à M.Sc. Chiara Barros Secco e à M.Sc. Carolina Kravetz. Ao estagiário de IC Silas Sousa Santos, também aos estagiários bolsistas Matheus De Mello Barreto Mendes André, Lázaro João Timbe e Vinícius Duarte Bedon, e mais uma vez ao Paulo Gustavo por todo auxílio nos ensaios e tabulação dos dados.

À minha incrível e maravilhosa mãe, Vera Lúcia Tiago que sempre me incentivou e me apoiou em meus estudos, e mesmo distante está perto de mim. Aos meus irmãos Luciano Tiago e Débora Caroline Marques de Souza Volpi, e ao meu pai Luiz Carlos Volpi por todo amor e apoio. Ao meu esposo Yuri Fernandes dos Santos pelo apoio, companheirismo, incentivo, paciência, auxílio nas traduções para língua inglesa e nas dúvidas sobre programação em Python.

À toda equipe de Divisão de Meio Ambiente da UNICAMP, por disponibilizar e entregar as amostras das árvores no laboratório para que esta pesquisa pudesse acontecer, em especial à Engenheira Florestal Camila Alonso Santos e ao Jurandir Alves Moreira, assim como aos profissionais terceirizados que fazem o manejo das árvores da UNICAMP, vocês foram essenciais. Nunca irei me esquecer.

À toda equipe da Diversidade Vegetal em Foco (DIVEG) do IB, principalmente às professoras Dra. Maria Fernanda Aguiar Calió e Dra. Samantha Koehler, pela amizade e por me supervisionarem nas duas vezes que fui PED no Programa de Estágio Docente no IB, assim como à professora Dra. Ingrid Koch que me incentivou a ingressar no mestrado na UNICAMP.

À todas as amizades que fiz na UNICAMP, aos alunos, aos professores, aos funcionários terceirizados da limpeza e da segurança, aos técnicos dos laboratórios, à turma do Projeto Convergências COCEN, à turma da PPG-Ecologia, aos funcionários terceirizados do RU e do RS, aos amigos da Logicom, aos participantes do CAF/UNICAMP e ao Grupo de Altruísmo Eficaz da UNICAMP, saibam que levo todos vocês no meu coração, em especial, à M.Sc. Tatiana de Oliveira Russo, ao José Maria da Silva, ao Gastão Bosco Rodrigues, ao Alexandre da Luz Kume, à Dra. Shana Sampaio Sieber, ao Oldeny Costa Santos, ao Jamilson Martins Luz e ao Seu Divino, grande conhecedor de árvores.

Ao Gabriel Palma Ferrazoli, pela melhor amizade de todas.

Aos meus amigos e familiares que torceram e vibraram por mim, em especial àqueles amigos do Viveiro Municipal de São José do Rio Preto que me apoiaram para minha vinda ao mestrado.

À toda equipe do SAPPE e do CECOM, pois esses serviços foram fundamentais para minha saúde física e psicológica durante minha permanência no mestrado.

À Pesquisa do Estado de São Paulo FAPESP por fomentar à pesquisa (Proc. 2023/03111-0), de fundamental importância e imprescindível à ciência.

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

“Fazer avançar a arboricultura brasileira através do desenvolvimento da pesquisa, ciência e tecnologia, da profissionalização da atividade e da conscientização pública.”

(Missão da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana – SBAU)

RESUMO

A arborização urbana desempenha papel fundamental na melhoria da qualidade ambiental e do bem-estar da população, contribuindo para a redução das ilhas de calor, a mitigação de enchentes e a diminuição da poluição atmosférica. Entretanto, a presença de árvores em ambientes urbanos também demanda monitoramento constante de sua integridade estrutural para evitar riscos associados à queda de troncos e de galhos. A tomografia acústica tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta não destrutiva para inspeção da saúde das árvores, embora o alto custo dos equipamentos limite sua aplicação em larga escala. Com o objetivo de viabilizar alternativas mais acessíveis, pesquisas recentes têm explorado o uso de ultrassom convencional aliado a técnicas de pós-processamento de imagem. Neste contexto, o primeiro objetivo específico desta dissertação foi avaliar a adequação de velocidades de corte previamente obtidas para a espécie *Cenostigma pluviosum* na construção de imagens tomográficas de outras vinte espécies arbóreas. Os resultados indicaram que, apesar da variabilidade entre as espécies, as velocidades de corte originalmente determinadas para a espécie *Cenostigma pluviosum* produziram imagens com uma perda média de acurácia de apenas 5%. Esse valor é considerado aceitável dada a variabilidade natural da madeira, sugerindo que a padronização das velocidades pode ser uma estratégia viável para ampliar o uso da tomografia ultrassônica na análise de árvores urbanas. O segundo objetivo específico visou estudar a relação entre os valores de pixels das imagens dos discos, em tons de cinza, e as matrizes de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, visando avaliar a viabilidade da proposição de ferramenta que posteriormente possa ser utilizada em aprendizado de máquina para automatizar e tornar mais objetiva a interpretação da tomografia. Os resultados mostraram que tanto os valores de velocidade quanto os valores de cinza das imagens foram significativamente mais altos em áreas íntegras, intermediários em regiões biodeterioradas e mais baixos em cavidades. A correlação entre os valores de cinza e a condição da madeira foi significativa ($R = -0,84$; $R^2 = 70,4\%$). Por outro lado, a grande irregularidade dos troncos e das zonas biodeterioradas dificultou a obtenção das velocidades na matriz, afetando a correlação entre a velocidade das ondas e a condição da madeira e, consequentemente, entre os valores de cinza e a velocidade. Para atingir ambos os objetivos específicos, nesta pesquisa foram analisados 38 discos de troncos de vinte espécies. Em cada disco foram classificadas as regiões íntegras, biodeterioradas e com cavidades. Os achados comprovam a validade da tomografia ultrassônica em inspeção de árvores, e sugerem a importância de continuar avançando em metodologias de obtenção e de adoção de velocidade representativas de zonas de interesse na construção das imagens tomográficas. Ademais, a forte correlação entre os valores de cinza e a saúde da madeira indica o potencial da utilização dessas imagens em modelos de aprendizado de máquina para a automação da identificação de defeitos. Dessa forma, espera-se que os resultados desta dissertação contribuam para o aprimoramento da análise tomográfica em árvores urbanas, permitindo abordagem mais acessível e eficiente na gestão da arborização urbana e na prevenção de riscos.

Palavras-chave: propagação de ondas ultrassônicas, ensaio não destrutivo, velocidade de corte, imagens tomográficas de troncos de árvores.

ABSTRACT

Urban tree planting plays a fundamental role in improving environmental quality and the well-being of the population, contributing to the reduction of heat islands, flood mitigation, and decreased air pollution. However, the presence of trees in urban environments also requires constant monitoring of their structural integrity to prevent risks associated with trunk and branch failure. Acoustic tomography has been widely used as a non-destructive tool for tree health inspection, although the high cost of equipment limits its large-scale application. To enable more accessible alternatives, recent research has explored the use of conventional ultrasound combined with image post-processing techniques. In this context, the first specific objective of this dissertation was to evaluate the suitability of cutting velocities previously obtained for the species *Cenostigma pluviosum* in constructing tomographic images of twenty other tree species. The results indicated that, despite variability among species, the cutting velocities originally determined for *Cenostigma pluviosum* produced images with an average accuracy loss of only 5%. This value is considered acceptable given the natural variability of wood, suggesting that standardizing velocities may be a viable strategy to expand the use of ultrasonic tomography in urban tree analysis. The second specific objective was to study the relationship between the pixel values of the disc images, in grayscale, and the velocity matrices of ultrasonic wave propagation, aiming to assess the feasibility of proposing a tool that could later be used in machine learning to automate and make tomography interpretation more objective. The results showed that both velocity values and grayscale values were significantly higher in intact areas, intermediate in biodeteriorated regions, and lower in cavities. The correlation between grayscale values and wood condition was significant ($R = -0.84$; $R^2 = 70.4\%$). On the other hand, the great irregularity of trunks and biodeteriorated zones made it difficult to obtain the velocities in the matrix, affecting the correlation between wave velocity and wood condition and, consequently, between grayscale values and velocity. To achieve both specific objectives, this study analyzed 38 trunk discs from twenty species. In each disc, intact, biodeteriorated, and cavity regions were classified. The findings confirm the validity of ultrasonic tomography in tree inspection and highlight the importance of further advancing methodologies for obtaining and adopting representative velocities of key zones in tomographic image construction. Moreover, the strong correlation between grayscale values and wood health indicates the potential use of these images in machine learning models for defect identification automation. Thus, the results of this dissertation are expected to contribute to improving tomographic analysis in urban trees, enabling a more accessible and efficient approach to urban tree management and risk prevention.

Keywords: ultrasonic wave propagation, non-destructive testing, cutting velocity, tomographic images of tree trunks.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	ARTIGOS	14
2.1	Artigo 1: Velocity Thresholds for Ultrasonic Tomographic Imaging Aimed at Detecting Cavities and Decay in Trees	14
2.2	Artigo 2: Identificação da madeira em diferentes condições sanitárias por histograma de tons de cinza e matriz de velocidades de propagação de ondas de ultrassom	40
3	DISCUSSÃO GERAL	56
4	CONCLUSÕES GERAIS	59
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
6	ANEXO	65

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos (GPEND), da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) tem, como uma de suas vertentes, pesquisas voltadas ao estudo de inspeção de árvores. Esse tema é de grande relevância na atualidade, uma vez que as mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência de eventos extremos, como chuvas e ventos fortes, fazendo com que as árvores estejam sujeitas a esforços de grandes magnitudes.

A ABNT 16.246-3 (2019) trata da avaliação de risco de árvores e estabelece três níveis de avaliação. A avaliação de nível 1 não envolve uso de equipamentos e se restringe à análise visual realizada para identificar defeitos óbvios, podendo ser feito por caminamento, por veículos ou por patrulha aérea. A avaliação nível 2 é também visual, mas envolve análise externa 360° do sistema radicular visível, do colo, do tronco e da copa da árvore. Nesse nível pode haver uso de ferramentas manuais, como por exemplo trena, hipsômetro, clinômetro etc., para identificação de defeitos estruturais. Já no nível 3, além da análise visual (nível 2), incluem-se uso de equipamentos de inspeção, sendo um deles a tomografia, foco desta pesquisa em nível de mestrado.

A tomografia acústica é uma técnica que tem sido considerada, tanto do ponto de vista prático quanto científico, de grande importância em inspeções de árvores. Do ponto de vista científico, muitos estudos têm tido como foco a melhoria das imagens produzidas, visando facilitar a interpretação e evitar erros nos diagnósticos. Os resultados têm implicações práticas, na melhoria dos equipamentos.

Uma das principais limitações da ampliação do uso da tomografia pelas prefeituras e empresas de inspeção é seu custo elevado, sendo um dos focos das pesquisas do GPEND, que propõe o uso de equipamento de ultrassom convencional e software de imagem pós-processada como substituto do tomógrafo industrial. Esta pesquisa está incluída neste tópico e teve como foco dar continuidade à pesquisa que envolveu o estudo de intervalos de velocidades de referência para a construção de imagens visando inferir zonas com cavidades e com biodeteriorações em troncos e/ou galhos de árvores. Na pesquisa anteriormente realizada no GPEND, o estudo foi focado em uma só espécie, a *Cenostigma pluviosum*, sendo um dos objetivos específicos desta pesquisa de mestrado foi ampliar a aplicação da metodologia para outras espécies utilizadas na arborização urbana, visando verificar se as mesmas faixas de velocidade de referência poderiam ser aplicadas sem grandes prejuízos para a acurácia das imagens tomográficas. O detalhamento desta análise, com seus principais resultados, é apresentado no Artigo 1.

Um dos grandes interesses atuais relacionados com diagnósticos de imagens é o uso de aprendizado de máquinas com foco na automação da interpretação. Isso é muito importante, porque a interpretação das imagens depende muito da experiência do inspetor, podendo ocorrer erros no caso da análise por leigos. Muitas vezes a compra de um tomógrafo mais sofisticado é entendida como suficiente para que se tenha imagens precisas, fazendo com que haja a expectativa de que o resultado será facilmente interpretado. No entanto, há muitas interferências que podem afetar essa interpretação.

Assim, identificar metodologias que possam ser, futuramente, utilizadas em ferramentas de aprendizado de máquinas, é hoje, muito importante em interpretação de imagens. Pesquisa anterior realizada no GPEND, também utilizando uma só espécie, a *Cenostigma pluviosum*, estudou as imagens em tons de cinza, tendo concluído que os valores de tons de cinza eram estatisticamente diferentes e coerentes em regiões de madeira íntegra (valores superiores), madeira com biodeteriorações (valores médios) e madeira com cavidade (valores baixos). Assim, o segundo objetivo específico desta pesquisa foi avaliar o comportamento dos tons de cinza em imagens, utilizando diferentes espécies, visando verificar a coerência dos valores de cinza em regiões com madeira em diferentes condições. O detalhamento e os resultados desta parte da pesquisa são apresentados no Artigo 2.

O texto desta dissertação está dividido em cinco capítulos, sendo essa Introdução Geral o primeiro, seguido do Capítulo 2, composto por dois Artigos (2.1 Artigo 1 e 2.2 Artigo 2) e, para finalizar, o Capítulo 3 de Discussão Geral, o Capítulo 4 das Conclusões Gerais e o Capítulo 5 das Referências Bibliográficas complementares, não incluídas nos artigos.

2 ARTIGOS

2.1 Artigo 1: Velocity Thresholds for Ultrasonic Tomographic Imaging Aimed at Detecting Cavities and Decay in Trees

Autores: Larissa Tiago Volpi, Raquel Gonçalves, Stella Stopa Assis Palma

Situação: Submetido a Forests (Qualis A2; JCR 2,4,; CiteScore 4,4)

Data de submissão: 23/04/2025

Type of the Paper (Article.)

Velocity Thresholds for Ultrasonic Tomographic Imaging Aimed at Detecting Cavities and Decay in Trees

Larissa Tiago Volpi ^{1*}, Stella Stopa Assis Palma² and Raquel Gonçalves ³

¹ FEAGRI, Unicamp—School of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-875, Brazil - * Correspondence: l255377@dac.unicamp.br;

² FEAGRI, Unicamp—School of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-875, Brazil - stellasp@unicamp.br;

³ FEAGRI, Unicamp—School of Agricultural Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-875, Brazil - raquelg@unicamp.br; +55-19-35211034

Abstract: Trees play a vital role in urban environments by mitigating heat islands, floods, and pollution, while promoting public health and well-being. As living organisms, they require regular monitoring to prevent structural failures. Acoustic tomography is an effective tool for assessing tree integrity, but its high-cost limits widespread use, especially in resource-constrained areas. To reduce costs, studies have explored the use of conventional ultrasound equipment combined with post-processed imaging. A key factor for reliable image construction is the definition of velocity thresholds (VT) to detect cavities and decay in trunks. This study evaluated VT ranges across 21 tree species. Results showed that the VT range with most accurate results for image construction aiming detecting cavities and decay varied by species, but accuracy losses were under 5% when a single VT range was used—an acceptable margin given wood’s natural variability. This supports the practical adoption of standardized VT for broader use in tree risk assessments.

Keywords: tree inspection; acoustic tomography; ultrasound

1. Introduction

Trees are fundamental elements in urban environments, contributing in multiple ways by reducing heat islands [1], mitigating floods [2], and lowering pollution levels, while also promoting public health and well-being [3, 4, 5]. However, being large living organisms, trees can cause severe accidents if they fall, potentially damaging infrastructure and endangering people [6, 7, 8, 9].

One of the primary strategies to prevent tree failure is regular inspection aimed at detecting signs of decay. These inspections can range from visual assessments to advanced techniques involving equipment with varying levels of technological sophistication [9, 10, 11, 12, 13].

Among these techniques, acoustic tomography is one of the most widely applied, as it enables the internal condition of the trunk to be imaged, allowing inferences about the presence and location of decay [9, 12]. Acoustic tomography can use either stress waves or ultrasonic waves, with stress waves being more common in commercial equipment [14, 15, 16, 17]. However, the main drawback of commercial tomography systems is their high

Academic Editor: Firstname Last-name

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date

Citation: To be added by editorial staff during production.

Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

cost, which limits their use by municipalities with constrained budgets and small service providers. As a result, research has been directed towards simplified technologies that aim to provide reliable results without compromising accuracy [18, 19, 20, 21].

It is important to note that, like any technology, tomography is an inference tool and not an exact diagnostic method [22]. Even commercial tomographs are subject to interference that can affect their ability to accurately detect defects [23, 24, 25]. Literature reports issues such as defect merging when they are closely spaced [26], inaccuracies in representing irregular defects [19, 25, 27], and the enlargement of defects in the presence of cracks [28, 29]. Improvements to these systems often require access to design details, which are typically unavailable in commercial devices due to proprietary technology. Advances can also be made through the development of new algorithms, including the application of machine learning techniques [25].

To guide technological improvements, objective evaluation metrics are essential. In imaging studies, evaluations often rely on visual comparisons between tomographic and real cross-sectional images of tree trunks [18, 23, 30, 31, 32, 33]. However, this approach does not allow for objective validation. The confusion matrix is a metric used to assess the performance of classification models and can also be applied to compare tomographic images with ground-truth images [16, 19, 20, 21, 29, 34].

For such evaluations, it is necessary to define the comparison region (internal points), create a model of the actual defect (model), and compare it with the defect representation generated by tomography (roi) [29]. The process involves pixel-wise comparison within the internal points between the “model” and the “roi”. Several metrics can be derived from this comparison depending on the analysis goal. The most common metrics are accuracy, precision, sensitivity and F_{score} . These metrics are calculated based on true and false positives and negatives. For example, in a binary classification—defective (e.g., cavity) vs. sound wood—if the image correctly identifies a cavity, it is a true positive (TP); if it identifies a cavity where there is none, it is a false positive (FP); correctly identifying sound wood is a true negative (TN), and missing a cavity is a false negative (FN). The metrics are defined as follows:

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

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$Fscore = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

For homogeneous, isotropic materials with low variability—such as metals—it is possible to use fixed reference values for wave propagation velocity to assess material integrity [35, 36, 37]. Deviations from this reference may indicate defects. In wood, however, a fixed velocity reference is less viable due to variability between species, within species, and even within the same tree, both longitudinally and radially [18, 38, 39, 40, 41]. One way to work around this is to use the wood sample itself as a reference. In studies

conducted by our research group, the maximum velocity (V_{max}) observed in the measurement grid is used as a reference to evaluate internal variation within the cross-section [18, 19, 20, 21].

