

UFRRJ

INSTITUTO DE FLORESTAS

DEPARTAMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA

MONOGRAFIA

**COMPARAÇÃO DE DOIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS INTERNOS NO
FUSTE DE ÁRVORES URBANAS**

LUIZ FELÍCIO PALERMO

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
DEPARTAMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA**

**COMPARAÇÃO DE DOIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS
INTERNOS NO FUSTE DE ÁRVORES URBANAS**

LUIZ FELÍCIO PALERMO

Sob a Orientação do Professor
Henrique Trevisan

Co-orientação da Professora
Bianca Cerqueira Martins

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Arborização Urbana**, no Curso de Pós-Graduação em Arborização Urbana, área de concentração em Engenharia Florestal

Seropédica, RJ
Setembro de 2022

P952c Palermo, Luiz Felício, 15/01/1975-
Comparação de dois métodos de avaliação de danos
internos em fuste de árvores urbanas / Luiz Felício
Palermo. - Seropédica, 2022.
70 f.: il.

Orientador: Henrique Trevisan.
Coorientadora: Bianca Cerqueira Martins.
Monografia(Especialização). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Arborização
Urbana, 2022.


1. Arborização urbana. 2. Risco de árvores urbanas.
3. Integridade do lenho. I. Trevisan, Henrique,
02/11/1976-, orient. II. Martins, Bianca Cerqueira,
05/08/1978-, coorient. III Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro. Pós-Graduação em Arborização Urbana.
IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARBORIZAÇÃO URBANA (*Lato sensu*)


Termo de aprovação da defesa de Monografia de Luiz Felício Palermo

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Arborização Urbana, no Curso de Pós-Graduação em Arborização Urbana (*Lato sensu*) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.


MONOGRAFIA APROVADA EM 05/09/2022

Documento assinado digitalmente
 HENRIQUE TREVISAN
Data: 17/10/2022 06:35:36-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Henrique Trevisan

Documento assinado digitalmente
 JOSE CARLOS ARTHUR JUNIOR
Data: 18/10/2022 12:07:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. José Carlos Arthur Junior

Documento assinado digitalmente
 FABIO SOUTO DE ALMEIDA
Data: 20/10/2022 21:48:11-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Fabio Souto de Almeida

“O melhor momento para plantar uma árvore foi há vinte anos, o segundo melhor momento é agora”.

Provérbio chinês

A DEUS,
Razão de Tudo, eternamente grato.

Em memória de minha amada avó DIVA MAMEDE VAZ,
minha inspiração;
Em memória de meu padrasto CAUBY MONTEIRO CRESPO,
meu amigo.

Dedico.

À minha amada esposa Gilmara Pires de Moura Palermo e meu ilustre filho Mateus de Moura Palermo, incrível presente Divino, os quais precisaram mais uma vez ser pacientes por minhas ausências em prol do desenvolvimento profissional.

À minha mãe Ariádine Vaz Palermo, por todo amor, carinho e zelo.

Em memória do amigo Alexandre Menezes que muito cedo deixou este plano material.

Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Às minhas irmãs Cláudia Paula Palermo e Viviane Vaz Crespo, meus cunhados Christian Breno W. Vilela e Evandro Cícero Gonçalves, e aos meus sobrinhos Mikael W. Palermo e Ana Flor Vaz Gonçalves.

Aos tios Zeca, Alvinho, Regina e Sandra, e também aos primos Diana de O. L. Vaz, Beatriz Gomes Vaz, Pedrinho Vaz, Alex Fatá, Cristina Fatá, Mary Fatá, Rondon M. Fatá, Karen A. Fatá, Karina A. Fatá, Marili Ismael, Tâmara Ismael, Muniro Ismael, Sandrinho Ismael, Cláudio A. Ismael, Maurício Pacheco, Rosina Palermo Vignes, Cristina Palermo, Camila Palermo Tobler, Juliana Palermo Tobler e Marcos Palermo pela torcida e apoio.

Ao grande irmão e amigo Asélio Vieira Passos, por tudo. Sempre sábio, me fortalecendo a continuar em frente no crescimento pessoal. Obrigado.

Aos meus estimados amigos Vicente das D. M. Pinto, Luiz A. de Aguiar, Adevir Santorio, Marquinho, Hélder Sarmento, Alexandre Colonese, Cláudio F. S. Vaz, em especial, bem como os de sempre quanto os mais recentes, os quais não necessito arrolar neste curto espaço de papel, pois sabem que o são.

Aos meus amigos da Primeira Turma PGAU/UFRRJ, pessoas ilustres e profissionais altamente capacitados, com os quais pude usufruir da sabedoria durante os meses de curso e da amizade que perenizou a partir de então.

Aos meus sábios e dedicados orientadores Henrique Trevisan e Bianca Martins, por aceitarem meu convite e suportarem pacientemente minhas insuficiências.

Ao coordenador do PGAU/UFRRJ professor Dr. João Latorraca, um agradecimento especial, e a todos os insígnies professores e excelentes profissionais que se tornaram professores do Curso, pelo brilhantismo e dedicação, os quais certamente contribuíram muitíssimo para meu desenvolvimento acadêmico e aprimoramento profissional. Muito obrigado.

Enfim, dedico este trabalho aos profissionais da arboricultura de todo país, os quais, cômnicos de sua responsabilidade e compromisso com a sociedade, muito além de apenas se debruçar sobre essa ciência, têm-na como um ofício relevante para oferecer mais qualidade de vida aos cidadãos dos centros urbanos.

BIOGRAFIA

Nascido no município do Rio de Janeiro em 1975, Luiz Felício Palermo cresceu e passou boa parte de sua infância e adolescência no bairro de Jacarepaguá, considerada a área mais campestre da capital, onde lhe foi oportuno conviver com os resquícios de agricultura que os habitantes mais idosos praticavam no local.

Fascinou-se pela agricultura, e por esse “estilo de vida”. Com isso, desde cedo, seu contato com a natureza e as coisas da terra lhe foram marcantes, mas também foi significativo perceber as dificuldades e situações de insegurança alimentar que rodeavam muitas dessas comunidades periurbanas.

Desta forma, interessou se profissionalizar em uma carreira que lhe propiciasse trabalhar de alguma forma para amenizar os problemas que investiam contra a dignidade daquelas pessoas. Com esse objetivo, em 1993, ingressa por vestibular na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro onde se forma engenheiro agrônomo em setembro de 1999.

Devido a várias vicissitudes, após sua formatura, não continua a vida acadêmica com a pós-graduação; assim inicia sua carreira profissional trabalhando como responsável técnico em fazenda produtora de citros na Região Serrana do RJ.

Logo após, ainda no Rio, adentra o campo das plantas ornamentais, se ocupando com a sua produção e comercialização. Depois de algum tempo, vai trabalhar em uma empresa de consultoria e planejamento agropecuário no estado do Espírito Santo, atuando como projetista para captar recursos junto aos pequenos agricultores familiares espírito-santenses. Concomitantemente, exerce a função de professor das disciplinas de biologia e química no ensino médio da rede estadual.

Tempos depois, volta ao estado do Rio de Janeiro onde trabalha com irrigação e máquinas agrícolas em uma empresa no território fluminense. Durante este mesmo período, também retorna ao ofício com as plantas ornamentais, paisagismo e jardinagem.

É admitido por concurso, no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), onde exerce o cargo de analista do censo demográfico do ano 2000. Completada essa tarefa, é aprovado em concurso para participar do programa de residência agrônoma, pelo qual trabalhou no Serviço de Sanidade Vegetal do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), local onde teve o primeiro encontro com o serviço de defesa sanitária vegetal, uma luta constante e silenciosa extremamente importante para a sociedade, para o país e para o Estado.

Após a residência agrônoma no MAPA, foi aprovado no concurso da então Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento, Pesca e Desenvolvimento do Interior (SEAAPI) do Rio de Janeiro. Nesta Secretaria, foi lotado na Coordenadoria de Defesa Sanitária Vegetal, onde exerceu suas atividades em dezenas de municípios fluminenses, e ocupou diversos cargos de coordenação até seu egresso em 2008, por ter sido admitido por concurso público no Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), no cargo de engenheiro agrônomo, sendo lotado na Superintendência Regional do estado do Rio de Janeiro. Nesta Autarquia passou por vários Setores, notadamente em serviços prestados aos agricultores familiares assentados da reforma agrária no território fluminense.

Voltando às lides acadêmicas, em 2010, se forma no curso de Mestrado Profissional em Agricultura Orgânica na UFRRJ e, em 2012, se forma na pós-graduação de Especialização em Estatística Aplicada na mesma Universidade.

Após quase uma década, Luiz F. Palermo retorna em 2021 para se aprimorar pela presente pós-graduação em um assunto pelo qual sempre fora fascinado - a arboricultura urbana -, ciência com a qual também acredita ajudar a favorecer a melhoria da qualidade de vida nas cidades.

RESUMO

PALERMO, Luiz Felício. **Comparação de dois métodos de avaliação de danos internos em fuste de árvores urbanas**. 2022. 72f. Monografia (Especialização em Arborização Urbana). Instituto de Floretas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

As árvores urbanas constituem infraestrutura estratégica para a manutenção de níveis satisfatórios de qualidade de vida para a população das cidades, especialmente por aumentar a resiliência das áreas urbanas em relação aos efeitos climáticos adversos. Não obstante, em que pesem os valiosos benefícios ecossistêmicos proporcionados, as árvores também estão sujeitas a intempéries que as transformam em perigo potencial nas áreas urbanas. A análise de risco de árvores urbanas é uma ferramenta de gestão necessária para orientar o manejo adequado aos entes arbóreos de modo a diminuir seu risco a patamares mínimos toleráveis. No Brasil, a Norma da ABNT NBR 16.246-3/2019 define três níveis de avaliação de risco de árvores urbanas, que vão desde uma avaliação mais geral, passando pela aplicação de protocolos técnicos de avaliação visual por indivíduo arbóreo, até o último nível com a utilização de equipamentos mais complexos e em muitos casos de custo elevado. Este trabalho tem objetivo de comparar dois métodos de avaliação de danos internos em fustes de árvores urbanas no sentido de gerar informações sobre as características de cada um, subsidiando a recomendação do seu uso por arboristas. Foram selecionadas dez árvores pertencentes a sete espécies botânicas, distribuídas no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, as quais foram submetidas a dois métodos de prospecção para avaliação da condição interna do caule, cujos resultados foram comparados entre si para verificar a equivalência do método proposto. As árvores foram submetidas a uma análise visual, que foi complementada com a técnica do martelo de borracha para detecção de eventuais cavidades internas no fuste. Após isso, foi aplicada a essas árvores a tomografia sônica por impulso. Por fim, foi utilizada uma perfuratriz equipada de broca para abertura de furos no caule das árvores, no interior dos quais foi introduzido o cabo de fibra ótica de um boroscópio para mensurar o comprimento em sentido transversal de lenho íntegro, possibilitando também a visualização de eventuais cavidades existentes. Ambas as técnicas proporcionaram a mensuração do percentual de danos no lenho das árvores, cujos resultados obtidos foram comparados pelo teste não paramétrico de Wilcoxon, que mostrou não ter havido diferenças estatísticas significativas no percentual de área lesionada empregando-se o método da perfuração e o da tomografia, especificamente para as regiões do tomograma condizentes com as menores velocidades de propagação de ondas mecânicas. Esse estudo demonstrou que a técnica da perfuração do fuste conjugada com a boroscopia para avaliação da condição do lenho se constitui em uma metodologia viável para auxiliar na análise de risco de árvores urbanas, podendo ainda ser usada de forma complementar à tomografia para confirmação de seus resultados.

Palavras-chave: Arborização urbana, Risco de árvores, Integridade do lenho.

ABSTRACT

PALERMO, Luiz Felício. **Comparison of two methods for evaluating internal damage in urban tree trunk**. 2022. 72p. Monograph (Specialization in Urban Afforestation). Instituto de Floretas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Urban trees constitute a strategic infrastructure for the maintenance of satisfactory levels of quality of life for the population of cities, especially by increasing the resilience of urban areas in relation to adverse climatic effects. However, despite the valuable ecosystem benefits provided, trees are also subject to weather conditions that make them a potential danger in urban areas. The risk analysis of urban trees is a necessary management tool to guide the proper management of tree entities in order to reduce their risk to minimum tolerable levels. In Brazil, the ABNT Standard NBR 16.246-3/2019 defines three levels of risk assessment of urban trees, ranging from a more general assessment, through the application of technical protocols of visual assessment per tree individual, up to the last level with the use of more complex equipments and in many cases of high costs. This work aims to compare two methods of evaluating internal damage in urban tree trunks in order to generate information on the characteristics of each one, supporting the recommendation of its use by arborists. Ten trees belonging to seven botanical species were selected, distributed on the campus of Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, which were subjected to two prospecting methods to evaluate the internal condition of the stem, whose results were compared to each other to verify the equivalence of the proposed method. The trees were submitted to a visual analysis, which was complemented with the rubber hammer technique to detect any internal cavities in the trunk. Then, impulse sonic tomography was applied to these trees. Finally, a drill was used to make holes in the tree stems, in which the fiber optic cable of a boroscopy was introduced to measure the length in the transversal direction of intact wood, also allowing the visualization of eventual existing cavities. Both techniques provided the measurement of the percentage of damage to the wood of the trees, whose results were compared by the non-parametric Wilcoxon test, which showed that there were no statistically significant differences in the percentage of injured area using the drilling method and the tomography, specifically for the regions of the tomogram consistent with the lowest propagation speeds of mechanical waves. This study demonstrated that the bole perforation technique combined with boroscopy to evaluate the condition of the wood constitutes a viable methodology to assist in the risk analysis of urban trees, and can also be used in a complementary way to tomography to confirm its results.

Keywords: Urban afforestation, Risk of trees, Wood intactness.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEPERJ	Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro
CID	Classificação Internacional de Doenças
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema único de Saúde
EBC	Empresa Brasil de Comunicação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
FPJ-Rio	Fundação Parques e Jardins do Rio de Janeiro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC	International Electrotechnical Commission
INEA-RJ	Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISA	International Society of Arboriculture
ISO	International Organization for Standardization
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Ministério da Saúde
ONG	Organizações Não Governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Plano Diretor
PDAU	Plano Diretor de Arborização Urbana
PMVA	Programa Município Verde Azul
PNAU	Política Nacional de Arborização Urbana
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
SBAU	Sociedade Brasileira de Arborização Urbana
SIURB	Sistema de Informações Urbanas da Prefeitura do Rio de Janeiro
SMAC	Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Cidade do Rio de Janeiro
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SUS	Sistema único de Saúde
UKRI	United Kingdom Research and Innovation
WEF	World Economic Forum
WRI	World Resources Institute

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

%	Porcentagem
Σ	Notação de somatório
AA	Análise de Agrupamento
APP	Área de Preservação Permanente
AU	Arborização Urbana
Cap	Circunferência à altura do peito
CF	Constituição Federal
cv	Cavalo-vapor
Dap	Diâmetro à altura do peito
g.l.	Graus de liberdade
GEE	Gases do efeito estufa
ha	Hectare
IN	Instrução Normativa
kg	Quilograma
km ²	Quilômetro quadrado
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PL	Projeto de Lei
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson amostral
R\$	Real
R ²	Ganho relativo na variância
rpm	Rotações por minuto
r _s	Coefficiente de correlação não-paramétrico de Spearman
s	Desvio padrão da amostra
s ²	Variância amostral
ton	Tonelada
UF	Unidade da Federação
VPOM	Velocidade de propagação de ondas mecânicas
W _{cal}	Resultado calculado do teste de Shapiro-Wilk
W _{tab}	Resultado tabelado do teste de Shapiro-Wilk
μ	Média aritmética da população
π	número pi (3,1415926)
ρ	Coefficiente de correlação linear de Pearson populacional
σ	Desvio padrão da população
σ^2	Variância da população

LISTA DE CONVENÇÕES

nd	Dado não disponível
---	Inexistência do dado
*	Significativo estatisticamente ao nível de 5%
**	Significativo estatisticamente ao nível de 1%
***	Significativo estatisticamente ao nível menor que 1%
negrito	Significativo estatisticamente ao nível dado

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1.	Características demográficas dos cinco municípios brasileiros com maior área urbanizada em 2015	19
Tabela 2.	Características dendrológicas dos espécimes arbóreos levantados no estudo	40
Tabela 3.	Classes de percentuais de área com prevalência de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas (LSa%), segundo Rollo (2010)	42
Tabela 4.	Dados climáticos médios referentes aos dias de prospecção das árvores	47
Tabela 5.	Parâmetros dendrológicos dos espécimes arbóreos levantados no estudo	47
Tabela 6.	Parâmetros dendrológicos dos espécimes arbóreos levantados no estudo	47
Tabela 7.	Percentuais de lenho possivelmente danificado (PDt) por região da escala de cores e PRM dos espécimes arbóreos levantados	51
Tabela 8.	Sumário estatístico descritivo dos conjuntos de dados	52
Tabela 9.	Resultados do teste de Shapiro-Wilk para as variáveis quantitativas	53
Tabela 10.	Matriz de coeficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os percentuais de danos no lenho obtidos pelos métodos da tomografia (PDt e PRM) e pela perfuração	53
Tabela 11.	Resultados do teste de Wilcoxon comparando os percentuais de dano pela tomografia e perfuração	54
Tabela 12.	Parâmetros relacionados à parede residual medida com a perfuratriz/boroscopia e estabilidade mecânica da árvore	59
Tabela 13.	Correspondências entre os dados obtidos com o teste do martelo e com o método da perfuração	60
Tabela 14.	Sistematização dos dados de acordos e desacordos entre os métodos do martelo e da perfuração	60
Tabela 15.	Resultados do teste de kappa de Cohen para os métodos do martelo e da perfuração	60
Tabela 16.	Correspondências entre os dados obtidos com o teste do martelo e com o método da perfuração	61
Quadro 1.	Relação de instrumentos passíveis de serem utilizados para avaliação de risco de árvores .	36
Quadro 2.	Relação dos espécimes arbóreos levantados no estudo	40
Quadro 3.	Vantagens e desvantagens dos métodos da perfuração e da tomografia para avaliação do lenho	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Evolução do percentual de urbanização da população do Brasil e no Mundo em 110 anos	17
Figura 2.	Localização e dimensão das áreas urbanizadas no Brasil em 2015	18
Figura 3.	Percentual de domicílios urbanos com e sem arborização nas vias por região brasileira em 2010	19
Figura 4.	Evolução prevista das áreas urbanizadas no mundo de 1950 a 2030	20
Figura 5.	Percentual de cobertura arbórea (GVI%) e densidade demográfica em 30 cidades mundiais	21
Figura 6.	Localização dos indivíduos arbóreos levantados no estudo	39
Figura 7.	Árvore 1	41
Figura 8.	Árvore 2	41
Figura 9.	Árvore 3	41
Figura 10.	Árvore 4	41
Figura 11.	Árvore 5	41
Figura 12.	Árvore 6	41
Figura 13.	Árvore 7	41
Figura 14.	Árvore 8	41
Figura 15.	Árvore 9	41
Figura 16.	Árvore 10	41
Figura 17.	Uso do martelo de borracha para detecção de dano interno no caule	43
Figura 18.	Uso do tomógrafo de impulso	43
Figura 19.	Uso do perfurador mecânico e broca para detecção de dano interno no caule	43
Figura 20.	Uso do boroscópio	43
Figura 21.	Esquema para o cálculo do percentual de dano interno no caule	45
Figura 22.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 1	48
Figura 23.	Tomograma resultante – Árvore 1	48
Figura 24.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 2	48
Figura 25.	Tomograma resultante – Árvore 2	48
Figura 26.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 3	48
Figura 27.	Tomograma resultante – Árvore 3	48
Figura 28.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 4	49
Figura 29.	Tomograma resultante – Árvore 4	49
Figura 30.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 5	49
Figura 31.	Tomograma resultante – Árvore 5	49
Figura 32.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 6	49
Figura 33.	Tomograma resultante – Árvore 6	49
Figura 34.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 7	49
Figura 35.	Tomograma resultante – Árvore 7	49
Figura 36.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 8	50
Figura 37.	Tomograma resultante – Árvore 8	50
Figura 38.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 9	50
Figura 39.	Tomograma resultante – Árvore 9	50
Figura 40.	Gráfico de VPOM entre os sensores – Árvore 10	50
Figura 41.	Tomograma resultante – Árvore 10	50
Figura 42.	Perímetros determinados na Árvore 3 com o uso do <i>software</i> ImageJ	51
Figura 43.	Boxplot das distribuições de percentual de dano	52
Figura 44.	Dendrograma dos conglomerados de indivíduos arbóreos	54
Figura 45.	Resultado gráfico do teste de Wilcoxon	55
Figura 46.	Detalhe da profundidade do furo após crescimento de tecido de cicatrização em seu interior	58
Figura 47.	Fotos do boroscópio mostrando os detalhes dos túneis perfurados com a prospecção do caule	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Breve panorama da arborização urbana no Brasil e no Mundo	17
2.2 Árvores urbanas e risco associado	24
2.3 Métodos de avaliação de risco de árvores	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Local de Coleta dos Dados	39
3.2 Seleção dos Espécimes Arbóreos	39
3.3 Prospecção das condições internas do fuste dos espécimes arbóreos	41
3.4 Análises estatísticas	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	70

1. INTRODUÇÃO

As árvores urbanas são consideradas equipamentos urbanos e pertencem à categoria de infraestrutura verde, as quais, juntamente com o mobiliário urbano integram esse espaço ao lado da infraestrutura cinza (construções) e azul (corpos hídricos). São consideradas árvores urbanas todos os espécimes arbóreos que se desenvolvem dentro dos limites urbanos, sejam em calçadas, vias, canteiros, praças, parques, etc., tanto em área pública como privadas.

Muitos são os benefícios promovidos pelas árvores no ambiente urbano, com efeitos diretos no bem estar da população, a exemplo da filtragem dos poluentes atmosféricos, diminuição da temperatura em superfícies e no ar em geral, aumento da umidade relativa do ar, melhoria da permeabilidade do solo e drenagem nas vias, diminuição da poluição sonora, sombreamento, embelezamento e atração de fauna. Estudos confirmam que as árvores urbanas promovem prevenção na incidência de doenças cardiovasculares e melhoria da saúde mental dos cidadãos. O planejamento adequado da arborização urbana pode aumentar a resiliência das cidades frente aos eventos climáticos adversos, fazendo da arborização urbana um item condizente a, no mínimo, um dos dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU.

Não obstante, por ser um organismo vivo, portanto, sujeito a variados acometimentos, algumas vezes as árvores também podem se tornar problemáticas para o ambiente urbano, oferecendo riscos de queda de seu todo ou suas partes e podendo ocasionar prejuízos aos cidadãos e demais equipamentos urbanos. Grosso modo, resumindo-se as principais causas que elevam sobremaneira esses riscos, e que são sinérgicas entre si, tem-se o planejamento inadequado ou a falta dele, associado à má gestão da arborização, eventos climáticos severos e o ataque de pragas nas árvores.

Dessa forma, a avaliação do estado de higidez de espécimes arbóreos por profissionais qualificados e uso de técnicas apropriadas é fundamental para a detecção dos riscos de falha, em tempo de medidas corretivas serem tomadas para se diminuir ou elidir eventuais acidentes. Avaliar o risco de entes arbóreos envolve a aplicação de conhecimentos de diferentes áreas do saber, o que torna essa tarefa muito complexa, pois a decisão sobre o nível de risco que determinado indivíduo arbóreo e seu contexto representam deve ser feita com segurança o suficiente para equilibrar os fatores positivos que essa árvore oferece (seus serviços ecossistêmicos) com os fatores negativos que podem permanecer caso algum manejo de risco não seja adotado para reduzir o nível original a um nível de risco residual tolerável.