In previous research [20] applying this methodology to a single species (*Cenostigma pluviosum*) it was found that the most accurate tomographic images for cavity detection were obtained when using velocity thresholds (VT) of up to 40% of V_{max} , and up to 45% of V_{max} for zones containing both cavities and associated decay.

The present study aimed to evaluate whether these same VT ranges could be applied to other tree species. The research followed the experimental design outlined in Figure 1. The results indicated that it is indeed possible to adopt uniform VT ranges across different species, with an average accuracy loss of no more than 5%. The most suitable thresholds were 35% of V_{max} for cavity detection and 50% of V_{max} for detecting cavities associated with decay.

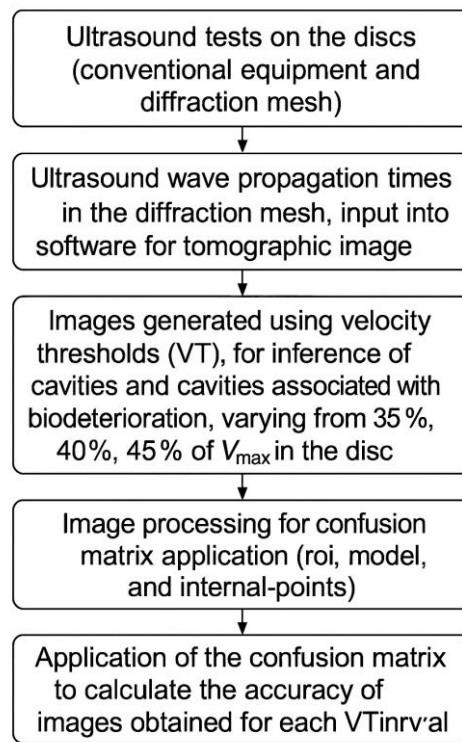


Figure 1. Experimental design

2. Materials and Methods

2.1. Sampling

The sample set consisted of 38 discs obtained from the trunks of 21 tree species, including 19 sound discs and 19 defective discs (Table 1). All trees were located on the campus of the State University of Campinas (UNICAMP), in the city of Campinas, Brazil, at coordinates 22°49'38"S, 47°04'04"W. The trees were cut down not only due to phytosanitary conditions but also for other reasons, such as construction works, installation of urban equipment, and hazardous surroundings, among others.

The apparent density (at 12% moisture content) of the species included in the sampling ranged from 450 kg/m³ to 1005 kg/m³ (Table 1). For the discs of the genus *Inga*, there were two different species, which presented different densities (Table 1).

Table 1. List of species with respective basic densities and details of sound and defective discs

Botanical classification of tree species		Basic Density (kg/m ³)	Discs	
Botanical family	Scientific name		Sound	Defective
Araucariaceae*	<i>Araucaria angustifolia</i>	550 ^c	0	2
Anacardiaceae	<i>Lithraea molleoides</i>	610 ^h	0	1
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i>	520 ^e	2	0
Bignoniaceae	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	600 ^f	6	2**
Bignoniaceae	<i>Sparattosperma leucanthum</i>	570 ^c	0	1
Fabaceae	<i>Amburana cearensis</i>	600 ^c	1	0
Fabaceae	<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i>	1005 ^c	0	3
Fabaceae	<i>Dalbergia nigra</i>	870 ^c	1	0
Fabaceae	<i>Delonix regia</i>	510 ^e	1	0
Fabaceae	<i>Entada abyssinica</i>	540 ^g	3	0
Fabaceae	<i>Inga laurina</i>	710 ^c	0	3
Fabaceae	<i>Inga vera</i> subsp. <i>affinis</i>	580 ^c	0	1
Fabaceae	<i>Machaerium villosum</i>	850 ^c	0	2
Fabaceae	<i>Poecilanthe parviflora</i>	990 ^c	1	0
Fabaceae	<i>Samanea tubulosa</i>	780 ^c	1	0
Lythraceae	<i>Lafoensia pacari</i>	800 ^c	0	1
Melastomataceae	<i>Pleroma mutabile</i>	660 ^c	0	1
Meliaceae	<i>Swietenia mahagoni</i>	590 ^a	1	0
Oleaceae	<i>Ligustrum lucidum</i>	560 ^b	0	1
Polygonaceae	<i>Triplaris americana</i>	450 ^d	0	1
Proteaceae	<i>Grevillea robusta</i>	560 ^a	2	0
Total			19	19

*Only species from the phylum Gymnospermae. All other species are Angiospermae.

**one of them with only decay (without cavity)

Sources:

a. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tdc-0512202464909/publico/Goncalves_Marcos_ME.pdf

b. <https://www.scielo.br/j/cflo/a/kcmxb64XHffMPnZnwxKS9tr/?format=pdf&lang=pt>

c. LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 6ª Edição, Nova Odessa: Plantarum, 2014. v. 1. 384 p.

d. <https://restor.eco/pt/platform/sites/ea86521e-558b-4b89-b140-af1d05d3c2e7/biodiversity/trees/?group=INVASIVE>

e. https://www.researchgate.net/publication/26437620_Caracterizacao_e_uso_de_madeiras_de_galhos_de_arvores_provenientes_da_arborizacao_de_Brasilia_DF

f. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/313733/1/EmbrapaFlorestas-2006-EstoqueIncrementoCarbonoFlorestas.pdf>

g. <https://restor.eco/pt/platform/sites/13831d32-d1c0-40f7-abe4-ed23d3d273f7/biodiversity/trees/>

h. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr108/cap18.pdf>

2.2. Methodology

2.2.1. Tests

The perimeter (P) of the discs was measured to determine the number of measurement points in the diffraction mesh (Figure 2). The number of measurement points (n) was calculated using Equation 4 proposed by [19]. Based on Equation 4, the number of points in the diffraction mesh ranged from 8 to 12 (Table 2).

$$n = 5 P \quad (4)$$

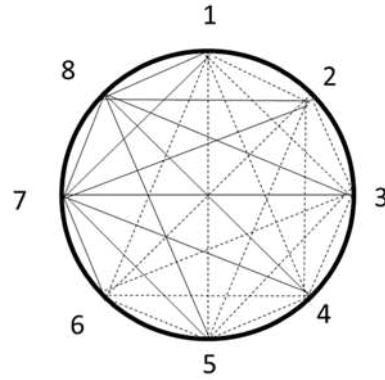


Figure 2. Example of diffraction mesh with 8 measurement points, 28 theoretical wave propagations routes.

Table 2. Data of the discs by species

Scientific names	Disc ID	Largest diameter (m)	Number of diffraction mesh points
<i>Araucaria angustifolia</i>	652PS	0,37	8
	652PI	0,38	8
<i>Lithraea molleoides</i>	633	0,44	8
<i>Mangifera indica</i>	595	0,33	8
	MSN2024	0,64	10
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	654	0,25	8
	666	0,43	8
	667	0,35	8
	668	0,68	10
	669	0,59	10
	670	0,55	8
	671	0,46	8
	672	0,38	8
<i>Sparattosperma leucanthum</i>	CB1	0,77	10
<i>Amburana cearensis</i>	668	0,41	8
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i>	701CF	0,39	8
	701CA	0,41	8
	702	0,34	8
<i>Dalbergia nigra</i>	656	0,44	8
<i>Delonix regia</i>	682	0,47	8
<i>Entada abyssinica</i>	678	0,38	8
	678SN	0,38	8
	679	0,35	8
<i>Inga laurina</i>	IP4T1	0,46	12
	IP4B	0,76	8
	IP4T1L	0,41	8
<i>Inga vera</i> subsp. <i>affinis</i>	657B	0,70	10
<i>Machaerium villosum</i>	688P1	0,37	8
	688P2	0,36	8
<i>Poecilanthe parviflora</i>	636	0,41	8
<i>Samanea tubulosa</i>	653	0,39	8
<i>Lafoensia pacari</i>	723	0,36	8
<i>Pleroma mutabile</i>	586	0,38	8
<i>Swietenia mahagoni</i>	572	0,44	8
<i>Ligustrum lucidum</i>	582	0,46	8
<i>Triplaris americana</i>	593	0,36	8
<i>Grevillea robusta</i>	607	0,32	8
	608	0,28	8

2.2.2. Tomographic Images

To generate tomographic images, a software developed by the research group (GPEND) called ImageWood 3.1 was used. To process the data, the program requires two input spreadsheets: one containing the coordinates of the measurement points in the diffraction mesh, and the other containing the coordinates of the initial and final points of the theoretical wave propagation paths, along with the corresponding wave propagation times for each path. Based on these spreadsheets, the software calculates the wave velocities along the theoretical paths and estimates velocities outside these paths using data interpolation, following the model proposed by [42].

To construct the images, it is necessary to insert velocity thresholds (VT) ranges associated with specific colors. Since there are no absolute velocity thresholds that reliably indicate sound wood, the VT intervals were defined as a percentage of the maximum velocity (V_{max}) obtained for each disc itself. In this study, only two VT intervals were used: the lower interval was associated with red, and the higher interval with yellow.

Considering that the aim of this study was to determine the VT interval that provides the best accuracy for inferring cavities or cavities associated with decay, images were generated using different VT intervals, based on the ranges proposed by previous research [20] — up to 40% V_{max} for cavity detection, and up to 45% V_{max} for cavities associated with decay. To identify the best range, four images were produced for each disc using VT intervals of up to 35%, 40%, 45%, and 50% of V_{max} , resulting in a total of 152 images (38 discs $\times$ 4 images each).

2.2.3 Confusion Matrix

In this study, a confusion matrix was used as a method to assess how accurately the tomographic images represented the actual condition of each disc, using accuracy (Equation 1) as the performance metric.

In this context, the target defects were cavities or cavities associated with decay. Thus, pixels representing these defects were considered positives, while pixels corresponding to sound wood were considered negatives.

Before applying the confusion matrix to compare the images, a series of preprocessing steps was necessary, as described in the following subsections.

2.2.3.1 Scale Adjustment

To ensure that the confusion matrix could be properly applied, all images had to be scaled to the same pixel dimensions. This adjustment was performed using the open-source software ImageJ.

2.2.3.2 Model, ROI, and Internal Points Parameters

To compare the pixels between the real disc images and the tomographic images, each disc face was polished using sandpapers of different grits. The polished faces were then photographed, and regions with cavities and decay were outlined in the images.

For each disc, a region of interest was defined for pixel comparison, referred to as “internal-points” (Figure 3a). From the real image of the disc (Figure 3b), the target defect region was extracted and referred to as the “model” (Figure 3c), representing the actual defect to be inferred. From each tomographic image (Figure 3d), the corresponding inferred defect region was extracted and referred to as the “roi” (Figure 3e).

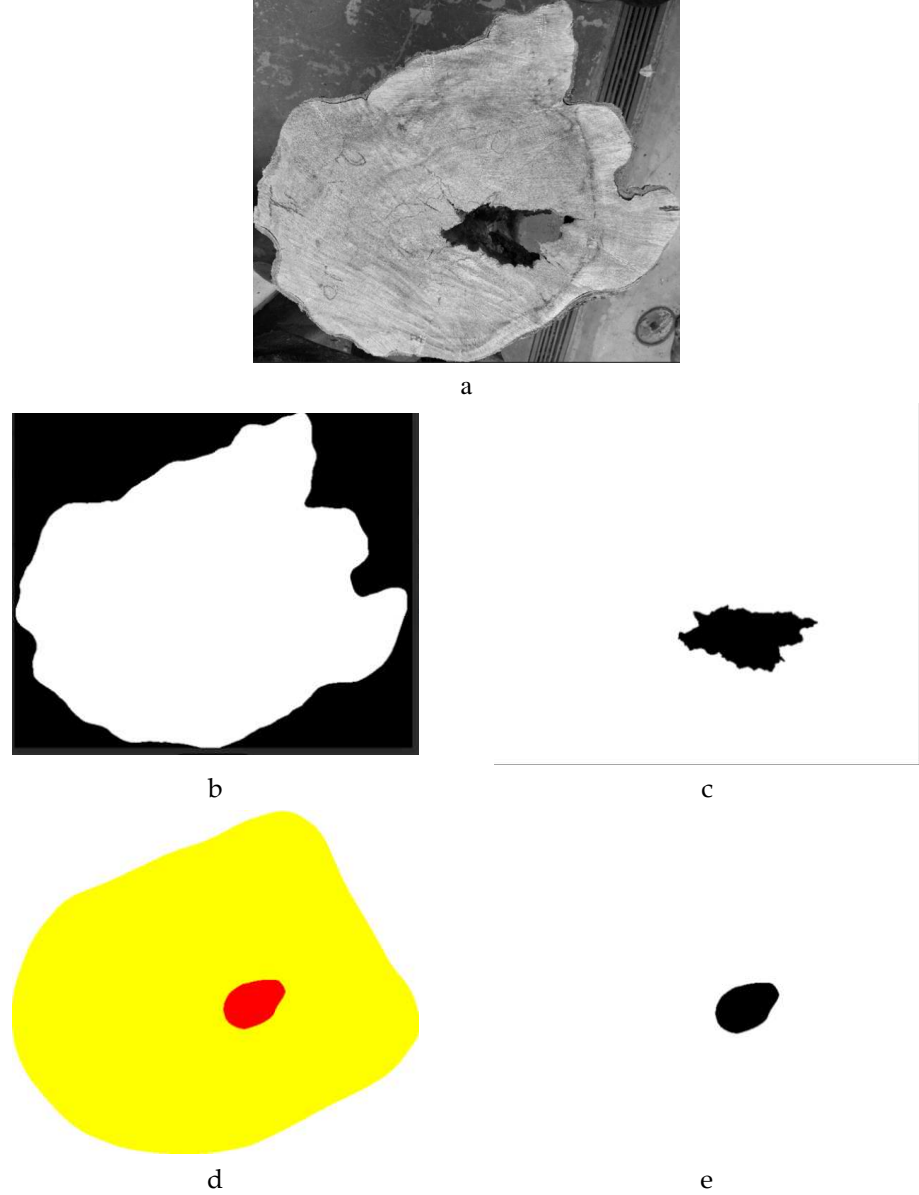


Figure 3. Example of parameters used in the confusion matrix. Real image of the disc (a), defined comparison area (b) – “internal-points”, model of the target defect (c) – “model”, and defect area inferred from the tomographic image (d) – “roi”.

2.2.3.3 Accuracy Calculation

After preparing the images and defining the confusion matrix parameters (internal-points, model and roi), automated image comparison and accuracy calculation (Equation 1) were performed using a script proposed by [29].

2.2.4 Evaluation of Results

Table 2. Accuracy of tomographic images in the inference of cavities, obtained with different velocity thresholds based on the maximum velocity (Vmax) in the disc.

Scientific names	Discs ID	Accuracy (%)			
		35% Vmax	40% Vmax	45% Vmax	50% Vmax
<i>Araucaria angustifolia</i>	652PS	71	72	67	64
	652PI	88	89	83	78
<i>Lithraea molleoides</i>	633	73	68	63	59
<i>Mangifera indica</i>	595	100	100	100	100
	MSN2024	100	100	100	100
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	654	100	100	100	100
	666*	100	100	100	100
	667	100	100	100	100
	668	82	49	28	15
	669	100	100	100	100
	670	100	100	100	100
	671	100	100	100	100
	672	100	100	100	100
<i>Sparattosperma leucanthum</i>	CB1	85	88	85	73
<i>Amburana cearensis</i>	668	100	100	100	100
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i>	701CF	83	81	79	75
	701CA	83	81	78	75
	702	93	86	79	72
<i>Dalbergia nigra</i>	656	100	100	100	100
<i>Delonix regia</i>	682	100	100	100	100
<i>Entada abyssinica</i>	678	100	100	100	100
	678SN	100	100	100	100
	679	100	100	100	100
<i>Inga laurina</i>	IP4T1	81	80	69	52
	IP4B	95	93	87	79
	IP4T1L	92	83	67	57
<i>Inga vera</i> subsp. <i>affinis</i>	657B	94	91	89	83
<i>Machaerium villosum</i>	688P1	88	83	73	66
	688P2	83	79	71	68
<i>Poecilanthe parviflora</i>	636	100	100	100	100
<i>Samanea tubulosa</i>	653	100	100	100	100
<i>Lafoensia pacari</i>	723	83	76	70	68
<i>Pleroma mutabile</i>	586	72	66	54	42
<i>Swietenia mahagoni</i>	572	100	100	100	100
<i>Ligustrum lucidum</i>	582	71	72	67	64
<i>Triplaris americana</i>	593	96	95	92	88
<i>Grevillea robusta</i>	607	100	100	100	100
	608	100	100	100	100

Table 3. Accuracy of tomographic images in the inference of cavities+decay, obtained with different velocity thresholds based on the maximum velocity (Vmax) in the disc.

Scientific names	Discs ID	Acuracy (%)			
		35% Vmax	40% Vmax	45% Vmax	50% Vmax
<i>Araucaria angustifolia</i>	652PS	50	52	54	56
	652PI	31	36	45	54
<i>Lithraea molleoides</i>	633	50	58	64	65
<i>Mangifera indica</i>	595	100	100	100	100
	MSN2024	100	100	100	100
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	654	100	100	100	100
	666	0	35	37	44
	667	100	100	100	100
	668	28	59	78	86
	669	100	100	100	100
	670	100	100	100	100
	671	100	100	100	100
	672	100	100	100	100
<i>Sparattosperma leucanthum</i>	CB1	78	84	84	78
<i>Amburana cearensis</i>	668	100	100	100	100
<i>Anadenanthera colubrina var. cebil</i>	701CF	56	58	61	59
	701CA	70	71	73	75
	702	77	73	68	63
<i>Dalbergia nigra</i>	656	100	100	100	100
<i>Delonix regia</i>	682	100	100	100	100
<i>Entada abyssinica</i>	678	100	100	100	100
	678SN	100	100	100	100
	679	100	100	100	100
	IP4T1L	66	70	71	71
<i>Inga laurina</i>	IP4T1	56	56	55	48
	IP4B	60	63	66	71
<i>Inga vera subsp. affinis</i>	657B	81	80	80	76
<i>Machaerium villosum</i>	688P1	75	80	83	83
	688P2	61	61	58	57
<i>Poecilanthe parviflora</i>	636	100	100	100	100
<i>Samanea tubulosa</i>	653	100	100	100	100
<i>Lafoensia pacari</i>	723	74	69	65	64
<i>Pleroma mutabile</i>	586	40	48	58	67
<i>Swietenia mahagoni</i>	572	100	100	100	100
<i>Ligustrum lucidum</i>	582	73	75	72	72
<i>Triplaris americana</i>	593	49	48	45	43
<i>Grevillea robusta</i>	607	100	100	100	100
	608	100	100	100	100

4. Discussion

For 100% of the disks with no visible defects, it was observed that for all species (10 species presenting this condition) and for all studied percentages of maximum velocity (35%, 40%, 45%, and 50%), the tomographic image always displayed a single color (yellow). Thus, the red color—representative of zones with cavities and/or deterioration—did not appear in the image, indicating that the condition of the disc was accurately represented (Example in Figure 5). For the confusion matrix, since there was only a true negative (TN) condition, accuracy was 100% (Tables 2 and 3). Given that this behavior was repeated for 19 disks from 10 different species, we conclude that the methodology is adequate for inferring intact wood conditions, without generating false positives.

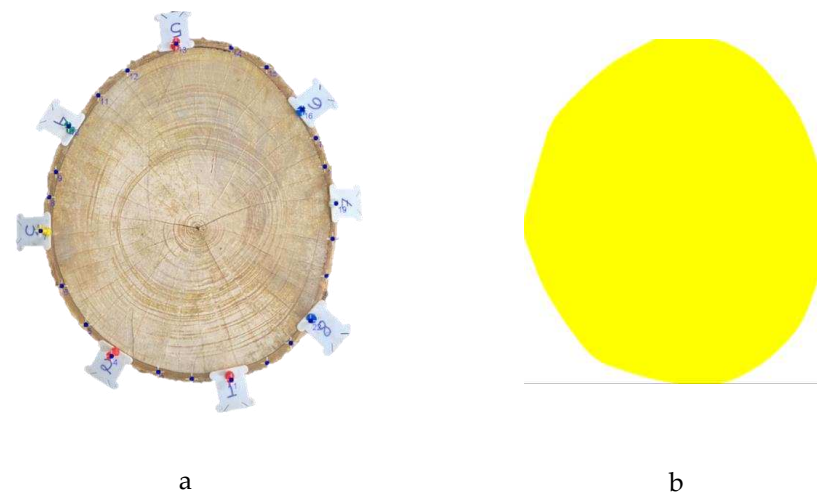


Figure 5. Example of a tomographic image (b) generated from a disk with no visible defect (clean wood) (a). Species: *Mangifera indica* (595)

The two disks, both from the genus *Inga*, which presented isolated cavities (IP4B and 657B), were the ones with the highest accuracies in cavity detection—95% and 94%, respectively—both achieved with a VT interval of 35% V_{max} (Table 3). For the species *Cenostigma pluviosum*, the best accuracy with a 40% V_{max} interval [9]. However, it is noteworthy that with 40% V_{max} , the accuracies were also high (>90%), with a small decrease of 2.6% compared to 35% V_{max} . Increasing the percentage of V_{max} used as a reference to infer cavities results in more false positives, as the range of VR assumed to indicate cavities is expanded. Thus, if there is any degree of decay around the cavity that lowers the velocity, that region may be interpreted as a cavity in the image, increasing its size (Figure 6). On the other hand, for *Cenostigma pluviosum*, using 35% V_{max} instead of 40% could lead to more false negatives, reducing the cavity's size in the image.

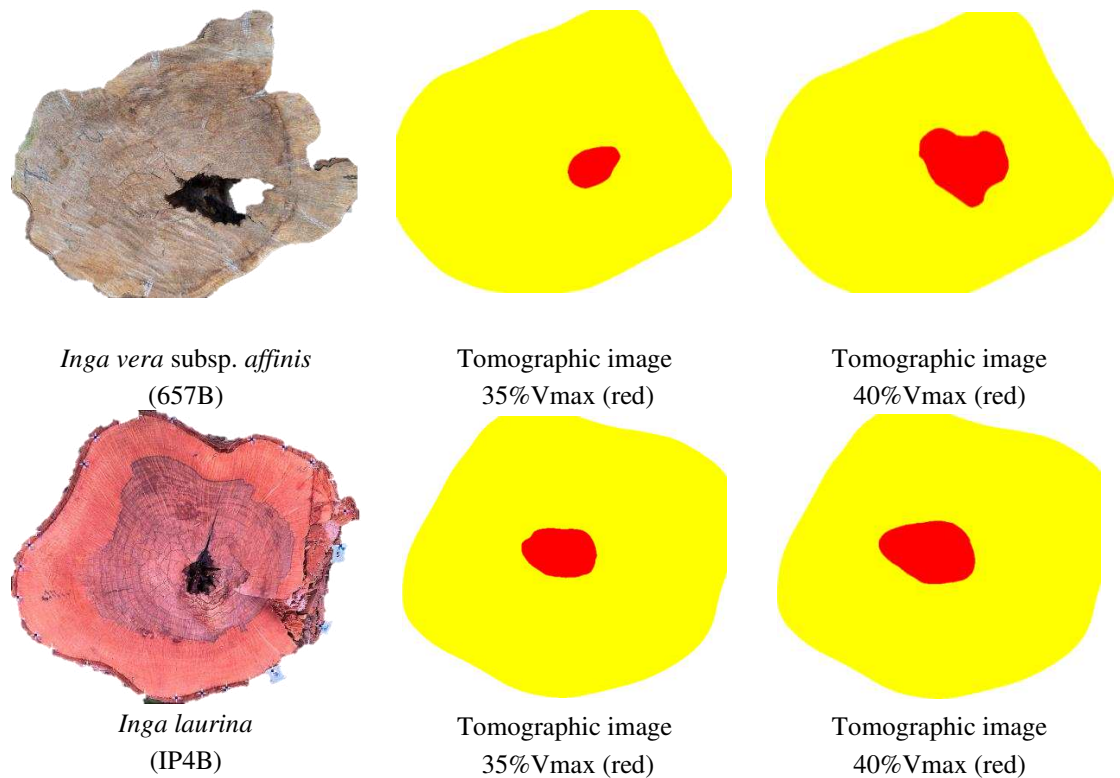


Figure 6. Disks from *Inga* species with their respective tomographic images constructed using velocity threshold (VT) intervals of 35% and 40% of the maximum velocity (Vmax) in the disk for cavity identification (red zone).

For disks with a mixed condition of cavities and decay (most of the sample), the average of the best accuracies in cavity detection was 84.3%. The VT intervals with the best accuracies ranged between up to 35% Vmax (78% of disks) and up to 40% Vmax (22% of disks) across species. The best accuracy for *Cenostigma pluviosum* was 40% Vmax [20]. However, considering all species studied in the present research, accuracy variation between the two VT intervals (35% and 40% Vmax) was small. Therefore, adopting the interval with the highest number of disks showing the best accuracy (up to 35% Vmax) results in an average accuracy of 84%, only 0.36% lower. Using the interval found by [20] (up to 40% Vmax) for all species would yield an average accuracy of 79.6%, a loss of 4.7%. This indicates that it is possible to adopt a single VT interval for all species without significant loss of accuracy in images for cavity detection, with 35% Vmax being the most suitable.

When the process involves inferring zones with cavities associated with decay, complexity increases, making it harder to accurately represent these areas using tomography [20, 30]. In this case, the average of the best accuracies drops from 84.3% (cavity detection) to 68% (cavities with decay). Furthermore, the best VT interval is spread across all tested intervals, with 16% of disks in each, except for the 50% Vmax interval, which accounted for 53% of disks. The variation in accuracy among VT intervals is greater than for cavity-only inference (Table 3). However, for the last two intervals (45% and 50% Vmax), these differences are smaller. Therefore, adopting the VT interval with the highest number of best results (up to 50% Vmax) leads to an average accuracy of 65%, a loss of 4.6%. Previous research obtained the best accuracy for *Cenostigma pluviosum* was 45% Vmax [20]. Using this same interval for the present dataset results in an average accuracy of 64%, a 6% loss.

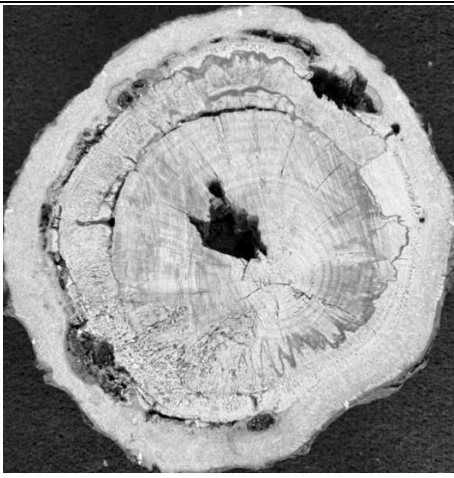
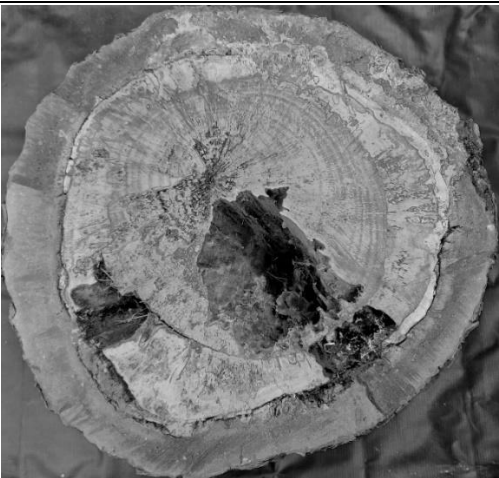
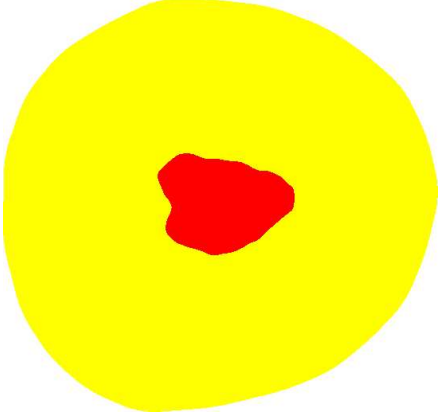
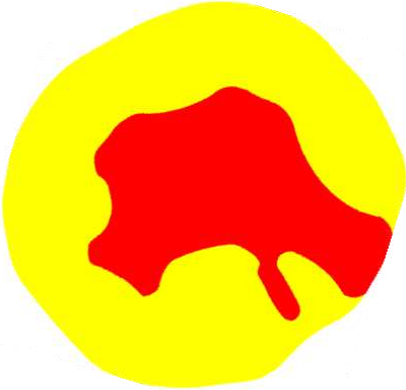
Hence, just as with cavity inference, adopting a single VT interval is feasible for constructing images to infer areas affected by cavities associated with decay.

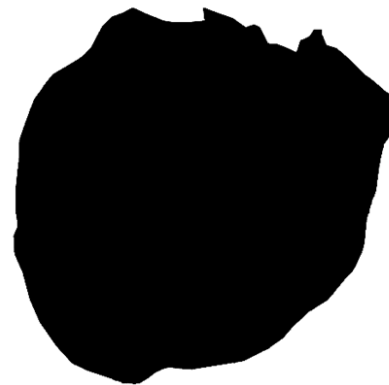
Considering the 20 species included in the sample and the 35% Vmax VT interval, the lowest accuracy for cavity detection was 71%, obtained for the only Gymnosperm (*Araucaria angustifolia*, disk 652PS) and for *Ligustrum lucidum* (Table 2). However, for this same species (*Araucaria angustifolia*), the second disk (652PI) reached an accuracy of 88%, indicating that detection performance seems unrelated to species or family. For these two disks, accuracies for detecting zones with cavities and decay were similar—56% and 54%, respectively (Table 3). A more detailed inspection reveals that disk 652PS has three separate cavities and cracks formed along growth rings, encircling the disk. Disk 652PI has two adjacent cavities and one isolated, still within the sapwood. It's important to note that cracks or cavities may not be interpreted as cavities if they do not penetrate through the disk [28]. Therefore, depending on the inspection point relative to the defect depth, the ultrasonic wave may or may not reach it, affecting velocity reduction and thus detection. This results in a discrepancy between the “roi” in the tomographic image and the “model” identified in the actual image (Table 4).

Regarding decay, both disks were considered almost entirely affected, as reflected in the “model” for both. However, the tomographic image minimized the deteriorated area, showing it only in the sapwood (Table 4).

Disk 666 from *Jacaranda mimosifolia* had the lowest accuracy (44%) for detecting cavities associated with decay (Table 3). Closer examination reveals that this disk has no cavities but was considered completely biodeteriorated in the “model” (Table 5). However, the deterioration was more advanced only in the central region of the disk and was not detected by tomography in the outer areas, where deterioration was still in its early stages (Table 5).

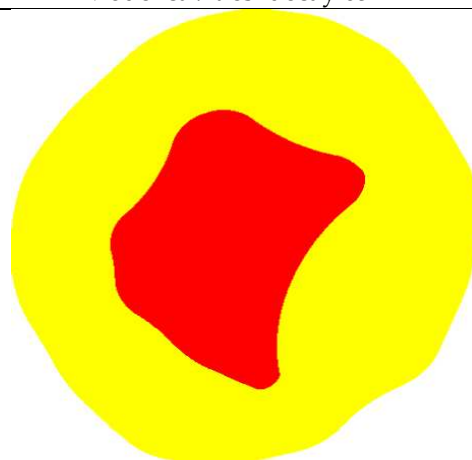
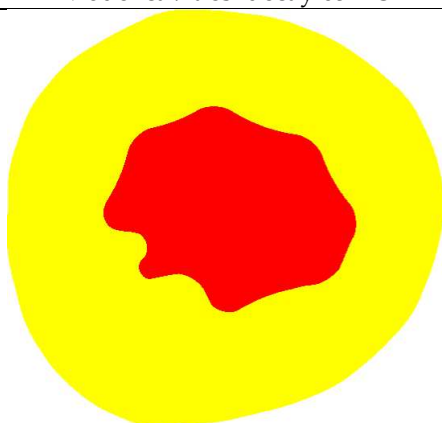
Table 4. Images of the cross-sections of the two *Araucaria angustifolia* disks with respective models of cavities and decay and generated tomographic images.

	
Disc 652PS	Disc 652PI
	
Model cavities 652PS	Model cavities 652PI
	
Tomographic image cavities 652PS	Tomographic image cavities 652PI



Model cavities+decay 652PS

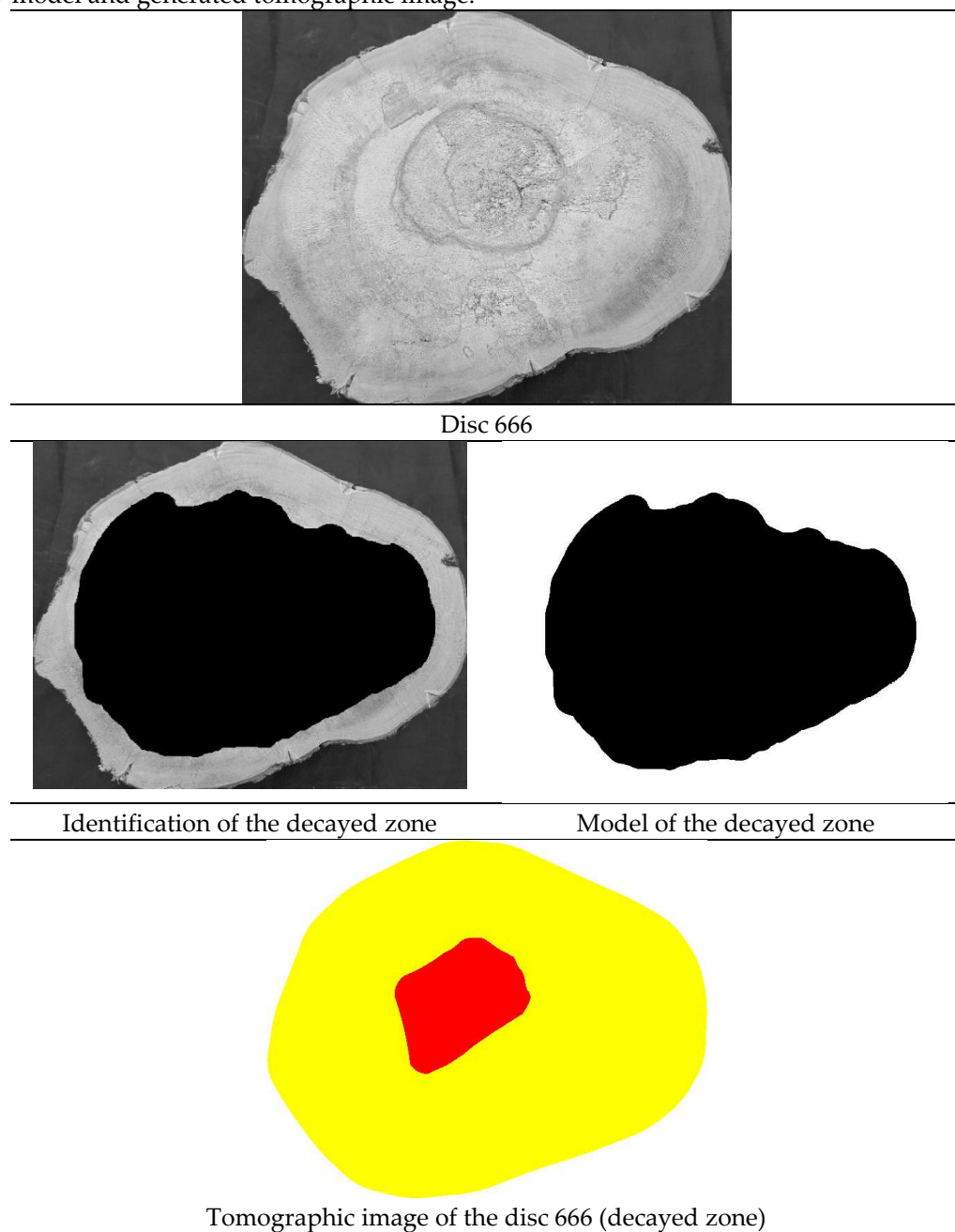
Model cavities+decay 652PI



Tomographic image - cavities+decay
652PS

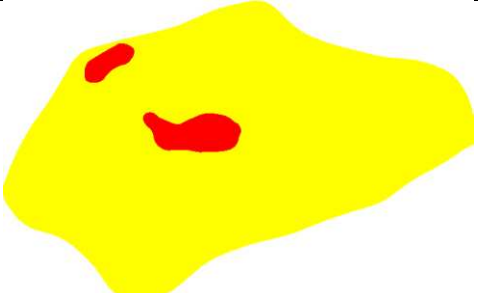
Tomographic image - cavities+decay
652PI

Table 5. Image of the cross-section of the *Jacaranda mimosifolia* disk with its respective decay model and generated tomographic image.