A NBR 16.246-3/2019 da ABNT contempla três níveis de análise de risco em árvores urbanas, sendo o primeiro mais geral e ligeiro, o segundo contemplando uma análise visual mais pormenorizada do indivíduo arbóreo, com levantamento de dados dendrológicos, do entorno, do alvo e uso de protocolos de análise visual, e o terceiro nível quando se faz necessário o uso de equipamentos de prospecção, escalada ou ferramental mais sofisticado. Certamente, a complementação da análise visual do risco de árvores urbanas com técnicas de prospecção interna de fuste e de ramos, sejam elas não invasivas, semi ou invasivas (como a perfuração, por exemplo), ou seja, passando de um nível II ao III da NBR/2019, fornece um aumento considerável na segurança para as avaliações de risco.

A maioria dos trabalhos realizados tem comparado entre si os resultados obtidos pelas ferramentas e técnicas altamente sofisticadas de avaliação interna do lenho de árvores, a exemplo da tomografia por impulso sônico ou de impedância elétrica, resistografia, penetragrafia, uso de raios-X, etc., geralmente com o objetivo de validação mútua das técnicas, notadamente da tomografia. Em grande parte desses trabalhos, onde foi muito forte a correlação encontrada, a tomografia foi considerada eficiente e eficaz para o diagnóstico das condições do lenho, sendo considerada uma técnica bastante confiável.

Assim, ainda é grande o desafio de se validarem técnicas mais acessíveis do ponto de vista econômico e que sejam equivalentes em eficiência e eficácia em relação às técnicas mais sofisticadas. Equipamentos e ferramentas mais simples de prospecção de fuste podem custar em torno de 3% do custo total de aquisição de aparelhos sofisticados. Entretanto, algumas técnicas de menor custo, a exemplo da prospecção empregando-se furadeiras, não são seguramente indicadas pela norma vigente. Portanto, é possível que devido ao fato de a técnica da perfuração do fuste utilizando-se ferramentas como furadeiras ou perfuratrizes ser uma técnica invasiva e não recomendada na Norma NBR 16.246-3/2019 da ABNT, salvo em algumas situações, são poucos os trabalhos que comparam os resultados obtidos com essa técnica validando-a com equipamentos mais sofisticados como o tomógrafo, resistógrafo e penetrógrafo.

Dos fatores geralmente considerados pelas principais metodologias de avaliação do risco das árvores (possibilidade de falha, condições ambientais, possibilidade de impacto e caracterização do alvo), a técnica estudada no presente trabalho, uma adaptação à metodologia que fora originalmente elaborada por Zorzenon e Campos (2014), procura contribuir com o diagnóstico do risco de falha que o ente arbóreo oferece devido aos defeitos apresentados, notadamente nos locais lenhosos de sua estrutura tais como o fuste e ramos.

Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de comparar dois métodos de avaliação de danos internos em fustes de árvores urbanas – a tomografia por impulso e a perfuração de tronco associada à boroscopia – no sentido de gerar informações sobre as características de cada um de modo a subsidiar seu emprego por arboristas. Além disso, são também objetivos do presente trabalho analisar a técnicas de avaliação da integridade do lenho de árvores urbanas, analisar a integração dessas duas técnicas de avaliação interna do fuste de árvores urbanas e analisar a técnica da perfuração como uma ferramenta de avaliação de risco de árvores.

Dessa forma, busca-se com isso assegurar que a metodologia da perfuração seja viável técnica e economicamente, bem como de fácil utilização pelos profissionais da arboricultura, de modo a lhes permitir minimamente a ampliação do rol de ferramentas de diagnóstico confiáveis para suas avaliações de risco.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Breve Panorama da Arborização Urbana no Brasil e no Mundo

Urbano, cuja etimologia no latim - “urbanus” significa “da cidade”, apresenta as seguintes definições, em sua essência, encontradas no dicionário e que mais coadunam com o objeto do trabalho em epígrafe: “relativo ou pertencente à cidade, ou que lhe é próprio”; e “que tem caráter de cidade” (HOUAISS, 2001). Por extensão, e segundo essa abordagem político-territorial, as árvores urbanas são aquelas que se desenvolvem dentro do perímetro das áreas urbanas.

O mundo vem passando por um crescente processo de urbanização há séculos, processo esse intensificado a partir da primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, e fortemente acelerado nas últimas sete décadas, notadamente nos países subdesenvolvidos.

Estimativas da ONU apontam que a população nas cidades alcance cerca de 60% da população mundial até o ano de 2030 e cerca de 70% até 2050 (ONU, 2019). Considerando que, segundo alguns autores, a população urbana mundial correspondia a pouco mais de 2% do total até o ano de 1800, tem-se uma ideia do pujante crescimento populacional nas cidades. A migração de pessoas das áreas rurais para as cidades, impulsionada em parte pelos atrativos que essas últimas oferecem (por conjugar vários serviços, comércio, incentivo à vida cultural, sentimento de proteção coletiva, etc.) somada às dificuldades ainda inerentes ao meio rural, notadamente no caso brasileiro, vem assegurando uma taxa de urbanização crescente ao longo dos anos.

A **figura 1** mostra a evolução da taxa de urbanização no Brasil e no mundo desde a década de 1950 e a projeção estimada para 2050. Os dados de urbanização brasileira para os anos de 2040 e 2050 foram mantidos como sendo o de 2030 por falta de dados concretos nessa estimativa, porém, segundo o IBGE (2020), a partir de meados do ano 2040 a população total brasileira tende a um pequeno decréscimo devido principalmente ao envelhecimento, dado pelo incremento na idade mediana dos habitantes e o declínio da taxa média de fecundidade, sendo esse um fator sugestivo para a manutenção da taxa de urbanização nesses patamares.

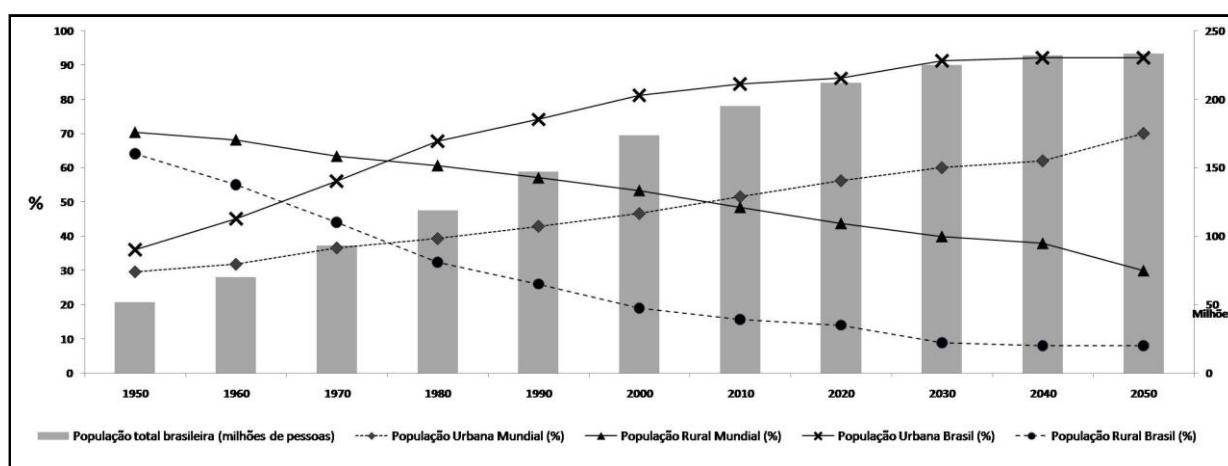


Figura 1. Evolução do percentual de urbanização da população do Brasil e no Mundo em 100 anos.

Fonte: Adaptado de DIEESE/MDA (2011); IBGE (2020); ONU (2019); GAETE (2015).

A taxa de urbanização varia de acordo com as regiões brasileiras, sendo em ordem decrescente: Região Sudeste (92,9%), Centro-Oeste (88,8%), Sul (84,9%), Norte (73,5%) e Nordeste (73,1%), segundo o último censo demográfico do IBGE (2010).

Farias *et al.* (2017), delimitando e mapeando as regiões urbanizadas do país, estimaram que a superfície urbanizada do Brasil, em 2015, ocupava 54.077 km², aproximadamente 0,63% da área oficial do território brasileiro (**figura 2**).

A título de análise da evolução do crescimento das áreas urbanas no Brasil, esses mesmos autores, citando outros dois estudos distintos, em que pese a provável inexatidão dos estudos passados, ressaltam que em 2005 a superfície efetivamente urbanizada no país correspondia a algo em torno de 21.000 km² (aproximadamente 0,24% do território nacional). Assim, em onze anos (2005 a 2015), a superfície coberta por áreas urbanas no país cresceu 257%, ao passo que a densidade demográfica no período dado declinou de 7.252 habitantes.km⁻² para 3.203 hab.km⁻².

O indicador densidade demográfica é relevante nesse tipo de estudo comparativo, porquanto informa se o aumento populacional nas cidades está sendo ou não acompanhado de um aumento de área superficial urbana. Grosso modo e desconsiderando outros fatores obviamente, caso ocorra aumento da área urbana à proporção que se aumenta a população nesse espaço, a densidade demográfica urbana tende a permanecer constante ou mesmo declinar, diluindo o inchaço populacional.

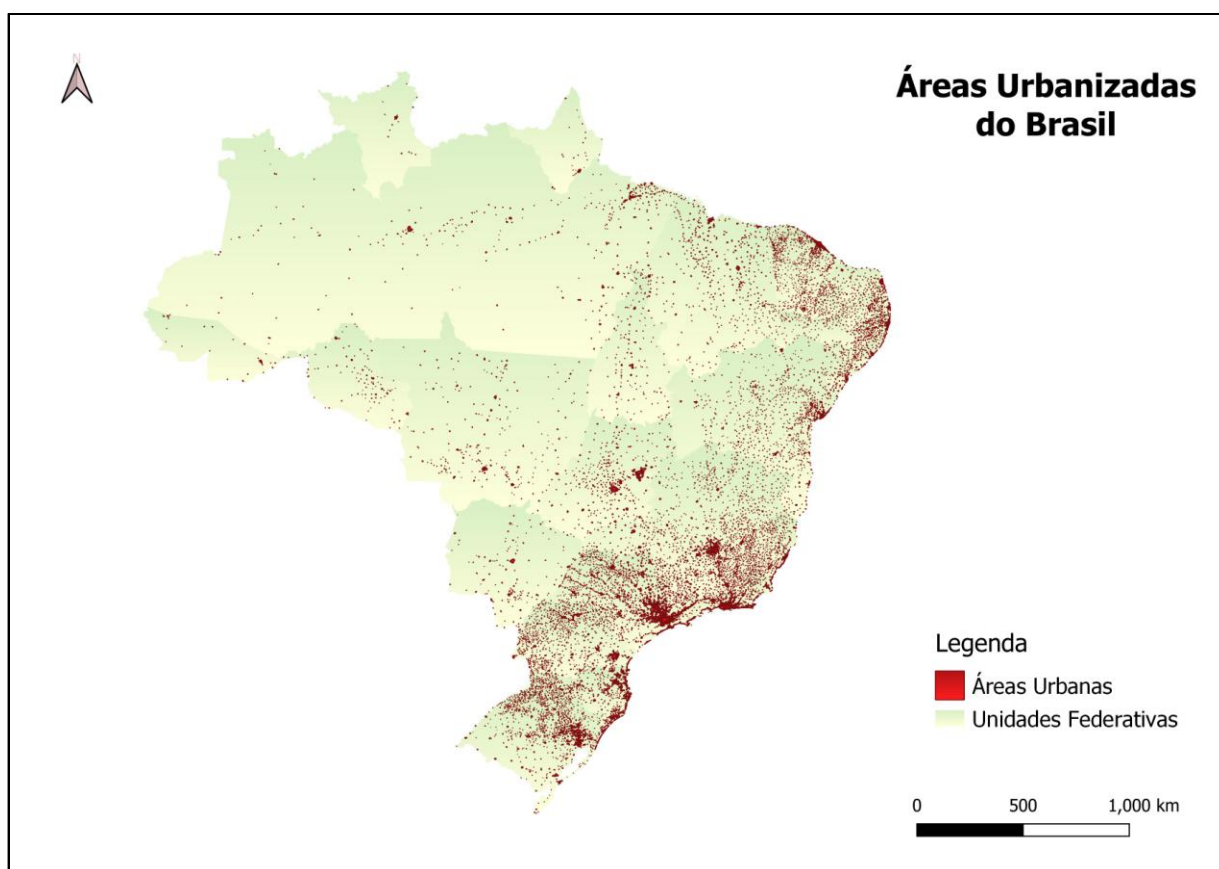


Figura 2. Localização e dimensão das áreas urbanizadas no Brasil em 2015.

Fonte: Adaptado de Embrapa Gestão Territorial (Geoinfo/CNPM, 2018).

A **tabela 1** apresenta as principais características demográficas dos cinco municípios brasileiros com maior superfície urbanizada no ano de 2015 segundo o estudo de Farias *et al.* (2017).

Tabela 1. Características demográficas dos cinco municípios brasileiros com maior área urbanizada em 2015.

Município	População total (habitantes)	População urbana (habitantes)	Superfície territorial (km ²)		Densidade Populacional (habitantes.km ⁻²)	
			Total	Área Urbana	Total	Urbana
São Paulo	11.253.503	11.152.344	1.521,202	950	7.397,8	11.739,3
Rio de Janeiro	6.320.446	6.320.446	1.200,329	925	5.265,6	6.832,9
Brasília	2.570.160	2.482.210	5.760,784	889	446,1	2.792,1
Manaus	1.802.014	1.792.881	11.401,092	427	158,1	4.198,8
Goiânia	1.302.001	1.297.076	729,296	422	1.785,3	1.778,5

Fonte: Adaptado de Farias *et. al.* (2017); IBGE (2022). **Nota:** A população residente é baseada no Censo 2010 (IBGE, 2010). Considerando que a quantidade de habitantes fora pautada no Censo 2010, e a área superficial urbana calculada para 2015, pode haver leve discrepância na densidade populacional da área urbana.

No ano de 2010, de acordo com o IBGE (2022), os cinco municípios listados na tabela 1 apresentavam, em ordem decrescente, os seguintes percentuais de domicílios urbanos com disponibilidade de arborização nas vias urbanas onde se inseriam: Goiânia (89,3%), São Paulo (74,8%), Rio de Janeiro (70,5%), Brasília (36,9%) e Manaus (23,9%).

O gráfico da **figura 3** a seguir ilustra o percentual de domicílios inseridos em vias urbanas que apresentam arborização, para o país e nas grandes regiões brasileiras no ano de 2010.

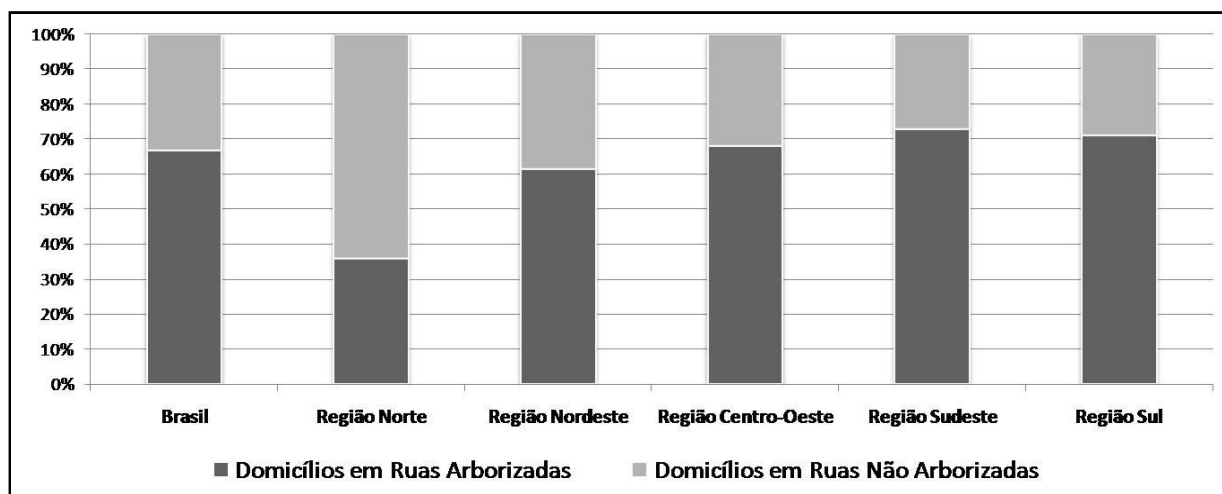


Figura 3. Percentual de domicílios urbanos com e sem arborização nas vias por região brasileira em 2010.

Fonte: Adaptado de IBGE (Censo Demográfico, 2010).

A Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios (PUED), realizada pelo IBGE, que mapeia a infraestrutura urbana a totalidade dos 5.570 municípios do Brasil foi iniciada no último dia 20/06/2022, e os dados recolhidos irão compor o Censo Demográfico 2022. Esses dados fornecerão um panorama da infraestrutura urbana do país, ao abordar questões como acessibilidade, circulação, equipamentos públicos e meio ambiente. Para tanto, serão avaliados os seguintes quesitos, sendo os três primeiros inéditos em relação ao último censo de 2010: ponto de ônibus, sinalização viária para ciclistas, obstáculo nas calçadas, capacidade da via, pavimentação da via, bueiro/boca de lobo, iluminação pública, existência de calçada, rampa para cadeirante e arborização. Esses dados irão gerar, em composição com os dados a serem coletados pelo Censo 2022, com início para agosto/2022, informações importantes para a elaboração de políticas públicas necessárias para o meio urbano a partir de 2023 (EBC/AGÊNCIA BRASIL, 2022).

Em termos mundiais, a superfície urbanizada no planeta corresponde a aproximadamente 3% do espaço territorial total (ALVES, 2021), e o mapa da **figura 4** mostra a evolução estimada da distribuição da população nas áreas urbanas no mundo no período de 1950 a 2030, com base nos dados da ONU de 2018.

Com a preocupante previsão de as cidades mundiais, até 2050, terem cerca de 6,5 bilhões de pessoas, ocupando 3% da superfície do território do planeta, sendo responsáveis por 75% do consumo mundial de energia e 70% da emissão de GEEs, várias instituições pelo mundo, inclusive, no Brasil, por exemplo a FIRJAN e outras, são signatários importantes do Pacto Global pelo Clima, com a implantação da Agenda 2030, através dos ODS. Empresas do sistema bancário brasileiro e de investimentos também estão incluindo em suas agendas as chamadas “ESG” ou estratégias que abordam as temáticas ambientais, social e de governança em suas operações, inclusive submetendo a concessão de créditos ao compromisso ambiental dos tomadores.

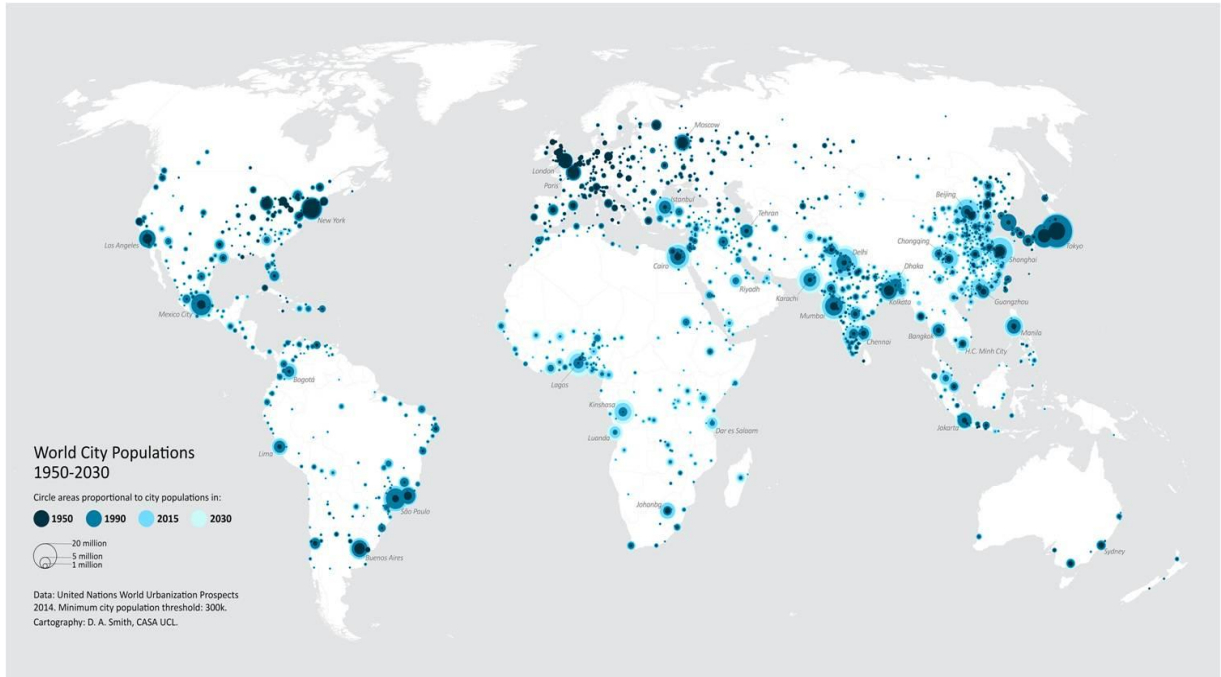


Figura 4. Evolução prevista das áreas urbanizadas no mundo de 1950 a 2030.

Fonte: <https://external-preview.redd.it/7-Ai3bGo1Dq2dmUQKIsGDqOvJUJeIzVB6KWGgzep7h4.png?auto=webp&s=0b22d37a6aab11e732041886f3a0c2af9a559a23>, acesso em 05/06/2022.

O Treepedia®, um site com algoritmos desenvolvidos pelo laboratório *Senseable City Lab* do MIT (Cambridge, EUA) em parceria com o Fórum Econômico Mundial, estima o dossel arbóreo nas cidades pelo mundo através do cálculo do índice conhecido por “Green View Index – GVI”, cuja escala de valores varia de 0 a 100%, sendo este último valor a cobertura total pelo dossel. O Treepedia usa imagens de rua (através do *Google Street View*) para a percepção do verde urbano, portanto com um ponto de vista ‘de baixo para cima’, não contando, entretanto, a quantidade de árvores, mas sim de cobertura percebida pelo transeunte. O Treepedia também não mapeia as áreas verdes contidas em parques, somente nos espaços viários urbanos. O gráfico da **figura 5** a seguir, apresenta o percentual de cobertura arbórea (através do GVI) e da densidade demográfica em trinta importantes cidades no mundo (MIT/WEF, 2022).

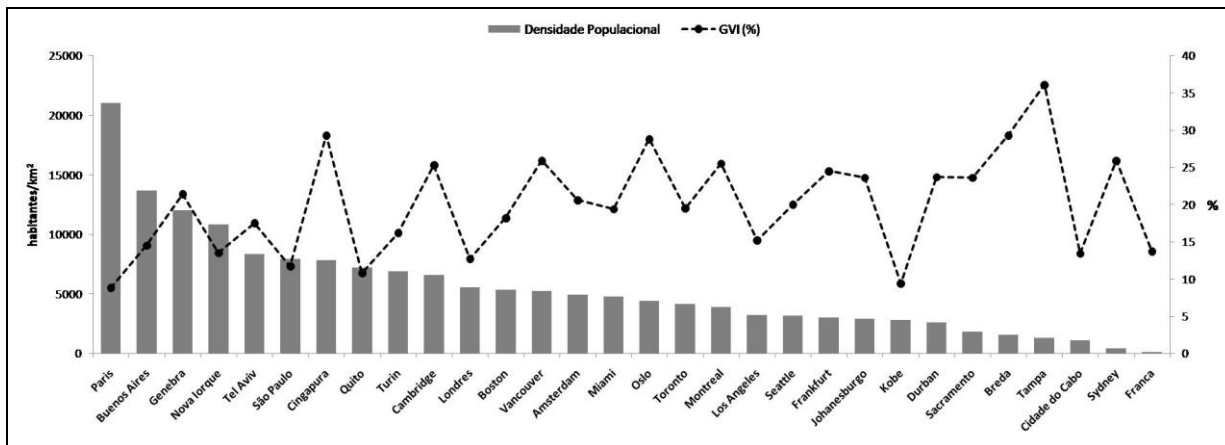


Figura 5. Percentual de cobertura arbórea (GVI%) e densidade demográfica em 30 cidades mundiais (hab.km⁻²).
Fonte: Adaptado de Treepedia (MIT/WEF, 2022).