The size of the defect is one of the most influential factors in the results obtained through acoustic tomography in wood [17, 43, 44]. Large cavities surrounded by sound wood are easier to detect using this technique, as demonstrated in this study for the *Inga* species (disks IP4B and 657B), which showed the highest accuracies (95% and 94%) in cavity detection. In the case of this research, even when surrounded by biodeteriorated wood—as in the species *Sparattosperma leucanthum* (disk CB1)—accuracies of 85% for cavity inference (Table 2) and 78% for inference of cavities associated with decay (Table 3) were obtained using the VT intervals of 35% V_{max} and 50% V_{max} , respectively, adopted for all species in tomographic image construction. Within this research sample, this disk had the highest proportion of cavity (Table 6).

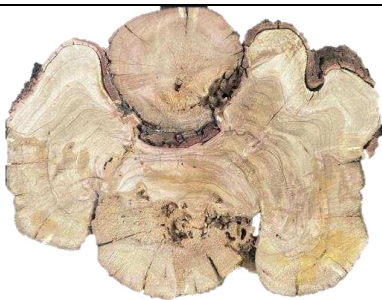
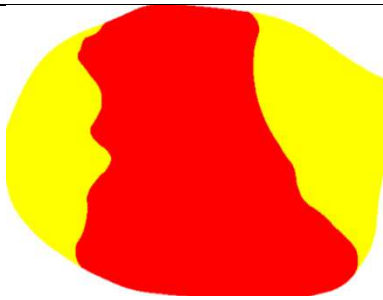
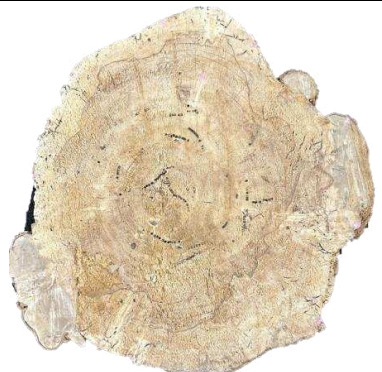
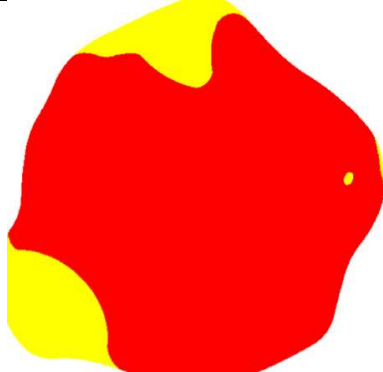
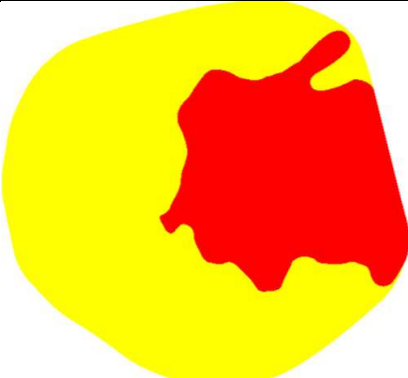
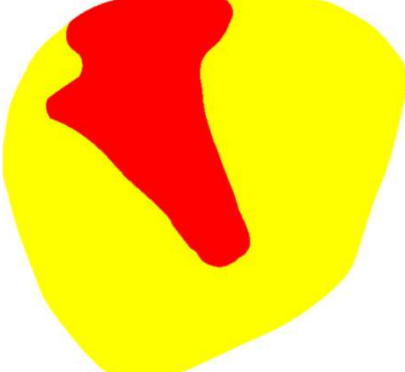
Table 6. Image of the *Sparattosperma leucanthum* disk face with its respective decayed model and generated tomographic image.

	
Disc CB	
	
Model of the cavity zones	Model of the decayed zones
	
Tomographic images (cavities)	Tomographic images (cavities+decay)

Although the dimensions and positioning are not exact, in general, when visually analyzing the images (Examples in Table 7), it is possible to confirm—regardless of species and defect type—the feasibility of inferring zones with cavities and decay using the methodology and VT intervals adopted in this study.

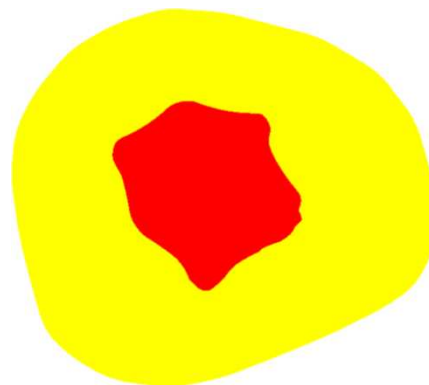
By separately using the VT intervals to build images representative of cavities and of decay, it is also possible to isolate these defects within the same image (Example in the figures of Table 8). However, this procedure was not the aim of the present study, considering the binary nature of the confusion matrix analysis.

Table 7. Visual comparison between disk condition and tomographic images showing zones with cavities + decay, for different disks included in the study sample.

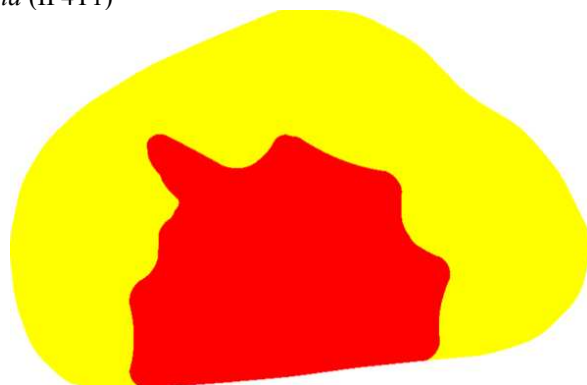
Actual image of the disc	Tomographic image
	
<i>Pleroma mutabile</i> (586)	
	
<i>Jacaranda mimosifolia</i> (668)	
	
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (701CA)	
	
<i>Lafoensia pacari</i> (723)	



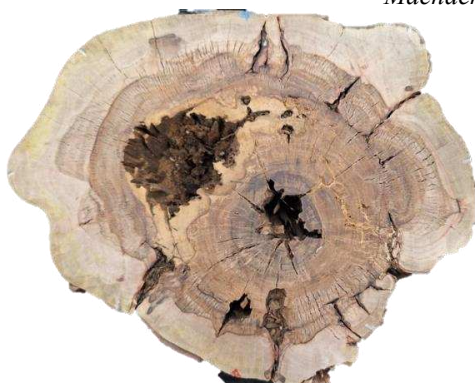
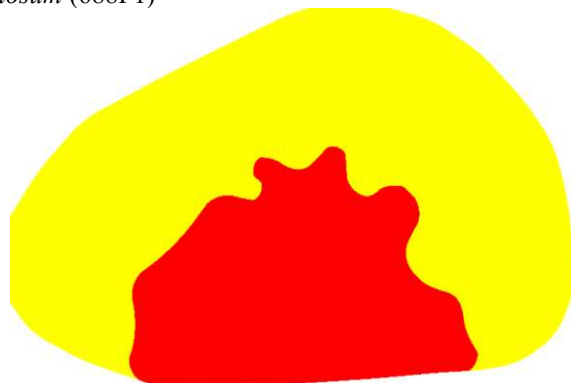
Inga laurina (IP4T1)



Machaerium villosum (688P1)



Machaerium villosum (688P2)



Lithraea molleoides (633)

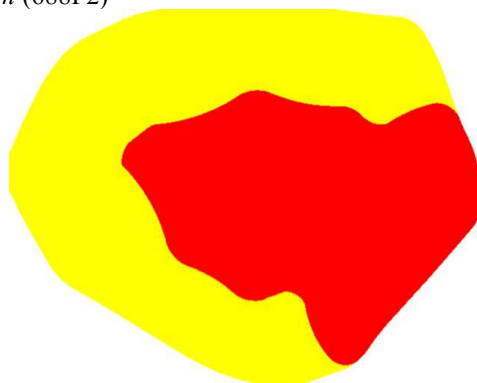
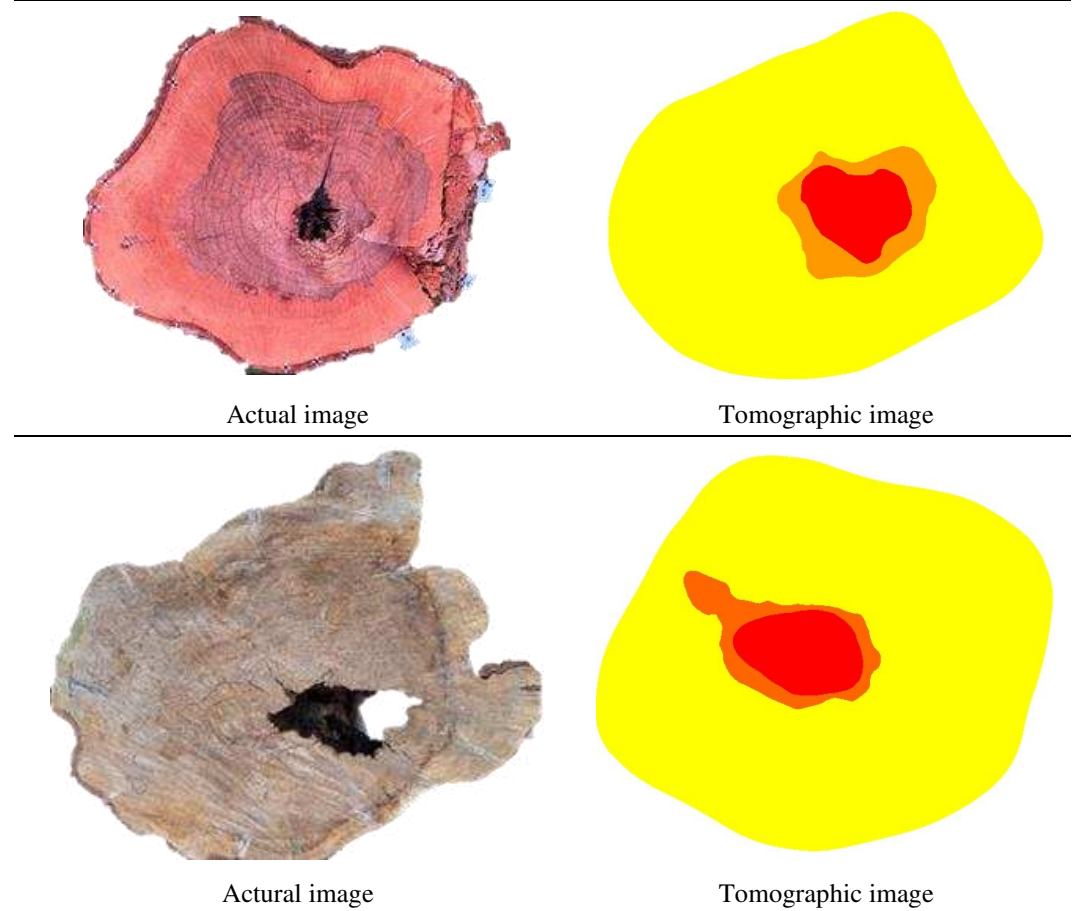


Table 8. Example of images produced with two colors, showing the inference of zones with cavities and with decay.
Legend: red = cavity; orange = cavity + decay.



Danielli [43] proposed a classification of apparent wood density into three categories: low density (less than 550 kg/m³), medium density (551–720 kg/m³), and high density (greater than 721 kg/m³). Using this classification, among the 19 disks that contained decay with or without cavities, only one disk was classified as low density (5.3%); twelve were classified as medium density (63.2%); and six as high density (31.5%)—Table 1.

An ANOVA statistical analysis indicated that, statistically, the density class of the species did not affect the maximum accuracy (dependent variable)—Figure 7. Numerically, the average maximum accuracy was higher for the high-density class (70.2%) than for the medium-density class (67.5%). Density class 1 (low) could not be included in the statistical analysis due to insufficient sample size, but numerically, it showed the lowest accuracy (49%).

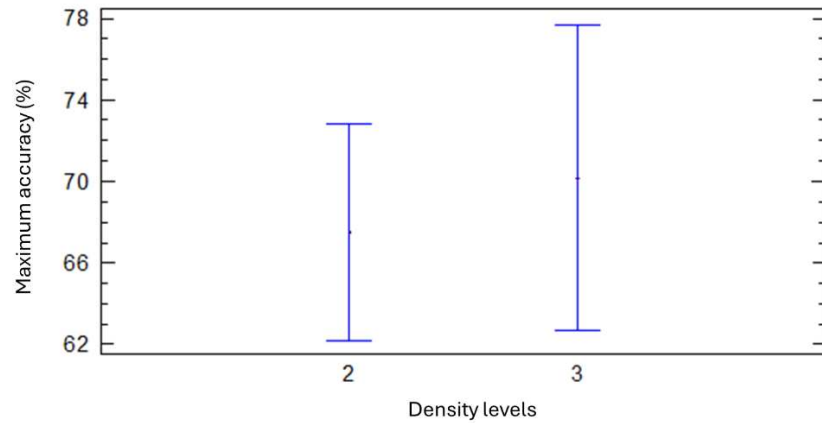


Figure 7. Mean and confidence interval of accuracy percentages for two density levels (2 = medium, 3 = high).

Considering the VT interval (in % V_{max}), there was also no influence from the density class. The maximum accuracy values were obtained with threshold velocities between approximately 40% and 50% of the maximum velocity – Figure 8.

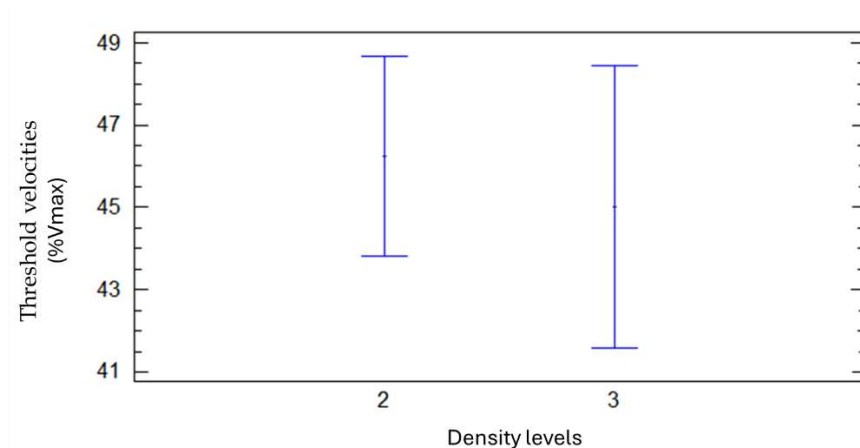


Figure 8. Mean and confidence interval of threshold velocity percentages (relative to V_{max}) for two density levels (2 = medium, 3 = high).

5. Conclusions

- When the trunk is clean or with early-stage decay, the tomographic image generated using the proposed methodology accurately reflects this condition, showing no signs of deterioration regardless of the velocity thresholds interval adopted (35% to 50% of the maximum velocity). In this case the accuracy was 100%.
- For disks with isolated cavities (surrounded by clear wood or wood with early-stage decay), the velocity thresholds intervals up to 35% V_{max} show accuracy greater than 94%.
- For disks with cavities associated with decay, the velocity thresholds intervals up to 35% V_{max} can be adopted, independent of the species, to infer the cavity zone with good accuracy (84% on average). To infer the decayed zone the velocity threshold

intervals up to 50%, also independent of the species allow moderate accuracy (65% on average).

6. Patents

The necessary documentation for the patent application of the image generation software (ImageWood) is being prepared.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, R.G. and S.S.A.P.; investigation, L.T.V.; formal analysis: L.T.V. and S.S.A.P; data curation, L.T.V and R.G.; writing—original draft preparation, R.G.; writing—review and editing, R.G., S.S.A.P and L.T.V.; supervision, R.G.; project administration, R.G.; funding acquisition, R.G.

Funding: This research was funded by FAPESP (São Paulo Research Foundation), grant number 2023/03111-0 and CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education)—Finance Code 001 (scholarship).

Data Availability Statement: The data supporting reported results can be found, including links to publicly archived datasets generated during the study, at the University repository (available after the paper is approved).

Acknowledgments: The authors would like to thank the Environmental Division of University of Campinas (Unicamp) for providing the material (trees) used in this study; the Research Group on Non-Destructive Testing (GPEND) for their support during the testing procedures; and the School of Agricultural Engineering (FEAGRI) for providing the infrastructure.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest

References

1. U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. Draft. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
2. Alves, Patricia Layne. Capacidade de interceptação pelas árvores e suas influências no escoamento superficial urbano (Tree interception capacity and its influence on urban surface runoff). Ph.D. Thesis, Federal University of Goiás, 2015.
3. Chakraborty, T., Biswas, T., Campbell, L. S., Franklin, B., Parker, S. S., & Tukman, M. (2022). Feasibility of afforestation as an equitable nature-based solution in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103826. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103826>.
4. Jones, B. A. (2021). Planting urban trees to improve quality of life? The life satisfaction impacts of urban afforestation. *Forest Policy and Economics*, 125, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102408>.
5. Wolf, Kathleen L., Lam, Sharon T., McKeen, Jennifer K., Richardson, Gregory R.A., Bosch, Matilda van den, Bardekjian, Adrina C. (2020). Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research* 17(12):4371
6. Srivanit, M., & Kaewkhaw, S. (2024). A machine learning-based protocol to support visual tree assessment and risk of failure classification on a university campus. *Urban Forestry & Urban Greening*, 99, 128420. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128420>.
7. Hui, K. K. W., Wong, M. S., Kwok, C. Y. T., Li, H., Abbas, S., & Nichol, J. E. (2022). Unveiling falling urban trees before and during Typhoon Higos (2020): Empirical case study of potential structural failure using tilt sensor. *Forests*, 13(2), 359. <https://doi.org/10.3390/f13020359>.
8. Judice, A., Gordon, J., Abrams, J., & Irwin, K. (2021). Community perceptions of tree risk and management. *Land*, 10(10), 1096. <https://doi.org/10.3390/land10101096>.
9. Soge, A. O., Popoola, O. I., & Adetoyinbo, A. A. (2021). Detection of wood decay and cavities in living trees: A review. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 937-947. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340>.