Semelhantemente à tendência explicitada pelo gráfico da fig. 5, Lüttge & Buckeridge (2020), correlacionando o banco de dados demográficos e de cobertura arbórea nas 27 maiores cidades do mundo através dos dados do Treepedia®, descartando-se os *outliers*, encontraram uma correlação negativa entre a densidade demográfica com o percentual de cobertura por árvores. Cumpre destacar que o resultado encontrado por esses autores contrasta com o resultado da correlação linear entre o percentual de domicílios com disponibilidade de arborização urbana e a densidade demográfica das cinco cidades brasileiras listadas na tab. 1, a qual foi positiva e significativa, devendo-se essa divergência provavelmente às metodologias usadas para cada estudo, pelas condições efetivas das cidades analisadas em cada estudo, pela diferença cronológica na aquisição dos dados ou ainda pelo tamanho reduzido da amostra com cinco elementos da tab. 1.

À proporção que a urbanização cresce mundialmente arrastam-se os problemas inerentes para as cidades tais como redução do espaço livre por habitante, problemas de saneamento básico, disposição dos resíduos sólidos, tratamento de efluentes, formação de ilhas de calor, ocorrência de enchentes, aumento da criminalidade, conturbação do trânsito, aumento dos casos de doenças, notadamente as cardiorespiratórias associadas com a poluição urbana, aumento da demanda e distribuição de água e energia, etc. No atual ritmo de crescimento populacional, estima-se que o consumo de recursos naturais dobre a cada vinte anos no planeta.

Os conceitos de “cidade 3D” e sua antítese “cidade 3C” são bastante atuais quando se discute sobre a transformação urbana mundial. O epíteto 3D refere-se às palavras ‘distante’, ‘dispersa’ e ‘desconectada’, dizendo respeito a um modelo de crescimento urbano que se intensificou na maioria das regiões brasileiras na década de 1970, e com certa similaridade em muitas cidades pelo mundo, o qual fora pautado no espraiamento e desordenamento urbano, trazendo os sérios problemas a essas regiões como os já citados anteriormente. Já na cidade 3C, seu epíteto refere-se às palavras ‘compacta’, ‘conectada’ e ‘coordenada’, ou seja, uma cidade em que seu crescimento territorial é compacto, com infraestrutura conectada, formando um verdadeiro tecido social e de serviços entre as diversas áreas, e de gestão coordenada.

O caminho para a conversão de cidades 3D em 3C, com a garantia dos benefícios que isso pode oferecer aos cidadãos, passa essencialmente pela questão da mobilidade, a qual favorece a interconexão dos diversos espaços urbanos. Para tanto, uma estratégia de planejamento conhecida por DOTS (Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável), que integra o planejamento do uso do solo à mobilidade urbana, pode ser incluída na elaboração ou nas revisões dos planos diretores municipais com o objetivo de viabilizar a conversão de 3D em 3C. A aplicabilidade desses conceitos para a arborização urbana é traduzida pelo fato de um dos oito elementos do DOTS para a promoção do desenvolvimento sustentável urbano ser a valorização e incremento de espaços públicos e infraestrutura verde (EVERS *et al.*, 2018).

Para tentar frear ou atenuar os efeitos negativos do crescimento urbano, foram pensadas e implementadas diversas iniciativas por instituições, pessoas e organizações pelo mundo, notadamente a ONU e suas correlatas, as quais têm em comum as soluções baseadas na natureza (SBN), por exemplo, o incremento do verde nas cidades, em particular da arborização urbana.

Dentre inúmeras iniciativas bem sucedidas pelo mundo a exemplificar, cabe citar o caso de solução com fulcro em infraestrutura verde tais como arborização, bosques e florestas urbanas que ocorreu na cidade de Manchester, a primeira do Reino Unido a qual, por influência de movimentos ambientalistas expressivos, declarou emergência climática em 2019. Nessa época, foi lançado na cidade de Manchester um plano ambiental com duração de um quinquênio que propôs a neutralidade do balanço de carbono até o ano de 2038 e, para tanto, a estratégia focou na melhoria da gestão de florestas e árvores da região, por serem reconhecidas para aumentar a resiliência da cidade aos riscos climáticos.

Algumas outras iniciativas interessantes que focalizam o incremento e manutenção de florestas urbanas em várias cidades pelo mundo podem ser citadas, como o “Cities 4 Forests” (ou simplesmente C₄F), cuja rede abrange cerca de 70 cidades, sendo aproximadamente 15% desse total constituído por municípios brasileiros; a “Aliança Bioconexão Urbana” que é uma iniciativa de oito organizações renomadas, com foco de disseminar o conceito de SBN para tornar as cidades mais resilientes aos desequilíbrios climáticos; o “C40”, rede de prefeitos de quase 100 importantes cidades mundiais (quatro das quais são brasileiras), criado em 2005 (inicialmente denominado como ‘C20’ por terem aderidas 20 cidades), cujo objetivo, embasado na visão de um *Global Green New Deal* (Novo Acordo Verde Global) para resiliência e equidade das cidades, é a redução pela metade de emissões de gases de efeito estufa até 2030 com a implementação de várias estratégias verdes, incluindo as florestas urbanas; e a “Trees for Cities”, organização sem fins lucrativos, criada no Reino Unido na década de 1990, e com abrangência internacional, que tem por objetivo precípua o plantio de árvores nas cidades pelo mundo.

Além das grandes iniciativas citadas, importante também destacar aquelas iniciativas privadas de voluntariado ligadas ao Terceiro Setor, mais voltadas aos projetos sociais ao nível de bairros e que lidam diretamente com a temática da arborização urbana como forma de melhoria ambiental das cidades, a exemplo dos coletivos de arboristas urbanos que atuam no município do Rio de Janeiro, os quais vêm realizando relevantes avanços em florestamento urbano.

Van den Bosh (2021) criou uma regra paramétrica conhecida por “3-30-300”, que se traduz como uma diretriz mundial em arborização urbana, segundo a qual toda pessoa deve ser capaz de visualizar pelo menos três árvores de sua casa, que as cidades devem ter pelo menos 30% de sua superfície coberta por copa de árvores e as pessoas devem ter um parque ou área verde de qualidade dentro de um raio de 300 metros de onde residem.

Um conceito que vem ganhando espaço e sendo implementado em algumas importantes cidades do mundo é o de *rewilding* urbano, que vem a ser a concentração dos esforços em atividades de conservação que visem restaurar e proteger os processos naturais e áreas selvagens, porém sem interferência humana demasiada, a não ser no planejamento do design desses locais, na implantação e manutenção mínima, de modo que possam oferecer os benefícios ambientais esperados. Ou seja, trata-se de uma modalidade de restauração de ecossistemas que enfatiza a recriação do estado selvagem de uma área, nesse caso o espaço urbano, que passa a contar com o aumento da biodiversidade e de um ambiente mais autossustentável. Nesse modelo de design urbano as árvores têm papel fundamental. Por exemplo, citam-se as cidades de Milão (Itália), Frankfurt (Alemanha), Londres (Reino Unido) e Cingapura onde existem iniciativas locais exitosas que se utilizam desse conceito ecológico em seu design urbano (MRV&CO/HABITABILITY, 2022).

Não obstante o que trata o parágrafo anterior, o planejamento das cidades, coerente com estratégias de integração, como o DOTS e outras, por exemplo, podem ajudar a reduzir o

problema da horizontalização das cidades (espraiamento), que, apesar de torná-las verticalizadas e densas, dotá-las-iam de áreas verdes públicas ou mesmo privadas estrategicamente desenhadas, cumprindo assim um papel mitigador dos desafios que um adensamento populacional sem qualquer plano poderia oferecer. Ou seja, implantar a compactação acompanhada de conexão e coordenação, com o objetivo de tornar a correlação entre densidade demográfica e cobertura arbórea significativamente positiva (PACHECO, 2017).

A arborização pode ser considerada uma estratégia verde com prerrogativa de diminuir ou ainda elidir os problemas citados nos ambientes urbanos, tendo influência direta na promoção da saúde pública. Desde que implantada dentro de um planejamento coerente, são muitos os seus benefícios: diminui o coeficiente de deflúvio (*runoff*) propiciando maior infiltração da água no solo nas microbacias hidrográficas urbanas e reduzindo diretamente os problemas com enxurradas; diminui a erosão do solo; purifica e melhora a qualidade do ar através de mecanismos intrínsecos como a deposição, dispersão e modificação de partículas em suspensão; tem considerável efeito sobre a redução da temperatura do ar, da superfície nas cidades e na amenização dos extremos de temperatura do ar; embeleza a cidade; oferece abrigo e proteção à fauna silvestre; enriquece a biodiversidade local; incrementa o valor monetário de imóveis; reduz o gasto de energia para operação de ar-condicionado ou aquecedores residenciais; conserva a pavimentação de ruas e calçadas; proporciona espaços verdes trazendo bem estar aos cidadãos urbanos, aumentando o desenvolvimento cognitivo em crianças, do sentido de felicidade das pessoas e o nível de saúde física e mental geral da população e redução do estresse, reduzindo assim os custos em saúde pública, inclusive com redução nos casos de violência doméstica; oferece frutos para alimentação das pessoas; possui efeitos na redução do desemprego ao se gerar trabalho na área de cultivo e manutenção de árvores urbanas; sequestro de GEEs; incrementa o turismo, além de outros benefícios ecossistêmicos (PACHECO, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; UKRI, 2021; ARBOR DAY FOUNDATION, 2021; LÜTTGE & BUCKERIDGE, 2020; WRI BRASIL, 2020; WRI BRASIL, 2021; WANG; ZHOU; JIAO, 2022; ZHOU *et al.*, 2021; DIENER; MUDU, 2021; VIGEVANI *et al.*, 2022).

Importante ressaltar que, ao longo dos anos e por Instituições diferentes, foram conceituados índices de cobertura verde arbórea que seriam ideais para as cidades, *e.g.* o recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS), a qual define que a área verde deveria ser de no mínimo 12m² por habitante, tendo-se como ideal 36m² por habitante ou mesmo três árvores por habitante. Outro índice é o apontado pela SBAU, como sendo de 15m² por habitante. Segundo Velasco (2017), especificamente para o índice apresentado pela OMS, mas que parece se estender aos demais, não seria adequado se estribar em um índice pré-definido considerado ideal para todas as situações apresentadas pelas cidades, haja vista a necessidade de estudos pormenorizados das condições de cada área urbana, com seus microclimas respectivos, para se recomendar uma quantidade de área verde ideal através da arborização urbana.

Pelo exposto, devido serem muitos os aspectos positivos da arborização urbana, conforme mencionado, e à incontestável importância estratégica das árvores para a qualidade de vida nos ambientes urbanos, há uma tendência de que com o aumento e influência territorial das cidades pelo mundo também haja um correspondente crescimento das áreas verdes nesses locais, compostas notadamente por indivíduos arbóreos. Esse esperado e necessário crescimento verde tende a levar, por conseguinte e em primeira impressão, a um maior custo de manutenção ante a necessidade de intensificação do cuidado e manejo destinados a esses entes arbóreos.

Assim, não obstante os pontos positivos existem também algumas influências que as árvores podem exercer de forma negativa nas cidades, notadamente se a AU não for implantada conforme planejamento adequado, a saber: concorrência pelo espaço da calçada, concorrência no subsolo, causando conflitos com as redes de distribuição de água, telefonia, gás e esgoto, conflitos com equipamentos urbanos como os postes, placas, fiação telefônica, elétrica,

edificações; causa danos às edificações; interferência no trânsito de pedestres e/ou veículos; interferência com a rede de energia elétrica; interferências com iluminação de logradouros, ocasionando insegurança pública; entupimento da rede de drenagem pluvial; disseminação de pragas urbanas; presença de substâncias tóxicas nas partes da árvore expostas podendo acarretar em alergias e intoxicações aos cidadãos ou à fauna local; aumento dos gastos públicos com os custos de manutenção da arborização; acidentes, danos físicos e prejuízos financeiros causados pela queda de árvores e suas partes; presença de espinhos/acúleos; exalação de odores desagradáveis; abscisão de frutos, flores e folhas causando sujeiras nas ruas e calçamento; crescimento desordenado de raízes com quebra e obstacularização em calçadas; queda de árvores e ramos, dentre outros.

Dessa forma, associado à AU coexiste o risco de acidentes e desastres à população causados por danos ao calçamento, queda de frutos, de galhos ou mesmo da própria árvore, além de efeitos indiretos com a abscisão de folhas, por exemplo, que pode levar a entupimentos de bueiros, escorregões e tombos aos transeuntes.

Com bastante frequência são noticiadas quedas de árvores todos os anos nos principais centros urbanos do país, como consequência de eventos climáticos adversos, algumas das vezes acompanhadas de fatalidades, infelizmente. Esse fato traduz como o manejo correto da arborização urbana, fulcrado em um diagnóstico adequado da sanidade dos indivíduos arbóreos, é essencial para se diminuir os riscos e evitar acidentes.

2.2 Árvores Urbanas e Risco Associado

Caso não exista um planejamento ou mesmo for mal planejada, a arborização urbana pode oferecer mais prejuízos que benefícios, ao desencadear acidentes com pessoas, animais domésticos e ou mobiliário urbano. Esse risco aumenta à proporção que não forem observadas as normas existentes sobre arborização urbana, forem negligenciados os guias para gestão do verde nas cidades, se ocorrerem problemas fitossanitários ou ainda se o vandalismo aos entes arbóreos for prática corriqueira nos meios urbanos.

A Lei Federal n.º 10.257, de 10 de julho de 2001, foi criada para regulamentar os artigos 182 e 183 da Constituição Federal que tratam da política de desenvolvimento urbano e da função social da propriedade urbana, sendo conhecida como Estatuto da Cidade.

Notadamente, o artigo 182 da Carta Magna trata diretamente das condições de sustentabilidade das cidades brasileiras.

“Art. 182. A política de desenvolvimento urbano, executada pelo poder público municipal, conforme diretrizes gerais fixadas em lei, tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes.” (CONSTITUIÇÃO FEDERAL DO BRASIL, 1988).

O inciso VIII do art. 30 da Constituição Federal de 1988 confere ao poder público municipal a competência para promover o ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano.

“Art. 30 Compete aos municípios:

...

VIII – promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano;

...” (CONSTITUIÇÃO FEDERAL DO BRASIL, 1988).

Os dispositivos protetivos, fiscalização, de fomento e outros previstos no atual Código Florestal, Lei nº 12.651, de 25/05/2012 (BRASIL, 2012), apesar não tratar diretamente das florestas urbanas, não encontram óbices em sua aplicação também à infraestrutura verde nas

idades, haja vista a definição dada à área verde urbana no artigo 3º, inciso XX da referida Lei, conforme excerto a seguir. Nesse contexto, s.m.j., ficam contempladas as árvores urbanas nesses espaços.

“Art. 3º. ...

XX – área verde urbana: espaços, públicos ou privados, com predomínio de vegetação, preferencialmente nativa, natural ou recuperada, previstos no Plano Diretor, nas Leis de Zoneamento Urbano e Uso do Solo do Município, indisponíveis para construção de moradias, destinados aos propósitos de recreação, lazer, melhoria da qualidade ambiental urbana, proteção dos recursos hídricos, manutenção ou melhoria paisagística, proteção de bens e manifestações culturais;
...” (BRASIL, 2012).

O Estatuto da Cidade foi um marco no direito urbanístico brasileiro e sua promulgação, primeiramente dada pela inclusão do tema urbano na Constituição de 1988, foi impulsionada pelo acelerado crescimento urbano a partir dos anos 1960 e os consequentes problemas que esse vertiginoso crescimento acarretou para os centros urbanos do país. Constitui, portanto, em uma norma jurídica que trata de política voltada ao ordenamento do pleno desenvolvimento das funções sociais das cidades e da propriedade urbana, conforme versa em seu art. 2º, baseada em dezenove diretrizes gerais estratégicas, dentre as quais, aquelas listadas nos incisos IV, VI (essencialmente a alínea h), XII e XIII subtende-se possuírem interface sensível com a temática da gestão arbórea nas cidades, conforme transcrição a seguir.

“Art. 2º A política urbana tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, mediante as seguintes diretrizes gerais:

...

IV – planejamento do desenvolvimento das cidades, da distribuição espacial da população e das atividades econômicas do Município e do território sob sua área de influência, de modo a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente;

...

VI – ordenação e controle do uso do solo, de forma a evitar:

...

h) a exposição da população a riscos de desastres.

...

XII – proteção, preservação e recuperação do meio ambiente natural e construído, do patrimônio cultural, histórico, artístico, paisagístico e arqueológico;

XIII – audiência do Poder Público municipal e da população interessada nos processos de implantação de empreendimentos ou atividades com efeitos potencialmente negativos sobre o meio ambiente natural ou construído, o conforto ou a segurança da população; ...” (Estatuto das Cidades, 2001).

Dentre os instrumentos usados pelo Estatuto da Cidade para a implementação da política urbana tem-se o planejamento municipal, cuja principal ferramenta de gestão no âmbito municipal é o Plano Diretor, obrigatório para as cidades brasileiras com mais de vinte mil habitantes e com necessidade de revisão decenal.

O Plano Diretor é um mecanismo cujo objetivo precípua é criar equidade, sustentabilidade e qualidade de vida para as pessoas nas cidades, sendo que se para alcançar esse propósito, além de outras medidas, considera-se imprescindível incluir a temática da

arborização urbana em sua estratégia. Para tanto, a CF estabelece e o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/2001) detalha a elaboração de Plano Diretor pelos municípios com mais de 20 mil habitantes, sendo obrigatório que todos os demais normativos jurídicos que tratem da política urbana devem estar alinhados ao PD.

Pelo fato de a arborização urbana ser uma temática inerente à política urbana, existe o advento do Plano Diretor de Arborização Urbana (PDAU), como um instrumento específico de planejamento e gestão do verde arbóreo das cidades. Importa ressaltar que o instituto do PD, e muito mais ativamente o PDAU, possibilita a participação de técnicos capacitados em arboricultura para fundamentar a criação, execução, manutenção e fiscalização dos itens contidos no plano técnico-normativo, de modo que sirva como orientação permanente para os gestores públicos disponibilizarem os recursos e atividades necessárias à sua efetivação.

Assim, o PDAU, juntamente com outros instrumentos municipais, é minimamente considerado um norteador técnico oficial que visa o fomento plenamente fundamentado não somente para implementar o planejamento da arborização urbana no município mas implantá-la de forma coerente e segura, com foco no risco mínimo.

Através dos PDAUs pressupõe-se que a gestão da arborização urbana deva ser feita de forma participativa com a sociedade, porquanto a AU tem como objetivos a qualidade da arborização e a redução dos riscos no espaço urbano, com impacto positivo direto no bem-estar da coletividade. Não obstante, o PDAU é um instrumento que especifica sua ação para os indivíduos ou conjuntos arbóreos componentes das áreas urbanas dos municípios, a exemplo dos parques públicos, vias públicas, parques históricos, praças, etc., ao passo que outras categorias de áreas verdes são abordadas pela legislação específica (federal, estadual e municipal) e do SNUC.

Nespolo *et al.* (2020) realizando um levantamento do arcabouço normativo brasileiro abordando a arborização urbana, nas três esferas administrativas, já apontavam para o caráter de uma espécie de iniciativa social individual ou coletiva que gestores comprometidos em alguns municípios brasileiros apresentavam ao providenciarem a elaboração de programas, planos, manuais e projetos de arborização urbana em seus municípios, dada a falta, naquela época, de uma legislação federal centralizada que abrangesse exclusivamente esse tema. Segundo esses autores, muitos municípios do país, preocupados com a qualidade ambiental de suas regiões urbanizadas têm elaborado os seus guias nessa área.

Com a evolução da temática da AU no Brasil, a exemplo de várias cidades pelo mundo, que tiveram implementados planos de arborização similares, PDAUs foram instituídos em diversos municípios brasileiros, tais como o PDAU-Rio (RJ), que teve sua construção iniciada oficialmente em 2014, com a criação do grupo de trabalho através da Resolução SMAC-Rio 553/2014, culminando com a aprovação pelo Decreto Municipal nº 42.685, de 21/12/2016; o PDAU de Caxias do Sul (RS), aprovado pelo Decreto Municipal nº 21.200, de 28/09/2020; o PDAU de Campo Grande (MS), aprovado pela Lei Complementar nº 184, de 23/09/2011; de Salvador (BA), pela Lei nº 9.187/2017; além de Curitiba (PR), Goiânia (GO), Porto Alegre (RS), Erechim (RS), Bariri (SP), Santos (SP), Ijuí (RS), Lavras (MG) etc.

Em nível estadual, Nespolo *et al.* (2020) informam que em seis estados brasileiros foi oficializado um arcabouço legal próprio para a Arborização Urbana, a saber: Ceará, Paraíba, Paraná, Piauí, Santa Catarina e São Paulo. Sob essa ótica, uma iniciativa de sucesso é o caso do Programa Município Verde Azul (PMVA), instituída em nível estadual em São Paulo, no ano de 2007, com o objetivo de promover uma agenda ambiental aos municípios daquele estado, de modo que culmine na elaboração do “Plano Municipal de Arborização Urbana” (similar ao PDAU em sua concepção), e sua implementação por esses municípios.

Não obstante, em virtude dos primórdios das discussões sobre a criação de uma coluna normativa em nível federal ocorridas à época, como apontou Nespolo *et al.* em 2020, desde o Primeiro Encontro Nacional de Arborização Urbana que ocorreu em Porto Alegre (RS) em 1985, e com a ocorrência de várias iniciativas normativas embrionárias importantes ao longo dos anos, a lacuna dessa legislação federal específica sobre AU encontra-se sob a esperança de

ser preenchida se for aprovado o recente Projeto de Lei nº 4.309/2021, o qual, em seu art. 1º apregoa: “institui a Política Nacional de Arborização Urbana (PNAU), dispõe seus princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão e ao gerenciamento da arborização urbana”. Esse PL foi apresentado na Mesa Diretora da Câmaras dos Deputados (MESA) em dezembro/2021, passando em fevereiro/2022 à Comissão de Desenvolvimento Urbano (CDU), onde encontra-se atualmente, devendo ainda passar por mais três Comissões da Câmara (CMADS, CFT e CCJC) até ser apreciada pelo Plenário, após o que podendo seguir ao Senado e por fim à Presidência da República (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2022).

A PNAU está surgindo para suprir uma lacuna no arcabouço legal brasileiro em relação aos normativos que regulamentem a prática da Arborização Urbana no território nacional. Com a PNAU, dentre outras diretrizes, será possível a padronização de normas para a implantação da Arborização Urbana em nível municipal, a exemplo da obrigatoriedade de instituir o PDAU de forma orientada nesses municípios, com o objetivo de se fortalecer o planejamento da arborização urbana na totalidade do território brasileiro.

Por serem iniciativas adotadas por entes públicos (federais, estaduais e municipais) com o objetivo de garantir direitos sociais, bem-estar coletivo e qualidade de vida da população, os Planos Diretores, PDAUs, PNAU, Leis orgânicas, Códigos de postura, Códigos ambientais, Normas Técnicas, e outros instrumentos normativos são exemplos de políticas públicas dos tipos constitutivas e regulatórias, pois tanto podem definir as competências dos três entes federativos da República, quanto podem promover a postura fiscal e de condutas desses entes e da sociedade para assegurar o bem comum, respectivamente.