10. Li, H., Zhang, X., Li, Z., Wen, J., & Tan, X. (2022). A review of research on tree risk assessment methods. *Forests*, 13(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>.
11. Coelho-Duarte, A. P., Daniluk-Mosquera, G., Gravina, V., Vallejos-Barra, Ó., & Ponce-Donoso, M. (2021). Tree risk assessment: Component analysis of six visual methods applied in an urban park, Montevideo, Uruguay. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 127005. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127005>.
12. Linhares, C. S., Gonçalves, R., Martins, L. M., & Knapic, S. (2021). Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A review. *Forests*, 12(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/f12121752>.
13. Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Hansen, G., & Escobedo, F. J. (2019). Risk assessment and risk perception of trees: A review of literature relating to arboriculture and urban forestry. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 45(1), 26-38. <https://doi.org/10.48044/jauf.2019.003>.
14. Nicolotti G, Socco LV, Martinis R, Godio A, Sambuelli L (2003) Application and comparison of three tomographic techniques for the detection of decay in trees. *J Arboric* 29:66–78. <https://doi.org/10.48044/jauf.2003.009>
15. Wang X, Allison RB (2008) Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboric Urban for* 34:1–4. <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.001>
16. Wang X, Wiedenbeck J, Liang S (2009) Acoustic tomography for decay detection in black cherry trees. *Wood Fiber Sci* 41(2):127–137
17. Cardenas-Rengifo, G. P.; Baselly-Villanueva, J.R.; Chumbimune-Vivanco, S.Y.; Macedo-Ramírez, A.T.; Salazar E.; Minaya, B.; Quintana, S.; Cabudivo, A., Palma, S. S. A., Álvarez-Álvarez, P; et al. Uso de tomografía acústica para modelar a deterioração da madeira em *Cedrelinga cateniformis* Ducke na Amazônia peruana (Use of acoustic tomography to model wood deterioration in *Cedrelinga cateniformis* Ducke in the Peruvian Amazon) .*Florestas*. 2024; 15(5):778. <https://doi.org/10.3390/f15050778>
18. Palma, S.S.A.; Gonçalves, R.; Trinca, A.J.; Costa, C.P.; Reis, M.N.; Martins, G. A. (2018). Interference from knots, wave propagation Direction and effect of juvenile and reaction wood on velocities in ultrasound tomography. *BioResources*, 13(2), 2834-2845.
19. Palma, S. S. A.; Gonçalves, R. (2022) Tomographic images of tree trunks generated using ultrasound and post-processed images: Influence of the number of measurement points. *BioResources* 17: 6638-6655
20. Palma, S. S. A.; Reis, M. N.; Gonçalves, R. Tomographic Images Generated from Measurements in Standing Trees Using Ultrasound and Postprocessed Images: Methodological Proposals for Cutting Velocity, Interpolation Algorithm and Confusion Matrix Metrics Focusing on Image Quality. *Forests* 2022, 13, 1935. <https://doi.org/10.3390/f13111935>
21. Reis, M.N.; Gonçalves, R.; Brazolin, S.; Palma, S.S.A. (2022). Strength loss inference due to decay or cavities in tree trunks using tomographic imaging data applied to equations proposed in the literature. *Forests*, 13, 596.
22. Wang, Xiping et al. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. USDA FS Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-147. US Dept. of Agriculture Forest Service. Washington, 2004.
23. Burcham, D.C.; Braze, N.J.; Marra; R.E.; Kane, B. Geometry matters for sonic tomography of trees. *Trees* 37, 837–848 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02387-4>
24. Wei, X.; Xu, S.; Sun, L.; Tian, C.; Du, C. Propagation velocity model and two-dimensional defect imaging of stress wave in Larch (*Larix gmelinii*) wood. *Bioresources* 2021, 16(4), 6799-6813. DOI: 10.15376/biores.16.4.6799-6813
25. Yıldızcan, E.N.; Ari, M.E.; Tunga, B.; Gelir, A.; Kurul, F.; As, N.; Dündar, T. 2024. Machine learning based tomographic image reconstruction technique to detect hollows in wood. *Wood Science and Technology* 58: 1491-1516.
26. Ostrovský, R., Kobza, M. and Gažo, J. (2017). “Extensively damaged trees tested with acoustic tomography considering tree stability in urban greenery,” *Trees* 31, 1015–1023 (2017). DOI: 10.1007/s00468-017-1526-6
27. Vieira-dos-Santos-Ataide, G. C., dos-Santos-Ataide, D. H., Cerqueira-Martins, B., Monteiro-de-Carvalho, A., & de-Figueiredo-Latorraca, J. V. (2023). Historic urban trees: Assessing the trunk’s internal integrity. *Bosque*, 44(3), 481-491. DOI: 10.4067/s0717-92002023000200481
28. Feng, H., Li, G., Fu, S., and Wang, X. (2014). “Tomographic image reconstruction using an interpolation method for tree decay detection,” *BioResources* 9(2), 3248-3263. DOI: 10.15376/biores.9.2.3248-3263
29. Strobel J R A, Carvalho M A G, Gonçalves R, Pedroso C B, Reis M N, and Martins P (2018). “Quantitative image analysis of acoustic tomography in woods,” *European Journal of Wood and Wood Products* 76:1379-1389. DOI: 10.1007/s00107-018-1323-y

30. Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2020). Quantitative parametric imaging by ultrasound computed tomography of trees under anisotropic conditions: Numerical case study. *Ultrasonics*, 102, 106060. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.106060
31. Wu, X., Li, G., Jiao, Z., & Wang, X. (2018). Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. *Applications in Plant Sciences*, 6(10), e01187. DOI: 10.1002/aps3.1187
32. Dudkiewicz, M., & Durlak, W. (2021). Sonic Tomograph as a tool supporting the sustainable management of historical greenery of the UMCS Botanical Garden in Lublin. *Sustainability*, 13(16), 9451. DOI: 10.3390/su13169451
33. Michajlová, K., Gejdoš, M., Gergeľ, T., & Gretsche, D. (2024). Evaluation of the quality of standing trees using an Arbotom acoustic stress tomograph. DOI: 10.2478/forj-2024-0019
34. Du, X., Li, J., Feng, H., & Chen, S. (2018). Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves. *Applied Sciences*, 8(10), 1778. DOI: 10.3390/app8101778
35. Kralovec, C., & Schagerl, M. (2020). Review of structural health monitoring methods regarding a multi-sensor approach for damage assessment of metal and composite structures. *Sensors*, 20(3), 826. DOI: 10.3390/s20030826
36. Marcantonio, V., Monarca, D., Colantoni, A., & Cecchini, M. (2019). Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 32-42. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.012
37. Honarvar, F., & Varvani-Farahani, A. (2020). A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, 108, 106227. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106227
38. Bucur, Voichita. *Acoustics of Wood* (third Edition). Springer, 2025. 917p.
39. Bucur, V. (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests*, 14(8), 1545. DOI: 10.3390/f14081545
40. Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2019). Effect of wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: A ray-tracing approach. *Ultrasonics*, 91, 242-251. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.07.015
41. Perlin, L. P., de Andrade Pinto, R. C., & do Valle, Â. (2019). Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, 229, 116958. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116958
42. Du, X.; Li, S.; Li, G.; Feng, H.; Chen, S. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation. *BioResources* 2015, 10, 3948–3962. DOI: 10.15376/biores.10.3.3948-3962
43. Schubert, S.; Gsell, D., Dual, J.; Motavalli, M.; Niemz, P. (2009) Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforschung* 63:107–112
44. Danielli, D. Densidade da madeira e potencial dendrocronológico de espécies nativas da floresta ombrófila mista (Wood density and dendrochronological potential of native species from mixed ombrophilous forest). Master's Dissertation, State University of Santa Catarina, 2017. 115p.

2.2 Artigo 2: Identificação da madeira em diferentes condições sanitárias por histograma de tons de cinza e matriz de velocidades de propagação de ondas de ultrassom

Autores: Larissa Tiago Volpi, Raquel Gonçalves, Stella Stopa Assis Palma

Situação: Ainda não submetido

IDENTIFICAÇÃO DA MADEIRA EM DIFERENTES CONDIÇÕES SANITÁRIAS POR HISTOGRAMA DE TONS DE CINZA E MATRIZ DE VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRASSOM

Larissa Tiago Volpi (1), Raquel Gonçalves (2), Stella Stopa Assis Palma (3)

Resumo

A segurança das áreas urbanas depende de manejo eficiente da arborização, sendo a avaliação estrutural das árvores essencial para mitigar riscos de quedas. Entre as técnicas utilizadas, a tomografia acústica permite a análise interna do tronco sem comprometer sua integridade. No entanto, a interpretação das imagens tomográficas pode ser desafiadora devido à variabilidade da madeira entre espécies e, até mesmo, na mesma espécie. Este estudo teve como objetivo estudar a relação entre os valores de pixels das imagens de discos, em tons de cinza, e as matrizes de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, visando avaliar a viabilidade da proposição de ferramenta que posteriormente possa ser utilizada em aprendizado de máquina para automatizar e tornar mais objetiva a interpretação da tomografia. Foram analisados 38 discos de troncos de 20 espécies, divididos entre amostras íntegras e com defeitos. As imagens foram obtidas e processadas no software *ImageJ*, identificando-se três regiões: íntegra, biodeteriorada e com cavidade. Paralelamente, a matriz de velocidades foi gerada pelo software *ImageWood 3.1*. Os resultados mostraram que tanto os valores de velocidade quanto os valores de cinza das imagens foram significativamente mais altos em áreas íntegras, intermediários em regiões biodeterioradas e mais baixos em cavidades. A correlação entre os valores de cinza e a condição da madeira foi significativa ($R = -0,84$; $R^2 = 70,4\%$). Por outro lado, a grande irregularidade dos troncos e das zonas biodeterioradas dificultou a obtenção das velocidades na matriz, afetando a correlação entre a velocidade das ondas e a condição da madeira e, consequentemente, entre os valores de cinza e a velocidade. Isso sugere que melhorias na metodologia de obtenção de velocidades na matriz gerada pela interpolação podem contribuir para uma análise mais precisa da correlação. Imagens tomográficas em tons de cinza podem ser potencialmente utilizadas em modelos de aprendizado de máquina para automatizar a identificação da integridade da madeira, otimizando a análise de riscos em arborização urbana.

Palavras-chaves: reconstrução de imagens, tons de cinza, reconhecimento de defeitos

1 Introdução

A segurança de áreas urbanas, especialmente nas regiões densamente povoadas, depende diretamente de uma gestão eficiente da arborização, pois um manejo adequado das florestas urbanas pode reduzir impactos negativos, tanto sobre a infraestrutura quanto sobre a população (Alves et al., 2023). Nesse contexto, a avaliação da integridade estrutural de árvores urbanas é uma prática essencial para a mitigação de riscos associados à queda de árvores, que pode ocasionar danos materiais, ambientais e até mesmo perda de vidas (Li et al., 2022)

Diversas técnicas podem ser utilizadas para avaliação de árvores, com diferentes graus de complexidade (Li et al., 2022; Ayodele, et al. 2021; Linhares et al., 2021). Métodos

baseados exclusivamente na avaliação visual podem gerar resultados subjetivos e influenciados pela percepção do avaliador (Klein et al., 2021). Por isso, muitas situações demandam análises mais detalhadas, que permitam diagnóstico mais preciso sem comprometer a integridade estrutural das árvores.

Entre as técnicas não destrutivas amplamente empregadas para essa finalidade, destacam-se os métodos tomográficos, que permitem a visualização interna do tronco a partir de imagens. Essas imagens são geradas a partir da interpolação das velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas por ensaio na seção que se deseja avaliar (Palma & Gonçalves, 2022). O ensaio é em geral conduzido utilizando malha de medição que cruza a seção interna em várias direções, denominada de malha de difração. A imagem gerada permite identificar regiões íntegras e áreas com cavidade e/ou biodeterioração (Palma et al., 2022).

No entanto, embora as imagens tomográficas sejam uma ferramenta valiosa, existem desafios relacionados à interpretação precisa das imagens, especialmente devido a variabilidade existente entre as árvores (Volpi 2025 – Artigo 1). Nesse sentido, é fundamental compreender o comportamento dos valores de velocidade na matriz gerada pelo interpolador utilizado na reconstrução tomográfica. Essa análise detalhada pode fornecer informações mais robustas sobre a qualidade das imagens geradas e contribuir para o algoritmo de reconstrução de imagens tomográficas, tornando-os mais precisos e confiáveis.

O avanço da inteligência artificial (IA) tem permitido significativos progressos em diversas áreas, incluindo aquelas relacionadas à análise de imagens. Estudo mostra que o uso do aprendizado de máquina para detectar e classificar diferentes tipos de defeitos no fuste de árvores com base nos dados obtidos por propagação de onda apresentou taxa de sucesso superior a 90% em todas as métricas (Yıldızcan et al. 2024). A aplicação de IA na geração de imagens tomográficas de árvores apresenta grande potencial, desde que se compreenda de forma clara as características e os padrões dos dados de entrada. Nesse sentido, a avaliação da relação entre os valores de pixels das imagens e a matriz de velocidade de propagação das ondas pode fornecer subsídios para o desenvolvimento de modelos mais precisos e eficientes, otimizando a qualidade das imagens geradas e consequentemente, aprimorando o diagnóstico de árvores urbanas.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo descrever o comportamento dos valores de pixels das imagens de discos de seções de árvores de diferentes espécies, utilizando escalas de cinza, considerando as diferentes regiões presentes (íntegras, com biodeterioração e

com cavidades) e analisar se esse comportamento apresenta relação com a matriz de velocidades de propagação das ondas. Espera-se que os resultados contribuam para a melhoria da geração de imagens tomográficas, especialmente no contexto do uso de inteligência artificial, possibilitando avanços na análise de risco de queda de árvores urbanas.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

A amostragem foi composta de 38 discos obtidos de troncos de 21 espécies de árvores, sendo 19 discos sem defeitos e 19 discos com defeitos (Tabela 1). As árvores foram disponibilizadas pelo Departamento de Meio Ambiente (DMA) da Unicamp, e eram compostas por aquelas com autorização de extração. A autorização para extração dessas árvores não era necessariamente em razão das condições fitossanitárias, mas também em função de outras condições relacionadas, por exemplo, com novas obras, equipamentos urbanos, situações de entorno etc.

As espécies de árvores provêm do Campus de Campinas e da Moradia Estudantil, ambos da UNICAMP no distrito de Barão Geraldo, Campinas-SP, sendo assim provenientes de arborizações diferenciadas, que compõem uma coleção de espécies botânicas idealizada pelo Professor Hermógenes de Freitas Leitão Filho, fundador da DMA.

A densidade aparente (12% de umidade) das espécies que compuseram a amostragem variou de 450 kg/m^3 a 1005 kg/m^3 (Tabela 1). Para os discos do gênero *Inga* havia duas espécies, cujas densidades diferiam (Tabela 1).

Tabela 1. Lista de espécies com respectivas quantidades de discos sem defeitos e com defeitos. Fonte: Volpi, 2025 (Artigo 1).

Espécie da árvore		Densidade básica (kg/m ³)	Discos	
Nome popular	Nome científico		íntegros	Com biodeteriorações
mogno	<i>Swietenia mahagoni</i>	590 ^a	1	0
ligustro	<i>Ligustrum lucidum</i>	560 ^b	0	1
manacá	<i>Pleroma mutabile</i>	660 ^c	0	1
pau-formiga	<i>Triplaris americana</i>	450 ^d	0	1
mangueira	<i>Mangifera indica</i>	520 ^e	2	0
grevílea	<i>Grevillea robusta</i>	560 ^a	2	0
coração	<i>Poecilanthe parviflora</i>	990 ^c	1	0
araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	550 ^c	0	2
árvore-da-chuva	<i>Samanea tubulosa</i>	780 ^c	1	0
jacarandá-mimoso	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	600 ^f	6	2
ingá-de-quatro quinas	<i>Inga vera subsp. Affinis</i>	580 ^c	0	1
ingá-branco	<i>Inga laurina</i>	710 ^c	0	3
amburana	<i>Amburana cearensis</i>	600 ^c	1	0
entada-abyssinica	<i>Entada abyssinica</i>	540 ^g	3	0
angico vermelho	<i>Anadenanthera colubrina var. cebil</i>	1005 ^c	0	3
caroba-branca	<i>Sparattosperma leucanthum</i>	570 ^c	0	1
jacarandá-da-Bahia	<i>Dalbergia nigra</i>	870 ^c	1	0
flamboyant	<i>Delonix regia</i>	510 ^e	1	0
dedaleiro	<i>Lafoensia pacari</i>	800 ^c	0	1
jacarandá-paulista	<i>Machaerium villosum</i>	850	0	2
aroeira-branca	<i>Lithraea molleoides</i>	610 ^h	0	1
Total			19	19

Fontes:

a. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-0512202464909/publico/Goncalves_Marcos_ME.pdf

b. <https://www.scielo.br/j/cflo/a/kcmxb64XHfMPnZnwKS9tr/?format=pdf&lang=pt>

c. LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 6ª Edição, Nova Odessa: Plantarum, 2014. v. 1. 384 p.

d. <https://restor.eco/pt/platform/sites/ea86521e-558b-4b89-b140-af1d05d3c2e7/biodiversity/trees/?group=INVASIVE>

e. https://www.researchgate.net/publication/26437620_Caracterizacao_e_uso_de_madeiras_de_galhos_de_arvores_provenientes_da_arborizacao_de_Brasilia_DF

f. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/313733/1/EmbrapaFlorestas-2006-EstoqueIncrementoCarbonoFlorestas.pdf>

g. <https://restor.eco/pt/platform/sites/13831d32-d1c0-40f7-abe4-ed23d3d273f7/biodiversity/trees/>

h. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr108/cap18.pdf>

2.2 Metodologia

O primeiro passo para a determinação dos intervalos de cinza consistiu na captura de fotografias do corte transversal do tronco (disco) – Figura 1a - na região onde o ensaio de ultrassom na malha de difração (Figura 1b) foi realizado.

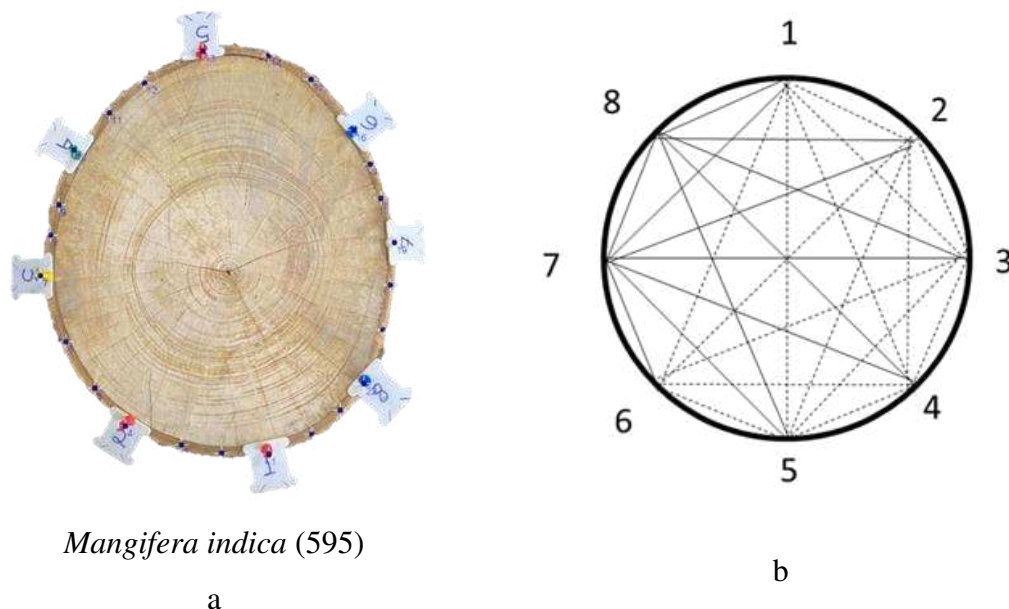


Figura 1. Exemplo de fotografia do disco (a) e de uma malha de difração de 8 pontos de medição (b)

As imagens foram obtidas de cima para baixo, paralelamente à face transversal, após o nivelamento da amostra com plaina e polimento utilizando lixas de várias gramaturas. Para garantir a uniformidade do fundo, as amostras foram dispostas sobre uma lona preta.

Após a captura, as fotografias foram ajustadas no software ImageJ, recortando até o limite da borda de cada amostra e convertendo-as para escala de cinza (Figura 2) em 8 bits. Nessa escala os valores que variam na matriz vão de 0 (preto) a 255 (branco). Em cada imagem, foram traçadas três linhas paralelas equidistantes na horizontal (denominadas x1, x2 e x3) e três linhas paralelas equidistantes na vertical (denominadas y1, y2 e y3) (Figura 2). Sobre cada linha, foi traçada uma linha adicional, focada apenas no lenho do disco, eliminando-se a casca.

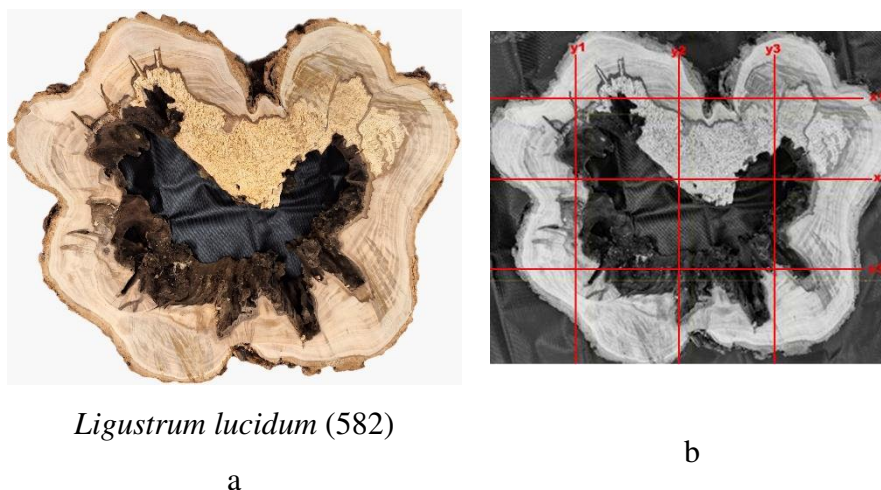


Figura 2. Exemplo de fotografia do disco em cores (a) e em tons de cinza com as linhas nas quais se capturou os valores de cinza (b).

Utilizando a ferramenta Plot Profile do ImageJ, os gráficos de tons de cinza foram gerados para cada uma das três linhas de cada eixo (X e Y). A partir desses gráficos, os intervalos de tons de cinza correspondentes às diferentes regiões das amostras foram identificados, categorizando as regiões como madeira íntegra, madeira biodeteriorada e presença de cavidade, desconsiderando picos esporádicos nos dados (Figura 3).

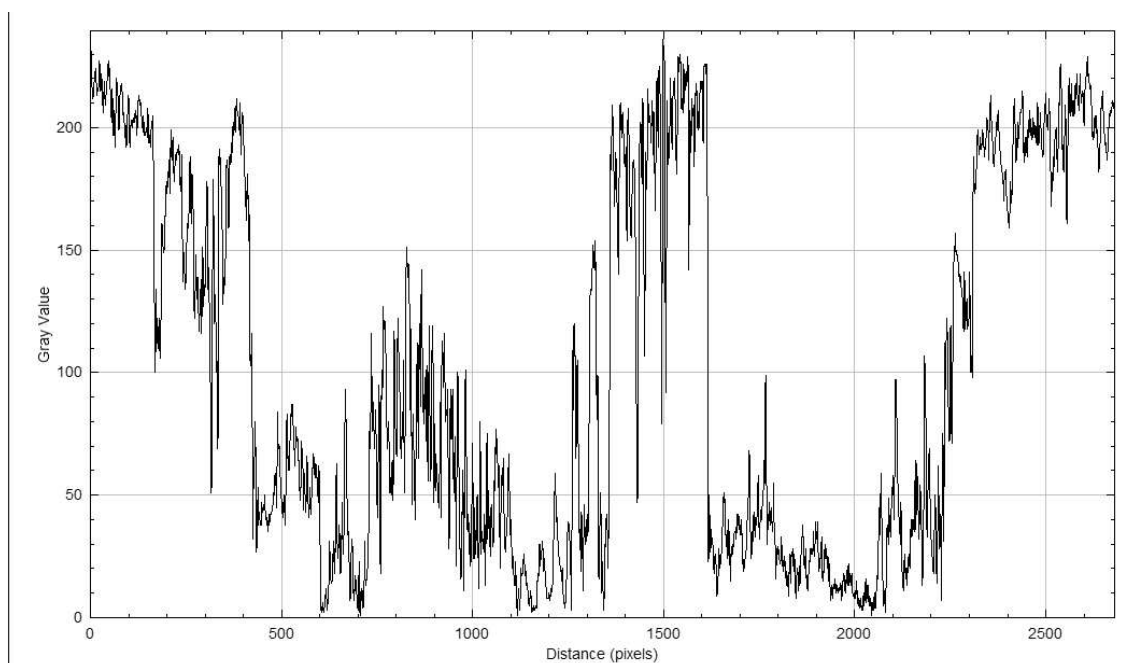


Figura 3. Exemplo de gráfico de tons de cinza.

Para a determinação dos intervalos de velocidades de ultrassom, foi utilizada a matriz de velocidades gerada por interpolação no software ImageWood 3.1. Essa matriz é a mesma que foi empregada na elaboração das imagens tomográficas dos discos, conforme descrito em Volpi (2025), Artigo 1. Os gráficos foram elaborados para as três colunas equidistantes (y_1 , y_2 e y_3) e para as três linhas equidistantes (x_1 , x_2 e x_3), correspondentes as linhas e colunas utilizadas para a obtenção dos valores de cinza (Figura 4).

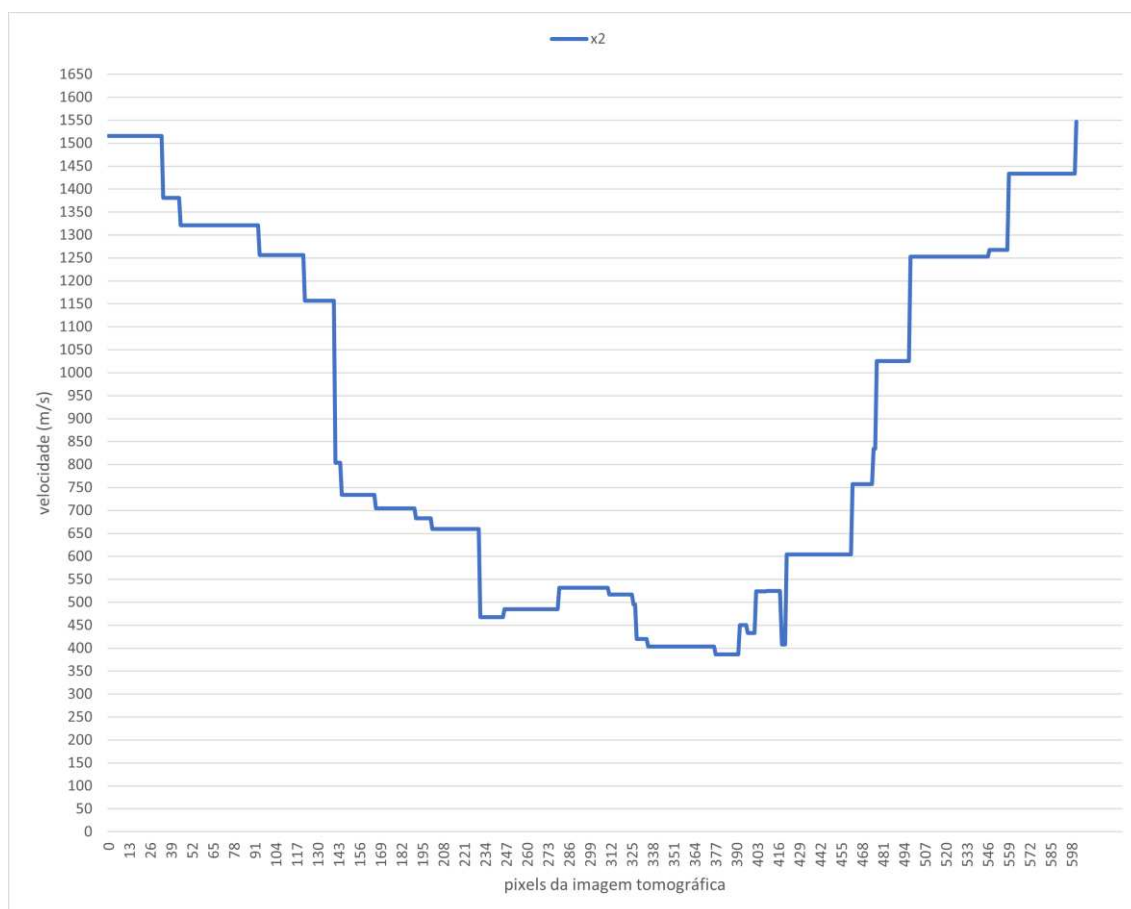


Figura 4. Exemplo de gráfico de velocidades (b).

A identificação do intervalo de velocidades mínimas e máximas para cada uma das regiões de madeira (íntegra, biodeteriorada e com cavidade) foi feita comparando-se os gráficos e as regiões correspondentes de cada linha traçada nas fotografias.

3 Resultados e discussão

Os intervalos de tons de cinza (valores mínimos e máximos) da malha (x , y) obtidos para as zonas íntegra, com biodeterioração e com cavidade (Exemplo Tabela 2) e os respectivos intervalos de velocidade na mesma malha e para as mesmas zonas (Exemplo Tabela

3) foram organizados para cada disco. O mesmo tipo de organização foi realizado para os discos íntegros (Exemplo Tabela 4). Tendo em vista que para cada disco com biodeterioração foram gerados 36 dados de tons de cinza e 36 dados de velocidade, considerando todas as espécies obteve-se um total de 684 dados de tons de cinza e 684 dados de velocidade. Para os discos íntegros foram gerados 228 dados de tons de cinza e 228 dados de velocidades.

Tabela 2. Exemplo de organização dos dados para os intervalos de valores de tons de cinza das imagens dos discos com biodeterioração

Espécie (disco)	malha	Intervalos de valores de cinza					
		Zona íntegra		Zona biodeteriorada		Zona cavidade	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
<i>Ligustrum japonicum</i> (582)	X1	200	240	100	230	5	90
	X2	190	240	150	235	0	140
	X3	190	240	150	200	2	140
	Y1	185	245	170	230	3	120
	Y2	185	235	110	230	1	120
	Y3	185	230	115	230	5	95

Tabela 3. Exemplo de organização dos dados para os intervalos de velocidade de propagação das ondas de ultrassom obtidas da matriz de interpolação

Espécie (disco)	malha	Intervalos de velocidades (m/s)					
		Zona íntegra		Zona biodeteriorada		Zona cavidade	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
<i>Ligustrum japonicum</i> (582)	X1	1110	1340	420	1040	780	880
	X2	1250	1520	520	1260	380	840
	X3	1340	1680	920	1050	525	850
	Y1	930	1330	830	880	670	830
	Y2	530	580	430	625	315	530
	Y3	970	1370	1010	1210	650	1210

Tabela 4. Exemplo de organização dos dados para os intervalos de valores de tons de cinza da imagem dos discos e de velocidade de propagação das ondas de ultrassom obtidas da matriz de interpolação. Discos íntegros.

Espécie (disco)	malha	Intervalos de tons de cinza		Intervalos de velocidades (m/s)	
		Min	Máx	Min	Máx
<i>Swietenia mahagoni</i> (572)	X1	130	210	2553	3149
	X2	120	220	2283	3046
	X3	135	225	2511	2912
	Y1	130	210	2567	3108
	Y2	120	210	2239	3097
	Y3	145	210	2420	2908

Nos discos íntegros os valores de cinza na malha (X, Y) apresentaram média 180,4 e CV = 11,3%. Nos discos com biodeterioração, considerando apenas a malha que passou nas zonas íntegras, os valores de tons de cinza apresentaram média 177,6 e CV=14,3%. Tendo em vista que os valores de cinza nos discos integralmente íntegros e nas partes íntegras dos discos com biodeterioração foram próximos, infere-se que as medições nos discos com biodeterioração foram efetivamente feitas somente na zona íntegra.

Para as velocidades, nos discos íntegros os valores variaram de 1677 m/s a 3211 m/s com média 2565 m/s e CV = 9,2%. Nos discos com biodeterioração, considerando apenas a malha que passou nas zonas íntegras, os valores de velocidade variaram de 333 a 3048 com média 1505 e CV=37,3%. O valor máximo foi semelhante, mas o valor mínimo foi muito mais baixo nos discos com biodeterioração, o que elevou o coeficiente de variação. Esse resultado pode indicar que alguns pontos da malha de velocidades podem ter sido provenientes de zonas já afetadas por algum nível de deterioração, podendo afetar os resultados. Outro fator que também pode ter influenciado no resultado foi a geometria irregular das amostras (Burcham et al., 2023), uma vez que a maioria das espécies analisadas neste estudo apresentava troncos bastante irregulares.

Conforme já é esperado, em zonas de madeira íntegra as velocidades de propagação de ondas nas direções radiais e tangenciais são mais altas do que em zonas biodeterioradas e/ou com cavidades (Du et al., 2018; Wei et al., 2020, Wei, et al., 2021) (Tabela 5). Apesar da variabilidade em torno da média (Figura 5), ficou demonstrado que as diferenças entre as velocidades nas diferentes zonas foram estatisticamente significativas, com indicação de três grupos homogêneos (Tabela 5). Esse resultado confirma a viabilidade de se utilizar velocidades de propagação de ondas, obtidas radial e tangencialmente, como ferramenta para inferência de defeitos na madeira. Por essa razão, em árvores, as inspeções utilizam a malha de difração (Figura 1b) para promover a propagação das ondas nessas direções, as quais posteriormente são utilizadas na geração de imagens tomográficas.

Tabela 5. Teste estatístico de comparação de médias (*multiple range test*) das velocidades de propagação das ondas de ultrassom nas diferentes zonas da madeira

Zona da madeira	Número de dados	Média	Grupos homogêneos
Íntegra	94	1505	A
Biodeteriorada	90	1216	B
Cavidade	45	849	C

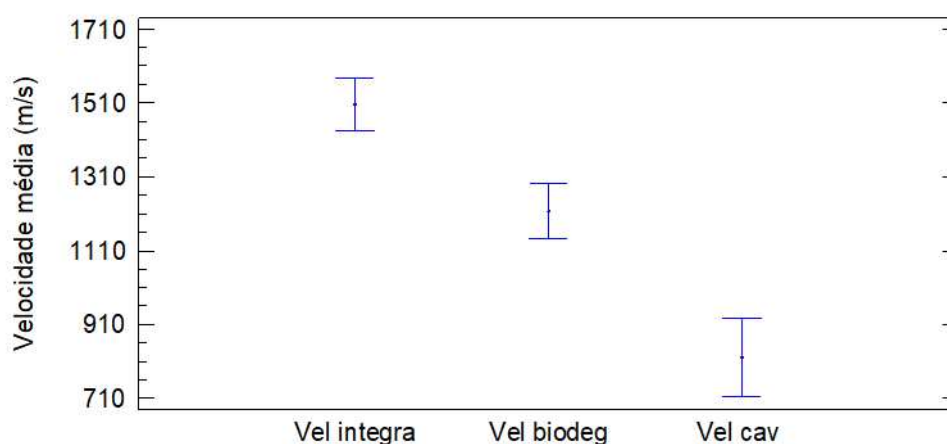


Figura 5. Médias e intervalos de confiança das velocidades de propagação de ondas de ultrassom obtidas por interpolação na matriz de velocidades

De modo semelhante, houve diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios de tons de cinza obtidos nas diferentes zonas da madeira, com valores mais elevados para as zonas íntegras, intermediários para as zonas com biodeterioração e menores para as zonas com cavidades (Tabela 6). A variabilidade dos valores de tons de cinza (Figura 6) foi menor do que das velocidades (Figura 5).

Tabela 6. Teste estatístico de comparação de médias (*multiple range test*)

Zona da madeira	Número de dados	Média	Grupos homogêneos
Íntegra	105	177,61	A
Biodeteriorada	100	139,7	B
Cavidade	30	32,3	C

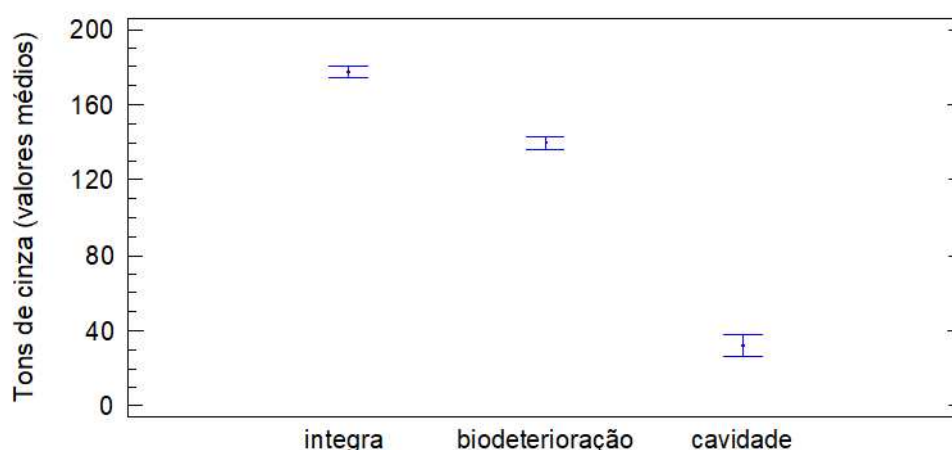


Figura 6. Médias e intervalos de confiança dos valores de tons de cinza obtidos da imagem dos discos

As velocidades de propagação das ondas, obtidas na matriz de velocidades, tiveram comportamento compatíveis com os valores de cinza, com velocidades mais elevadas e valores mais elevados de cinza obtidos nas zonas íntegras; velocidades intermediárias e valores intermediários de cinza obtidos em zonas com biodeterioração e, por fim, menores valores de velocidade e de tons de cinza em zonas com cavidade.