Convergindo a terminologia oferecida pela Norma ISO 45001/2018 (ISO, 2018), a qual aborda as questões relacionadas à segurança do trabalho, mas que possuem estreita aplicabilidade às questões ligadas à arborização, o termo perigo é conceituado como uma “fonte com potencial de causar lesões e problemas de saúde”, e o risco como um “efeito da incerteza”, sendo pois este último um conceito envolvendo as fontes do risco (perigos), probabilidades, eventos potenciais e suas consequências. Uma definição mais pragmática de risco é aquela que o considera como uma consequência negativa provável perante algum evento envolvendo o perigo.

Grosso modo, os perigos se identificam e os riscos são avaliados ou ainda mensurados, ou seja, para se avaliar ou aquilatar o risco, deve-se primeiramente identificar os perigos. Assim, a avaliação do risco, e seu enquadramento em categorias ou classes de maior ou menor grau, deve ser feita de acordo com sua severidade e a probabilidade de ocorrência. A severidade aborda o conceito de gravidade ao passo que a probabilidade de ocorrência diz respeito à frequência com que determinado evento ocorre. Dessa forma, perigos que representam gravidade alta e que tenham ocorrência frequente alçam os riscos a patamares elevados.

Seitz (2005) define árvore de risco como “toda árvore que apresenta defeitos estruturais que possam provocar acidentes por quebra de partes ou de toda a árvore”. Margeando esse conceito oferecido por Seitz, tem-se que ‘defeito’ pode ser definido sob a ótica da arborização como qualquer variação da característica considerada ideal em uma árvore, e ‘árvore defeituosa’ como sendo aquela que apresenta um ou mais defeitos. Assim, a avaliação de risco se fundamenta na comparação do quanto as condições da árvore em estudo (com seus defeitos) se distanciam das características consideradas ideais para a espécie naquele local.

Mensurar o risco que uma árvore representa para uma localidade qualquer depende, necessariamente, da identificação das condições em que se encontram esse indivíduo arbóreo, sejam essas condições estruturais, intrínsecas ao indivíduo, ou mesmo condições ambientais a que está sujeito e que podem agravar o seu estado.

Conforme a Norma NBR 16.246-3:2019, da ABNT, tem-se que o risco é o “efeito da incerteza nos objetivos”. Algumas definições de risco segundo a NBR são transcritas a seguir.

Nota 1: Um efeito é um desvio em relação ao esperado. Pode ser positivo, negativo ou ambos, e pode abordar, criar ou resultar em oportunidades e ameaças;

Nota 2: Risco é normalmente expresso em termos de fontes de risco, eventos potenciais, suas consequências e suas probabilidades;

Nota 4: O conceito de risco requer uma avaliação conclusiva, que atinja um limiar de gestão onde não é permitida a manutenção da situação” (ABNT, 2019).

Risco ainda pode ser definido, de modo ainda mais simples, como o “potencial, viabilidade, e/ou a probabilidade de se sofrer danos ou perdas” conforme apontam Duntemann & Stuart (2016).

Tendo em vista que as árvores são organismos biológicos, por sua vez dependentes das condições do meio para se desenvolver, é de se esperar que elas desenvolver-se-ão plenamente e com baixo índice de defeitos caso as condições ambientais lhes sejam favoráveis.

Entretanto, são muitos fatores que influenciam no risco representado pelas árvores urbanas, notadamente: ambientais (temperatura, umidade, ventos, chuvas, luminosidade, etc.), bióticos (pragas, homem, etc.), manejo, edáficos (condições químicas, físicas, biológicas e mineralógicas do solo), características estruturais da árvore, e características genéticas da espécie (predisposições várias, densidade da madeira, resistência, etc.).

As pragas são um fator cujo aparecimento, na maioria das vezes, não tem no homem uma dependência direta, sendo aleatório e de acordo com o estado de predisposição do indivíduo arbóreo associado a condições ambientais específicas. É difícil prever com precisão o seu surgimento ainda que medidas preventivas sejam tomadas e técnicas preditivas sejam implementadas. A depender da espécie de praga, do grau de injúrias, do seu local de ataque e dos danos que proporcionam ao vegetal, pode ser inevitável a remoção do indivíduo arbóreo para evitar que acidentes ocorram. E essa decisão torna-se ainda mais evidente pela limitação nos métodos de controle de pragas em ambiente urbano, notadamente pelo inexistente arsenal de substâncias e de organismos de biocontrole autorizadas para esse tipo de manejo em árvores urbanas no país.

Lüttge & Buckeridge (2020) consideram as árvores urbanas como entes tanto passíveis, pois estão sujeitos ao microclima das cidades, quanto ativos, por modificá-lo diretamente haja vista os serviços ecossistêmicos que fornecem.

Nesse sentido, esses autores sugerem a investigação científica da capacidade das árvores urbanas resistirem às condições adversas do ambiente, sejam elas a falta ou excesso de água, a poluição do ar (com a deposição nas folhas de metais particulados em suspensão no ar e por gases tóxicos), a infecção por fungos apodrecedores de madeira e a interferência antrópica nas propriedades biológicas do solo nas áreas urbanas, com o objetivo de identificar as espécies mais tolerantes às principais limitações encontradas nos ambientes estudados, de modo a diminuir os riscos associados com a eventual queda de árvores acometidas por aqueles problemas. Como fórmula geral de mitigação desses problemas, os autores propõem o uso de irrigação e de cobertura morta para as árvores urbanas, tornando propício o ambiente para seu desenvolvimento e expressão máxima de seus serviços benéficos para a sociedade.

As árvores influenciam mas também são afetadas pelas mudanças climáticas, como afirma Herms (2022). Segundo esse autor, as árvores, assim como o ser humano, sob mudanças climáticas repentinas, sofrem estresses consideráveis para se adaptar, podendo desencadear problemas fisiológicos, propensão ao ataque de pragas, enfraquecimento de ramos, do fuste e mesmo sua morte. Por si só, esses efeitos podem aumentar o risco de acidentes representado por esses entes. Por exemplo, as condições extremas de secas, inundações, temperaturas, incêndios, etc. podem ser os fatores que levam a essas consequências, exigindo cuidados especiais em seu manejo. Os efeitos diferem entre as diversas espécies de árvores, dividindo-as entre aquelas que estarão tolerando o estresse, adaptando-se às novas condições impostas, mostrando intenso crescimento, e aquelas que não se adaptam, sendo prejudicadas no seu

desenvolvimento. O autor também considera que o aquecimento global esteja promovendo a migração de pragas para regiões do planeta onde anteriormente eram ausentes ou estavam com sua população sob controle sem causar danos às árvores.

Os dados sobre acidentes envolvendo árvores urbanas no Brasil são escassos, o que não é diferente no restante do mundo. Esse fato se deve à dificuldade de se extrair os dados secundários dos sistemas de consulta existentes, de modo que sejam específicos para caracterizar os acidentes com árvores, pois a maioria das fontes disponíveis apresenta esses dados com a codificação da CID-10 (Classificação Internacional de Doenças da OMS – 10ª. Edição). Em que pese a relevância dessa codificação para a padronização da comunicação envolvendo os profissionais globais da área da saúde que pertencem aos estados membros da OMS (Organização Mundial de Saúde), ela não discrimina nas categorias relativas a lesões causadas por fatores externos aquelas relacionadas às quedas de árvores e ou suas partes. Com isso, a partir dos sistemas de consulta de dados referentes à saúde (mortes, invalidez, amputações, adoecimentos, etc.) disponível na rede mundial de computadores (a exemplo dos sistemas disponibilizados pelo DATASUS/MS do Brasil), não se tem informações precisas acerca dos casos relacionados à arborização urbana. Esse fato parece se repetir na mais recente edição da CID, a 11ª. (CID-11), em fevereiro de 2022, que também não oferece a discriminação supracitada, mas que possivelmente encontra-se em andamento a atualização dos novos códigos nos sistemas de consultas de dados de saúde dos países membros.

As informações sobre risco de árvores e acidentes envolvendo a AU é prejudicada pela ausência ainda de um sistema único no país que organize satisfatoriamente esses dados. Os PDAUs oferecem diagnósticos com dados consistentes sobre esse assunto, haja vista que um dos atributos do Plano é fazer um diagnóstico da arborização urbana apresentando um balanço entre os aspectos positivos e negativos, de modo a corrigir esses e potencializar aqueles, fazendo com que haja uma repercussão direta na redução dos riscos representados pelas árvores.

O diagnóstico ofertado no PDAU de Goiânia (GO), por exemplo, informou que com o convênio instituído desde 1997, das 133.061 árvores levantadas em 70 setores da cidade, verificou-se a necessidade de remoção imediata de 7.079 árvores (5,32% das árvores existentes) pelo fato de as mesmas terem apresentado riscos aos pedestres e veículos que transitavam pelos locais (PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIÂNIA, 2008).

O PDAU de Caxias do Sul (RS) apresentou um diagnóstico feito a partir do inventário realizado nos anos de 2014 a 2016, onde foram detectados que aproximadamente 49% dos indivíduos arbóreos levantados tinham conflito com a calçada e 15% dos indivíduos arbóreos com a fiação elétrica. De modo semelhante, o mesmo inventário identificou 530 indivíduos arbóreos mortos e 719 senescentes, com necessidade de supressão de modo a afastar os riscos à população (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAXIAS DO SUL, 2020).

Klechowicz (2001) diagnosticando os acidentes envolvendo árvores urbanas na cidade de Curitiba/PR encontrou que as árvores, direta ou indiretamente, foram responsáveis por 11,6% das causas de interrupções no sistema de distribuição de energia elétrica no ano de 1996. A autora detectou que 58% das árvores que causaram algum tipo de acidente eram de grande porte e que a altura média considerando o total das árvores levantadas foi de 12 metros. A autora avaliou que os galhos contemplaram 85% dos acidentes analisados, sendo o vento o fator preponderante para as ocorrências (representando 72% das causas), seguidos por 16% dos acidentes provocados por veículos e 12% por chuva e/ou chuva com vento. Já a queda de árvores inteiras foi registrada somente em 15% dos casos amostrados, onde, de modo semelhante, aproximadamente 71,4% foram causados pelo vento e 19% por veículos.

Em virtude dessa análise, a autora ofereceu algumas recomendações para diminuição do risco de acidentes com árvores na cidade objeto do estudo, tais como: a modernização dos sistemas de distribuição de energia elétrica, de modo a se evitar os conflitos entre as árvores e a rede elétrica, implementando-se, por exemplo, cabos protegidos e redes compactas; a escolha da espécie arbórea adequada; treinamento periódico das equipes técnicas municipais de

execução de podas de manutenção; conscientização da população quanto aos cuidados com árvores; evitar o plantio de árvores em calçadas cuja largura não comportem adequadamente distâncias minimamente adequadas à circulação de pessoas e veículos; permeabilização de calçadas; utilização de mudas de qualidade; e manutenção de área mínima para crescimento livre ao redor do tronco.

No município do Rio de Janeiro, o painel da análise de serviços da Central de Atendimento 1746 da Prefeitura Municipal, mostrou que, no exercício de 2021, do total de 758.890 chamados dos cidadãos cariocas, 32.559 (4,29%) foram relacionados a dois tipos de serviços disponibilizados pela Prefeitura: “Manejo Arbóreo” e “Arborização”, tratados distintamente no painel. Do total destes dois tipos de serviços, 21.854 (aproximadamente 67%) foram de chamados específicos para serviços de poda em logradouros públicos executados pelas Companhias municipais responsáveis. Já em 2022, de 01 de janeiro a 26 de maio, o total de chamados pelos cidadãos foi de 335.304, dos quais 16.772 (5%) foram relacionados a manejo arbóreo e arborização, com aproximadamente 70% específicos à demanda por serviços de poda em áreas públicas da cidade. Ainda em 2022, os demais serviços, enquadrados como subtipos no tipo de serviço “Manejo Arbóreo”, compunham-se de, em ordem decrescente de pedidos: remoção de árvore em logradouro (2.399 chamados), avaliação de risco de queda de árvores (1.455 chamados), remoção de resíduos de poda (1.305), fiscalização de corte de árvores (655), destoca de troncos e raízes (502), 267 solicitações de plantio de árvore em área pública e 10 solicitações para fiscalização de plantio recente de árvore em área pública (PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO, 2022).