Entre a zona biodeteriorada e a zona íntegra, a redução da velocidade (24%) foi da mesma ordem de grandeza da redução do valor de cinza (27%), mas entre a zona com cavidade e a zona íntegra perdas muito superiores ocorreram para os valores de cinza (452%) do que para as velocidades (84%), indicando maior sensibilidade dos valores de cinza na diferenciação dessas zonas ou menos mescla de zonas na malha (X, Y).

O comportamento da redução dos valores de velocidade e de valores de cinza com a condição da madeira podem ser representados por linhas de tendência linear, com modelos significativos (P-valor = 0,000). Para os 234 valores de cinza os ajustes da regressão foram adequados, com coeficiente de correlação (R) = -0,84 e coeficiente de determinação (R^2) = 70,4% (Figura 7). No entanto, para os 216 valores de velocidade a regressão apresentou R = -0,36 e R^2 = 12,7% indicando que o modelo (Figura 8) explicou pouco (12,7%) da variabilidade das zonas da madeira, reforçando que pode ter havido mescla de zonas de madeira na tomada de valores da matriz de velocidades.

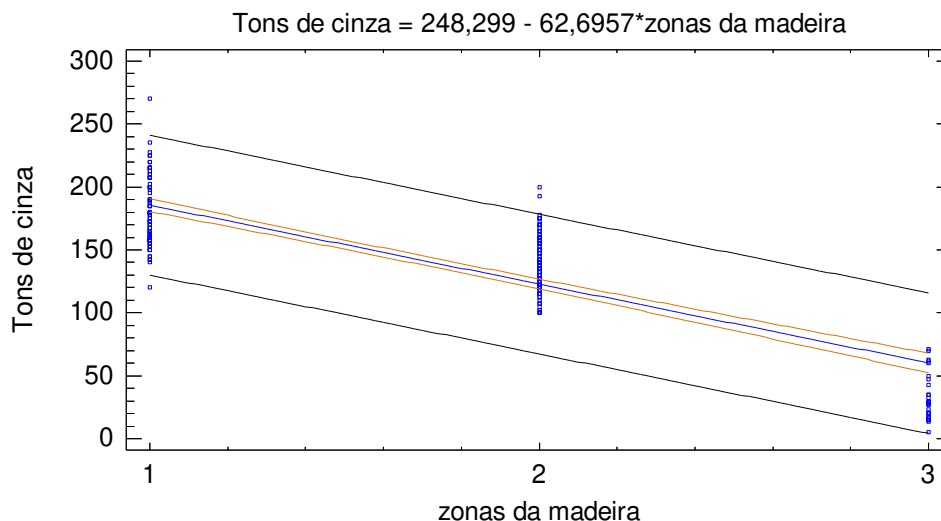


Figura 7. Modelo de regressão linear na representação do comportamento da variação dos valores de cinza com a variação da condição da madeira na zona 1 = madeira íntegra; zona 2 = madeira com biodeterioração e zona 3 = madeira com cavidade

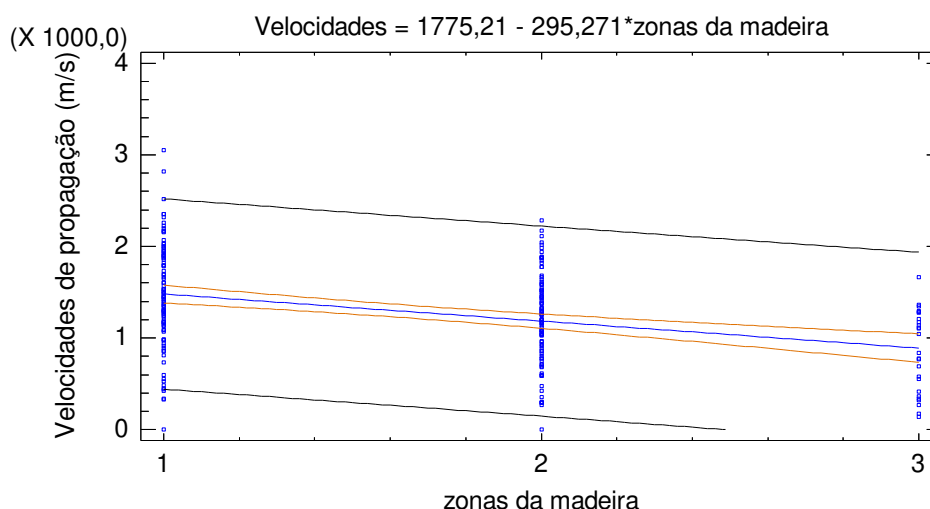


Figura 8. Modelo de regressão linear na representação do comportamento da variação das velocidades de propagação das ondas com a variação da condição da madeira na zona 1 = madeira íntegra; zona 2 = madeira com biodeterioração e zona 3 = madeira com cavidade

Considerando todos os 198 pares de dados (valor de cinza e velocidade), o modelo que melhor explica a relação entre as matrizes de velocidade e de tons de cinza é o exponencial (Equação 1). Esse modelo é estatisticamente significativo ($P\text{-valor} = 0,0057$) mas os parâmetros da regressão mostram que a variabilidade dos valores de tons de cinza são apenas 3,8% explicados pelas velocidades ($R^2 = 3,8\%$), resultado já esperado, uma vez que as diferenciações das zonas da madeira foram adequadamente associadas aos tons de cinza ($R = -0,84$) mas não às velocidades ($R = -0,36$).

O uso de valores médios de velocidades e de valores de cinza para cada zona da madeira, ao invés dos pares (198) individuais de valores não permite análise estatística de modelos de correlação, uma vez que a amostragem se reduz a apenas 3 pares, um para cada zona de madeira (íntegra, biodeteriorada e cavidade). No entanto, com a melhoria da metodologia de cálculo da matriz de velocidades nas diferentes regiões, pode servir para indicar o possível comportamento da variação dos dados, auxiliando futuras pesquisas. Assim, utilizando as médias, o modelo que apresentou melhor ajuste para correlacionar as velocidades aos valores de cinza foi o apresentado na Equação 1. Esse modelo foi estatisticamente significativo (P-valor = 0,0064) e a velocidade explicou 99% da variabilidade dos tons de cinza, mas não pode ser utilizado porque os dados são insuficientes e, portanto, poderia implicar em erros elevados. No entanto, é possível observar que o comportamento médio das velocidades e dos valores de cinza seguem um padrão de coerência (Figura 9).

$$\text{Valor de cinza} = \text{sqrt}(a + b * \text{sqrt}(\text{velocidade}))$$

Equação 1

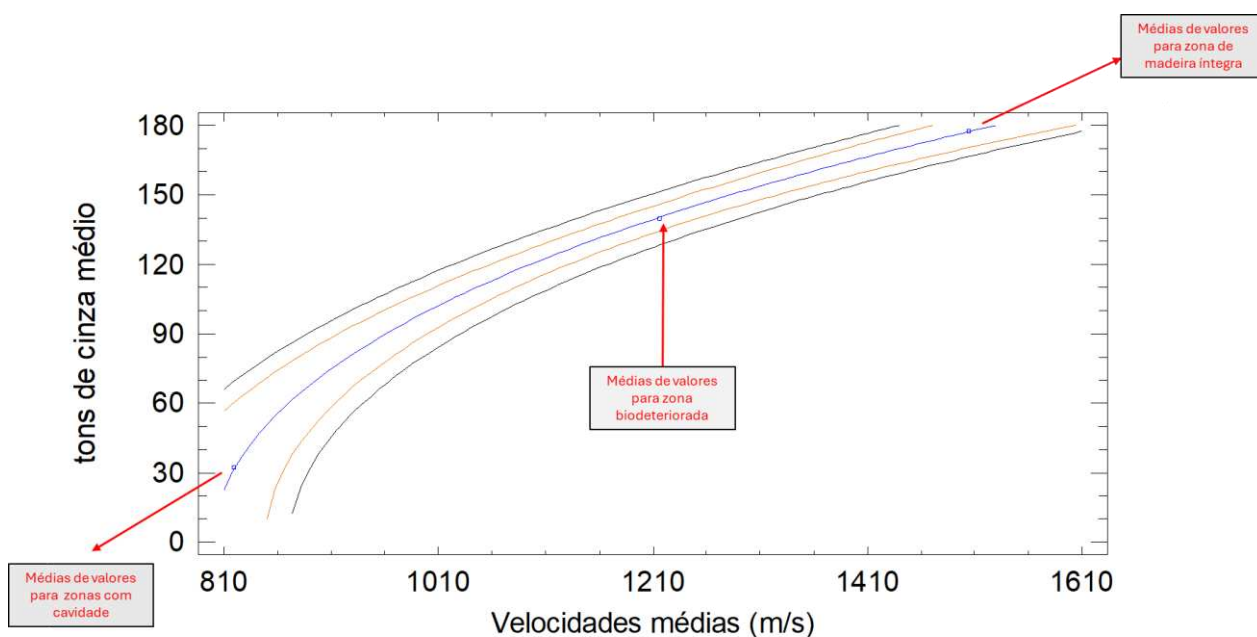


Figura 9. Comparação entre as médias dos valores obtidos para os tons de cinza e para as velocidades nas diferentes condições observadas.

Em pesquisa anterior realizada no GPEND, em nível de iniciação científica, para 12 discos de *Cenostigma pluviosum*, valores médios de tons de cinza também foram estatisticamente diferenciados nas regiões de madeira íntegra (160), com biodeterioração (110) e com cavidade (30).

4 Conclusões

O comportamento dos valores de cinza em função da condição da madeira, obtido para a espécie *Cenostigma pluviosum* em pesquisa anterior, se repetiu para as 20 espécies estudadas nesta pesquisa. Valores de tons de cinza são superiores para as zonas de madeira íntegra, intermediários para zonas de madeira biodeteriorada e inferiores para zonas com cavidades. Dessa forma, imagens tomográficas geradas em tons de cinza poderiam ser utilizadas futuramente para automatizar interpretações da inferência da condição da madeira de troncos de árvores utilizando aprendizado de máquina.

Foi possível obter modelo de correlação estatisticamente significativo e com ajustes adequados para a variação dos valores de cinza em função da condição da madeira, mas para a velocidade os ajustes não foram bons, indicando provável problema na metodologia de cálculo. Assim, é necessário melhorar a metodologia de obtenção de valores de velocidades nas diferentes regiões da madeira (íntegra, biodeteriorada e com cavidade), utilizando a matriz gerada pela interpolação dos dados do software de imagens (ImageWood), para verificação futura de modelos de variação adequados. Modelos adequados para a variação da velocidade poderiam permitir, também, a obtenção de correlações adequadas entre velocidade e tons de cinza e, desta forma, a construção automatizada de imagens em tons de cinza e sua interpretação utilizando aprendizado de máquinas.

Referências Bibliográficas

- Ayodele O. S., Olatunde I. P., Adedeji A. A. (2021). Detection of wood decay and cavities in living trees: a review. *Canadian Journal of Forest Research*. 51(7): 937-947. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340>
- Alves, L. P., Costa, J. A. S., & Costa, C. B. N. (2023). Arborização urbana dominada por espécies exóticas em um país megadiverso: falta de planejamento ou desconhecimento? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1304-1375.
- Burcham, D.C.; Brazee, N.J.; Marra; R.E.; Kane, B. Geometry matters for sonic tomography of trees. *Trees* 37, 837–848 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02387-4>
- Du, X. C., Feng, H. L., Hu, M. Y., Fang, Y. M., and Chen, S. Y. (2018). “Three-dimensional stress wave imaging of wood internal defects using TKriging method,” *Computers and Electronics in Agriculture* 148, 63-71. DOI: 10.1016/j.compag.2018.03.005
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hansen, G., Warner, L.A., Dale, A. G., Watt. J. (2021). *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)* November 2021, 47 (6) 234-251; DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2021.021>

- Li, H., Zhang, X., Li, Z., Wen, J., & Tan, X. (2022). A Review of Research on Tree Risk Assessment Methods. *Forests*, 13(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>
- Linhares, C. S. F., Gonçalves, R., Martins, L. M., & Knapic, S. (2021). Structural Stability of Urban Trees Using Visual and Instrumental Techniques: A Review. *Forests*, 12(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/f12121752>
- Palma, S. S. S. A., dos Reis, M. N., & Gonçalves, R. (2022). Tomographic Images Generated from Measurements in Standing Trees Using Ultrasound and Postprocessed Images: Methodological Proposals for Cutting Velocity, Interpolation Algorithm and Confusion Matrix Metrics Focusing on Image Quality. *Forests*, 13(11), 1935. <https://doi.org/10.3390/f13111935>
- Palma, S.S.A.; Gonçalves, R. Tomographic images of the trunks generated using ultrasound and post-processed images: Influence of the number of measurement points. *BioResources* 2022, 17, 6638–6655. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6638-6655>
- Wei, X., Sun, L., Zhou, H., Yang, Y., Wang, Y., and Gao, Y. (2020). “Propagation velocity model of stress waves in larch wood (*Larix gmelinii*) three-dimensional space with different moisture contents,” *BioResources* 15(3), 6680-6695. DOI: 10.15376/biores.15.3.6680-6695
- Wei, X., Xu, S., Sun, L., Tian, C., and Du, C. (2021). "Propagation velocity model and two-dimensional defect imaging of stress wave in larch (*Larix gmelinii*) wood," *BioResources* 16(4), 6799-6813.
- Yıldızcan, E.N., Arı, M.E., Tunga, B. et al. (2024). Machine learning based tomographic image reconstruction technique to detect hollows in wood. *Wood Sci Technol* 58, 1491–1516. <https://doi.org/10.1007/s00226-024-01580-z>

3 DISCUSSÃO GERAL

O escopo geral da dissertação teve dois focos principais. O primeiro foi a avaliação, para diferentes espécies, da velocidade de corte mais adequada para a construção de imagens tomográficas a serem utilizadas na inferência de cavidades e de zonas biodeterioradas, partindo de resultados já obtidos por Palma et al. (2022) para a espécie *Cenostigma pluviosum*. Neste caso considerou-se como critério a melhor acurácia da imagem. O segundo foco consistiu em avaliar, também para diferentes espécies e partindo de metodologia proposta por Palma et al. (2022), o comportamento das imagens em tons de cinza na diferenciação das zonas íntegras, biodeterioradas e com cavidades; bem como sua relação com as velocidades de propagação de ondas, obtidas na malha de medição nas mesmas zonas. A amostragem para o desenvolvimento da pesquisa, considerando os dois focos, foi composta por 38 discos de 20 espécies (Tabela 1 do Artigo 1).

Tendo em vista que os discos foram retirados de árvores do campus da Unicamp, com autorização de corte pelo Departamento de Meio Ambiente, não houve definição ou escolha prévia do tipo de condição (íntegra, com biodeterioração ou com cavidade) dos mesmos. Assim, dos 38 discos, 19 estavam íntegros e 19 possuíam algum tipo de biodeterioração. Dos discos com biodeterioração, apenas dois apresentavam cavidades bem definidas e cercadas por zona de madeira visivelmente íntegra. O restante dos discos apresentava apenas biodeterioração ou uma mescla de biodeterioração e cavidade, dificultando análise isolada da cavidade.

Conforme foi mostrado no Artigo 1, a inferência da condição da madeira nos discos que estavam íntegros foi muito acertada, pois para 100% dos discos a imagem tomográfica não indicou presença de cavidades ou biodeterioração, denotando 100% de acurácia das imagens.

A inferência de cavidades utilizando a imagem tomográfica teve maior acurácia quando se adotou 35% da velocidade máxima obtida no disco ($V_{m\acute{a}x}$) como velocidade de corte. Esse resultado se diferenciou do obtido para a *Cenostigma pluviosum* (Palma et al. 2022) que foi de 40% $V_{m\acute{a}x}$. No entanto, a adoção da mesma velocidade de corte (40% $V_{m\acute{a}x}$) implicou na perda de apenas 2,6% na acurácia, que continuam com valores superiores a 90% e, portanto, com ótima capacidade de inferência. Infelizmente a amostragem de discos com cavidades circundadas de madeira íntegra não foi suficiente para se concluir a respeito da validade da velocidade de corte para todas as espécies.

Conforme já esperado, a acurácia da inferência de zonas biodeterioradas é inferior à de zonas com cavidades, já que a condição da madeira biodeteriorada mescla partes com diferentes níveis de biodeterioração e até mesmo com cavidades de diferentes dimensões. A

média das melhores acurácias foi de 67,4% para a inferência de zonas biodeterioradas nos discos, enquanto para zonas com cavidades as acurácias foram superiores a 90%. Houve variação das velocidades de corte com melhores acurácias, mas a maior parte foi obtida para velocidades entre 40% e 50%V_{máx}. Neste caso, a adoção da mesma velocidade de corte obtida para a *Cenostigma pluviosum* (Palma et al., 2022) acarretaria perda média de 5,22% na acurácia, valor esse bastante aceitável considerando a simplificação gerada pela adoção de um valor único na construção de imagens tomográficas, independente da espécie.

Adicionalmente, tendo em vista que o estudo envolveu a análise de 20 espécies, considera-se que esse resultado está bem fundamentado. Além disso, comparando-se, visualmente, as imagens reais dos discos com as imagens tomográficas, verifica-se que, mesmo não sendo exato na dimensão e na localização, a adoção da velocidade de corte igual a 45%V_{máx} permite inferir que há uma zona deteriorada, sendo, portanto, ferramenta útil para diagnósticos de risco de queda.

Utilizando classificação proposta por Danielli (2017), as espécies avaliadas foram enquadradas principalmente nas faixas de média (63,2%) e alta (31,5%) densidades. No entanto, embora numericamente as melhores acurácias foram crescentes conforme a densidade foi crescente, estatisticamente a densidade não afetou a acurácia obtida para a imagem na inferência da zona deteriorada. É possível que os melhores resultados tenham sido obtidos para as espécies mais densas porque a madeira com densidade mais elevada tem menor atenuação do sinal de ultrassom (Bucur, 2006). Em relação à velocidade de corte, a análise estatística também não indicou interferência da densidade.

Com relação às imagens em tons de cinza, segundo objetivo específico desta pesquisa, verificou-se comportamento equivalente da espécie *Cenostigma pluviosum* e das 20 espécies estudadas nesta pesquisa. Os valores de tons de cinza são estatisticamente afetados pela condição da madeira (íntegra, biodeteriorada e com cavidade), com valores superiores para as regiões íntegras, intermediários para as regiões biodeterioradas e inferiores para as regiões com cavidades. No estudo anterior, com a espécie *Cenostigma pluviosum*, somente os valores de cinza foram avaliados, enquanto nesta pesquisa avaliou-se, também, as velocidades geradas por interpolação pelo programa utilizado na geração das imagens (*ImageWood*). Detalhamento da metodologia e principais resultados podem ser vistos no Capítulo 3 (Artigo 2). Para os 234 valores de cinza obtidos nas três diferentes regiões da madeira, o modelo de regressão linear foi significativo e a condição da madeira foi suficiente para explicar 70,4% da variação dos valores de cinza. Os valores de cinza obtidos em discos integralmente íntegros foram da mesma ordem

de grandeza dos obtidos considerando apenas as regiões íntegras de discos que possuíam biodeteriorações. Esse resultado mostra que a metodologia foi adequada para a separação das zonas na análise dos valores de cinza.

As velocidades de propagação das ondas, obtidas por meio de interpolação realizada pelo programa de geração de imagem (ImageWood), obtidas nos mesmos pontos da malha (X, Y) utilizada para a obtenção dos valores de cinza, tiveram comportamento esperado pelo que já se conhece de propagação de ondas de ultrassom na madeira. Valores superiores de velocidade foram obtidos na zona de madeira íntegra, valores intermediários na zona de madeira com biodeterioração e valores inferiores nas zonas com cavidade. No entanto, para a velocidade de propagação das ondas, o modelo de regressão, apesar de também estatisticamente significativo, indicou que apenas 12,7% da variabilidade da velocidade foi explicada pelas diferentes condições da madeira. Tendo em vista que os valores de velocidade obtidos nos discos integralmente íntegros foram inferiores aos obtidos nas zonas íntegras dos discos com biodeterioração, é possível que problemas metodológicos tenham afetado os resultados das velocidades, havendo mescla de zonas com diferentes condições (íntegra, biodeteriorada e cavidade). Como a correlação entre as diferentes zonas e a velocidade foi fraca, a correlação entre a velocidade e os valores de cinza, embora significativos, também foram fracos.

4 CONCLUSÕES GERAIS

Considerando os dois objetivos específicos da pesquisa foi possível tecer as seguintes conclusões gerais:

- As velocidades de corte para a inferência de zonas com cavidades e de zonas biodeterioradas, obtidas para a espécie *Cenostigma pluviosum* (40%Vmáx e 45%Vmáx respectivamente), podem ser utilizadas também para as 20 espécies estudadas nesta pesquisa, com perdas médias de 5,2% na acurácia.

- O comportamento dos valores de cinza, obtidos para as 20 espécies estudadas nesta pesquisa, foi igual ao obtido para a espécie *Cenostigma pluviosum*, com valores superiores para as zonas de madeira íntegra, intermediárias para as zonas com biodeteriorações e inferiores para as zonas de cavidade. Utilizando os pares de dados obtidos com as 20 espécies foi possível obter modelo de regressão estatisticamente significativo, sendo a variabilidade dos tons de cinza 70% explicada pela posição do pixel nas diferentes zonas (íntegra, biodegradada e com cavidade).

- Para as velocidades da matriz gerada por interpolação pelo programa de geração de imagem (ImageWood), nas mesmas posições onde os valores de cinza foram obtidos, foi possível obter modelo de regressão estatisticamente significativo entre as condições da madeira e as velocidades, mas a variabilidade da velocidade é apenas 12,7% explicada pela posição nas diferentes zonas (íntegra, biodegradada e com cavidade). Tendo em vista que o comportamento das velocidades foi coerente com o esperado pela teoria de propagação de ondas, com valores superiores para as zonas íntegras, intermediários para as zonas com biodeterioração e inferiores para as zonas com cavidade, a hipótese para esse resultado é que houve problemas na metodologia para a obtenção dos valores de velocidade, havendo mescla de valores obtidos em diferentes regiões.

- Os problemas metodológicos que afetaram a correlação entre as velocidades e as zonas diferenciadas da madeira, também afetaram a correlação entre a velocidade e os valores de cinza. Utilizando valores médios verifica-se ser possível obter modelo de regressão estatisticamente significativo, mas tal modelo pode ser apenas indicativo do comportamento da relação, já que o número de pontos (3 – zona íntegra, zona biodeteriorada e cavidade) é insuficiente para análise estatística dos coeficientes de determinação e de correlação.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 16246-3 Florestas Urbanas Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas Parte3: Avaliação de risco de árvores. Primeira edição. 14p. ISBN978-85-07-08192-0.2019.

Alves, P. L. Capacidade de interceptação pelas árvores e suas influências no escoamento superficial urbano (Tree interception capacity and its influence on urban surface runoff). Ph.D. Thesis, Federal University of Goiás, 2015.

Alves, L. P., Costa, J. A. S., & Costa, C. B. N. (2023). Arborização urbana dominada por espécies exóticas em um país megadiverso: falta de planejamento ou desconhecimento? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1304-1375.

Ayodele O. S., Olatunde I. P., Adedeji A. A. (2021). Detection of wood decay and cavities in living trees: a review. *Canadian Journal of Forest Research*. 51(7): 937-947. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340>

BUCUR V. Acoustics of wood. Springer series in wood science, 2nd edition, 2006.

Bucur, V. Acoustics of Wood (third Edition). Springer, 2025. 917p.

Bucur, V. (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests*, 14(8), 1545. DOI: 10.3390/f14081545

Burcham, D.C.; Brazee, N.J.; Marra; R.E.; Kane, B. Geometry matters for sonic tomography of trees. *Trees* 37, 837–848 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02387-4>

Cardenas-Rengifo, G. P.; Baselly-Villanueva, J.R.; Chumbimune-Vivanco, S.Y.; Macedo-Ramírez, A.T.; Salazar E.; Minaya, B.; Quintana, S.; Cabudivo, A., Palma, S. S. A., Álvarez-Álvarez, P; et al. Uso de tomografia acústica para modelar a deterioração da madeira em *Cedrelinga cateniformis* Ducke na Amazônia peruana (Use of acoustic tomography to model wood deterioration in *Cedrelinga cateniformis* Ducke in the Peruvian Amazon). *Florestas*. 2024; 15(5):778. <https://doi.org/10.3390/f15050778>

Chakraborty, T., Biswas, T., Campbell, L. S., Franklin, B., Parker, S. S., & Tukman, M. (2022). Feasibility of afforestation as an equitable nature-based solution in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103826. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103826>.

Coelho-Duarte, A. P., Daniluk-Mosquera, G., Gravina, V., Vallejos-Barra, Ó., & Ponce-Donoso, M. (2021). Tree risk assessment: Component analysis of six visual methods applied in an urban park, Montevideo, Uruguay. *Urban Forestry & Urban Greening*, 59, 127005. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127005>.

Danielli, D. (2017). Densidade da madeira e potencial dendrocronológico de espécies nativas da floresta ombrófila mista. Dissertação (Mestrado), Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 217. 115p.

- Du, X.; Li, S.; Li, G.; Feng, H.; Chen, S. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation. *BioResources* 2015, 10, 3948–3962. DOI: 10.15376/biores.10.3.3948-3962
- Du, X., Li, J., Feng, H., & Chen, S. (2018). Image reconstruction of internal defects in wood based on segmented propagation rays of stress waves. *Applied Sciences*, 8(10), 1778. DOI: 10.3390/app8101778
- Du, X. C., Feng, H. L., Hu, M. Y., Fang, Y. M., and Chen, S. Y. (2018). “Three-dimensional stress wave imaging of wood internal defects using TKriging method,” *Computers and Electronics in Agriculture* 148, 63-71. DOI: 10.1016/j.compag.2018.03.005
- Dudkiewicz, M., & Durlak, W. (2021). Sonic Tomograph as a tool supporting the sustainable management of historical greenery of the UMCS Botanical Garden in Lublin. *Sustainability*, 13(16), 9451. DOI: 10.3390/su13169451
- Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2019). Effect of wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: A ray-tracing approach. *Ultrasonics*, 91, 242-251. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.07.015
- Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2020). Quantitative parametric imaging by ultrasound computed tomography of trees under anisotropic conditions: Numerical case study. *Ultrasonics*, 102, 106060. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.106060
- Feng, H., Li, G., Fu, S., and Wang, X. (2014). “Tomographic image reconstruction using an interpolation method for tree decay detection,” *BioResources* 9(2), 3248-3263. DOI: 10.15376/biores.9.2.3248-3263
- Honarvar, F., & Varvani-Farahani, A. (2020). A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, 108, 106227. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106227
- Hui, K. K. W., Wong, M. S., Kwok, C. Y. T., Li, H., Abbas, S., & Nichol, J. E. (2022). Unveiling falling urban trees before and during Typhoon Higos (2020): Empirical case study of potential structural failure using tilt sensor. *Forests*, 13(2), 359. <https://doi.org/10.3390/f13020359>.
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hansen, G., Warner, L.A., Dale, A. G., Watt, J. (2021). *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)* November 2021, 47 (6) 234-251; DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2021.021>
- Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Hansen, G., & Escobedo, F. J. (2019). Risk assessment and risk perception of trees: A review of literature relating to arboriculture and urban forestry. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 45(1), 26-38. <https://doi.org/10.48044/jauf.2019.003>.
- Jones, B. A. (2021). Planting urban trees to improve quality of life? The life satisfaction impacts of urban afforestation. *Forest Policy and Economics*, 125, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102408>.

Judice, A., Gordon, J., Abrams, J., & Irwin, K. (2021). Community perceptions of tree risk and management. *Land*, 10(10), 1096. <https://doi.org/10.3390/land10101096>.

Kralovec, C., & Schagerl, M. (2020). Review of structural health monitoring methods regarding a multi-sensor approach for damage assessment of metal and composite structures. *Sensors*, 20(3), 826. DOI: 10.3390/s20030826

Li, H., Zhang, X., Li, Z., Wen, J., & Tan, X. (2022). A review of research on tree risk assessment methods. *Forests*, 13(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/f13101556>.

Linhares, C. S., Gonçalves, R., Martins, L. M., & Knapic, S. (2021). Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A review. *Forests*, 12(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/f12121752>.

Marcantonio, V., Monarca, D., Colantoni, A., & Cecchini, M. (2019). Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 32-42. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.012

Michajlová, K., Gejdoš, M., Gergel', T., & Gretsche, D. (2024). Evaluation of the quality of standing trees using an Arbotom acoustic stress tomograph. DOI: 10.2478/forj-2024-0019

Nicolotti G, Socco LV, Martinis R, Godio A, Sambuelli L (2003) Application and comparison of three tomographic techniques for the detection of decay in trees. *J Arboric* 29:66–78. <https://doi.org/10.48044/jauf.2003.009>

Ostrovský, R., Kobza, M. and Gažo, J. (2017). “Extensively damaged trees tested with acoustic tomography considering tree stability in urban greenery,” *Trees* 31, 1015–1023 (2017). DOI: 10.1007/s00468-017-1526-6

Palma, S. S. A.; Gonçalves, R. (2022) Tomographic images of tree trunks generated using ultrasound and post-processed images: Influence of the number of measurement points. *BioResources* 17: 6638-6655

Palma, S.S.A.; Gonçalves, R.; Trinca, A.J.; Costa, C.P.; Reis, M.N.; Martins, G. A. (2018). Interference from knots, wave propagation Direction and effect of juvenile and reaction wood on velocities in ultrasound tomography. *BioResources*, 13(2), 2834-2845.

Palma, S. S. A.; Reis, M. N.; Gonçalves, R. Tomographic Images Generated from Measurements in Standing Trees Using Ultrasound and Postprocessed Images: Methodological Proposals for Cutting Velocity, Interpolation Algorithm and Confusion Matrix Metrics Focusing on Image Quality. *Forests* 2022, 13, 1935. <https://doi.org/10.3390/f13111935>

Perlin, L. P., de Andrade Pinto, R. C., & do Valle, Â. (2019). Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, 229, 116958. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116958

Reis, M.N.; Gonçalves, R.; Brazolin, S.; Palma, S.S.A. (2022). Strength loss inference due to decay or cavities in tree trunks using tomographic imaging data applied to equations proposed in the literature. *Forests*, 13, 596.

Schubert, S.; Gsell, D., Dual, J.; Motavalli, M.; Niemz, P. (2009) Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforschung* 63:107–112

Soge, A. O., Popoola, O. I., & Adetoyinbo, A. A. (2021). Detection of wood decay and cavities in living trees: A review. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 937-947. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340>.

Srivanit, M., & Kaewkhaw, S. (2024). A machine learning-based protocol to support visual tree assessment and risk of failure classification on a university campus. *Urban Forestry & Urban Greening*, 99, 128420. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128420>.

Strobel J R A, Carvalho M A G, Gonçalves R, Pedroso C B, Reis M N, and Martins P (2018). “Quantitative image analysis of acoustic tomography in woods,” *European Journal of Wood and Wood Products* 76:1379-1389. DOI: 10.1007/s00107-018-1323-y

U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. Draft. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.

Vieira-dos-Santos-Ataide, G. C., dos-Santos-Ataide, D. H., Cerqueira-Martins, B., Monteiro-de-Carvalho, A., & de-Figueiredo-Latorraca, J. V. (2023). Historic urban trees: Assessing the trunk’s internal integrity. *Bosque*, 44(3), 481-491. DOI: 10.4067/s0717-92002023000200481

Wang, X. et al. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. USDA FS Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-147. US Dept. of Agriculture Forest Service. Washington, 2004.

Wang X, Allison RB (2008) Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. *Arboric Urban* for 34:1–4. <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.001>

Wang X, Wiedenbeck J, Liang S (2009) Acoustic tomography for decay detection in black cherry trees. *Wood Fiber Sci* 41(2):127–137

Wei, X., Sun, L., Zhou, H., Yang, Y., Wang, Y., and Gao, Y. (2020). “Propagation velocity model of stress waves in larch wood (*Larix gmelinii*) three-dimensional space with different moisture contents,” *BioResources* 15(3), 6680-6695. DOI: 10.15376/biores.15.3.6680-6695

Wei, X.; Xu, S.; Sun, L.; Tian, C.; Du, C. Propagation velocity model and two-dimensional defect imaging of stress wave in Larch (*Larix gmelinii*) wood. *Bioresources* 2021, 16(4), 6799-6813. DOI: 10.15376/biores.16.4.6799-6813

Wolf, Kathleen L., Lam, Sharon T., McKeen, Jennifer K., Richardson, Gregory R.A., Bosch, Matilda van den, Bardekjian, Adrina C. (2020). Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research* 17(12):4371

Wu, X., Li, G., Jiao, Z., & Wang, X. (2018). Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. *Applications in Plant Sciences*, 6(10), e01187. DOI: 10.1002/aps3.1187

Yıldızcan, E.N., Arı, M.E., Tunga, B. et al. (2024). Machine learning based tomographic image reconstruction technique to detect hollows in wood. *Wood Sci Technol* 58, 1491–1516. <https://doi.org/10.1007/s00226-024-01580-z>

6 ANEXO



Larissa Tiago Voipi <l255377@das.unioamp.br>

[Forests] Manuscript ID: forests-3632996 - Submission Received

1 mensagem

Editorial Office <forests@mdpi.com>

23 de abril de 2025 às 11:00

Responder a: forests@mdpi.com

Para: Larissa Tiago Voipi <l255377@das.unioamp.br>

Cc: Stella Stopa Assis Palma <stellaasp@unicamp.br>, Raquel Gonçalves <raquelg@unicamp.br>

Dear Ms. Voipi,

Thank you very much for uploading the following manuscript to the MDPI submission system. One of our editors will be in touch with you soon.

Journal name: Forests

Manuscript ID: forests-3632996

Type of manuscript: Article

Title: Velocity Thresholds for Ultrasonic Tomographic Imaging Aimed at Detecting Cavities and Decay in Trees

Authors: Larissa Tiago Voipi *, Stella Stopa Assis Palma, Raquel Gonçalves

Received: 23 Apr 2025

E-mails: l255377@das.unioamp.br, stellaasp@unicamp.br, raquelg@unicamp.br

Wood Science and Forest Products

https://www.mdpi.com/journal/forests/sections/Wood_Science

Advances in Wood Characterization and in Tree Sorting and Inspections:

Insights from Acoustic Testing and Tomographic Imaging

https://www.mdpi.com/journal/forests/special_issues/JXKZZDOLU3

We encourage you to provide an Author Biography on this publication's

webpage. Please click the following link to find the corresponding

instructions and decide whether to accept our invitation:

https://susy.mdpi.com/user/manuscript/author_biography/1d0b846b77c002f8b0db06eb8d2aa01

You can follow progress of your manuscript at the following link (login

required):

https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review_info/1d0b846b77c002f8b0db06eb8d2aa01

The following points were confirmed during submission:

1. Forests is an open access journal with publishing fees of 2600 CHF for an accepted paper (see <https://www.mdpi.com/about/apc/> for details). This manuscript, if accepted, will be published under an open access Creative Commons CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), and I agree to pay the Article Processing Charges as described on the journal webpage (<https://www.mdpi.com/journal/forests/apc/>). See <https://www.mdpi.com/about/openaccess> for more information about open access publishing.

Please note that you may be entitled to a discount if you have previously received a discount code, if your institute is participating in the MDPI Institutional Open Access Program (IOAP) (<https://www.mdpi.com/about/foap/>), or if a society you are a member of is part of our affiliation program (https://www.mdpi.com/societies_partnership). If you have been granted any other special discounts for your submission, please contact the Forests editorial office.

2. I understand that:

a. If previously published material is reproduced in my manuscript, I will provide proof that I have obtained the necessary copyright permission. (Please refer to the Rights & Permissions website: <https://www.mdpi.com/authors/rights>).

b. My manuscript is submitted on the understanding that it has not been published in or submitted to another peer-reviewed journal. Exceptions to this rule are papers containing material disclosed at conferences. I confirm that I will inform the journal editorial office if this is the case for my manuscript. I confirm that all authors are familiar with and agree with submission of the contents of the manuscript. The journal editorial office reserves the right to contact all authors to confirm this in case of doubt. I will provide email addresses for all authors and an institutional e-mail address for at least one of the co-authors, and specify the name, address and e-mail for invoicing purposes.

If you have any questions, please do not hesitate to contact the Forests editorial office at forests@mdpi.com

Kind regards,

Forests Editorial Office

Grosspeteranlage 5, 4052 Basel, Switzerland

E-Mail: forests@mdpi.com

Tel: +41 61 683 77 34

Fax: +41 61 302 89 18

*** This is an automatically generated email ***

Anexo 1: E-mail de confirmação da submissão do Artigo 1 em revista *open access*.