Utilizando o site de busca do Google®, em que foram pesquisadas as palavras “queda de árvores urbanas”, o programa retornou 8.290 acessos, na forma de notícias veiculadas na rede durante o intervalo de 12 meses (de julho/2021 a junho/2022) em diversos municípios brasileiros. Analisando o conteúdo das notícias, verificou-se que em 27,5% das notícias não foi relatado qualquer dano com a queda de árvores, em 62,5% das notícias as quedas de árvores resultaram em danos ao patrimônio público ou privado, em 10% das notícias a queda de árvores estava associada à remoção como medida preventiva de risco e em 2,5% das notícias a queda de árvores ocasionou acidentes não fatais, com ferimentos leves. Analisando as notícias, encontrou-se que 95% delas a queda de árvores tinha como causa os fortes temporais que acometeram essas regiões durante o período levantado (informação do autor).

Além da percepção do risco de árvores urbanas do ponto vista da saúde pública, existe o viés jurídico envolvido. Sendo o risco algo inerente à árvore em ambientes urbanos, em virtude disso, legalmente, os acidentes que causam danos patrimoniais e humanos envolvendo árvores em áreas urbanas, precipuamente, são considerados não apenas uma fatalidade, mas podem sim constituir-se em crime, como defendem alguns autores, para os quais, a responsabilidade por dolo eventual deveria recair não somente sobre a gestão municipal, mas também sobre os técnicos envolvidos com o fato gerador. Segundo esses autores, se a gestão municipal não segue diretrizes técnicas específicas para orientar a arborização, ou ainda se as indicações técnicas são evitadas de imperícia, imprudência ou negligência desde a seleção da espécie adequada ao local até a execução do plano de manutenção periódica, com diagnóstico, cuidados, podas, remoções, etc., ambos, gestores e técnicos, deveriam ser responsabilizados, dado o princípio de que aquele que plantou ou indicou também deve cuidar (PERKONS, 2012). Abordagens dessa natureza tornam clara a relevância que o tema da avaliação de risco de árvores urbanas apresenta para a prevalência de bem-estar ambiental nas cidades.

Pelo exposto, admite-se que riscos associados às árvores urbanas sempre existirão, haja vista que a árvore é um ente biológico, vivo, sujeito a inúmeras variáveis que interferem em sua higidez, e o alvo (pessoas, animais, veículos, mobiliário urbano, etc.) encontra-se em constante integração com os indivíduos arbóreos nas cidades. O risco pode ser gerenciado, atenuado a patamares aceitáveis, porém, não totalmente eliminado, a não ser que seja suprimido o elemento que representa o perigo e ou o alvo.

O objetivo da gestão de risco é estabelecer uma faixa ou limite aceitável para o risco associado a determinado evento. Para tanto, o planejamento da arborização urbana é fundamental para se estabelecer limites aceitáveis ao risco proporcionado pelas árvores e, nesse ponto, a diversidade florística traduz-se em mais uma tática para transmitir resiliência ao verde urbano. Nesse aspecto, recomenda Santamour (1990), bem como Miller & Miller (1991) em trabalho independente, sob uma ótica ecológica, aquilo que ficou conhecido como “regra do 10-20-30”, ou seja, para manter a diversidade arbórea, o desenho da arborização urbana deve abranger até 10% de indivíduos pertencentes à mesma espécie botânica, até 20% ao mesmo gênero e até 30% de árvores pertencentes à mesma família botânica. Dessa forma, esses autores pressupõem que o aumento da diversidade genética das árvores urbanas garante, notadamente, maior resistência ao ataque de pragas e outras causas cujos danos seriam maiores caso o desenho da malha florestal fosse mais monótono.

2.3 Métodos de Avaliação de Risco de Árvores

À semelhança de muitas outras áreas profissionais, não há um único método de avaliação de risco de árvores. Atualmente, existem muitos métodos de avaliação do risco, notadamente voltados para o ambiente urbano, os quais se encontram em constante evolução técnica, sendo a integração entre eles uma realidade e também uma necessidade.

A Norma NBR 16.246-3, versão de 26/09/2019, da ABNT, oferece um padrão de análise que se divide em três níveis básicos: Nível I, II e III. Cada um desses níveis representa uma abordagem na análise do risco representado pelo ente arbóreo, sendo crescente essa complexidade de acordo com o avanço numérico do nível, por exemplo, quando se passa de uma análise mais externa para uma interna usando equipamentos apropriados para isso. Entretanto, um nível de análise não prescinde do anterior, ou seja, pressupõe-se que, para se chegar à análise de nível II a de nível I já deve ter sido esgotada, o mesmo ocorrendo com a análise nível III, onde as duas anteriores devem ter sido realizadas previamente.

O Nível I da NBR 16.246-3 considera uma análise mais ligeira e geral da condição das árvores, ocasião em que são detectadas situações cujos riscos e defeitos são evidentes. Se na conclusão da análise de nível I forem detectados riscos potenciais, pode-se recomendar análises nos níveis II ou III.

No Nível II a árvore é avaliada individualmente, de modo que em sua análise visual são observados os diversos parâmetros que compõe o indivíduo arbóreo e seu espaço de influência. Nesse nível podem ser usadas ferramentas simples para avaliar as condições da árvore, tais como os equipamentos para tomadas de medidas dendrométricas (altura, Cap, Dap), martelo de borracha, determinação de alguns indicadores de risco a exemplo do índice de esbeltez, a relação altura de copa/altura de fuste, etc. Se completada a análise no nível 2 e ainda o diagnóstico não foi preciso o suficiente para uma tomada de decisão quanto ao risco e indicações de manejo adequado, deve-se passar ao último nível, o terceiro.

No Nível III faz-se uso de equipamentos e recursos tecnológicos mais avançados que oferecem uma avaliação precisa, como por exemplo os métodos invasivos ou não-invasivos de prospecção de lenho, avaliações de raízes e análises laboratoriais.

Exemplo de legislação brasileira de âmbito municipal aplicada na temática da análise de risco é a Portaria FPJ nº 136, de 17/07/2018, a qual estabelece procedimentos para análise técnica visual de espécimes arbóreos, localizados em áreas públicas e privadas da zona urbana do município do Rio de Janeiro, com vistas a atender as solicitações de remoção, poda e transplante de árvores urbanas, de modo a orientar o manejo arbóreo mais adequado (PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO, 2018). Essa Portaria submete o manejo a ser recomendado ou executado em espécimes arbóreos na zona urbana do município à avaliação prévia do risco representado pelas condições desses espécimes.

Face às características dos procedimentos de análise visual dada pela Portaria FPJ 136/2018 tem-se que os mesmos se enquadram na categoria de nível II de avaliação conforme preceitua a Norma NBR 16.246-3/2019. A Portaria 136/2018 oferece duas modalidades de avaliação técnica visual, sendo uma para árvores situadas em áreas privadas (denominado “Relatório Técnico de Vistoria”) e outro para áreas públicas (denominado “Protocolo para Avaliação de Risco de Falha/Queda de Árvores”), sendo este último mais detalhado e podendo ser usado como complemento ao primeiro em situações mais complexas. Ambos as modalidades devem vir acompanhadas de relatório fotográfico explicitando as condições dos espécimes arbóreos.

Os dois protocolos oferecidos pela Portaria 136/2018, não obstante algumas diferenças dos tipos de dados levantados por cada um, registram os aspectos dendrométricos dos espécimes arbóreos, as suas condições e a conformidade, com atribuições de pontuações a cada subitem. Quanto mais crítica a condição do subitem levantado maior sua pontuação. Ao final das associações de valores aos subitens levantados, é feito o somatório das notas cujo resultado numérico final pode enquadrar o espécime em quatro estados possíveis, a saber: satisfatório, regular, insatisfatório e crítico (categorias dadas para o caso de aplicação do Relatório Técnico de Vistoria) ou em quatro níveis de risco – muito baixo, baixo, médio e alto (para o caso do Protocolo de Risco de Falha/Queda de Árvores).

De posse do resultado final das notas há condições de se recomendar o tipo de manejo adequado para manter o nível de risco do ente arbóreo tão baixo quanto possível. Os tipos de manejo trazidos pela Portaria 136/2018 se constituem basicamente em quatro grandes grupos: podas, remoções, transplântio e tratamento fitossanitário, com seus respectivos subgrupos. Entretanto, existem outras modalidades de manejo que, embora não explicitadas na referida norma, também se constituem em possibilidades muitas vezes suficientes para a redução do risco a patamares toleráveis, por exemplo: o cabeamento de galhos, pinagem de tronco e ramos principais, a colocação de suportes, o manejo nutricional, adequação da gola, etc.

Outra importante técnica visual de análise de risco de espécimes arbóreos, que se enquadra como avaliação nível II de acordo com a NBR 16.246-3, é a metodologia do TRAQ (“Tree Risk Assessment Qualification”) desenvolvida pela ISA (DUNSTER *et al.*, 2013). Trata-se de uma metodologia de avaliação de risco qualitativa, em comparação às avaliações quantitativas preconizadas pela Portaria 136/2018, que se baseia em categorização do risco através da atribuição de atributos aos parâmetros analisados.

Na metodologia TRAQ em vez de pontuação por valores quantitativos usam-se termos coerentes com a situação encontrada, os quais emprestam determinado peso ao entendimento dos níveis de probabilidades de ocorrência de eventos. São analisadas as probabilidades de falha do indivíduo arbóreo em um determinado período de tempo (ou “time frame”), independente da probabilidade de impacto em um alvo determinado, a qual também é estimada de acordo com a taxa de ocupação do local, direção de queda, importância dos alvos, etc., após o que esses blocos de resultados são associados em uma primeira matriz de resultados. Após essa fase, é mensurada a severidade da consequência de o alvo ser efetivamente impactado, o que é feito de forma também qualitativa, através das categorias “insignificante”, “menor”, “significante” ou “severa”, de acordo com o valor do alvo, de sua importância, porte da árvore ou tamanho e frequência de ramos falhos, distância da queda, etc. Com a correlação entre o resultado da primeira matriz de resultados e a severidade mensurada da consequência tem-se o risco de fato representado pela árvore, distribuído nas seguintes categorias: risco baixo, risco médio, risco alto e risco inaceitável.

Por fim, pode-se concluir que o risco da árvore de acordo com a metodologia TRAQ é uma função da probabilidade de falha, da probabilidade de impacto em algum alvo específico e da severidade da consequência de tal impacto no alvo. A metodologia TRAQ analisa isoladamente os diversos fatores componentes da situação, atribuindo relevância plena ao alvo e suas características, de forma que sérias condições de falha inerentes ao indivíduo arbóreo, por exemplo, não necessariamente representam um alto risco de atingir um alvo caso este

último seja inexistente ou ocasional. A projeção desse risco na pirâmide ALARP (“As low as reasonably practical” ou “Tão baixo quanto razoavelmente prático”), possibilitará o delineamento do manejo necessário para reduzir o risco a um patamar residual que seja considerado aceitável.

Sem cotejos críticos entre uma ou outra metodologia ser mais ou menos qualitativa e portanto mais ou menos confiável para a avaliação do risco, o fato é que a metodologia TRAQ tem se apresentado mais conservadora em seus resultados e, portanto nos manejos indicados, que as metodologias quantitativas, notadamente na diminuição das indicações de supressão.

Outras metodologias de avaliação visual de risco relevantes podem ser citadas. A QTRA (“Quantified Tree Risk Assessment System”), criada pela empresa inglesa Cheshire Woodlands Limited, especializada em arboricultura, cujo protocolo de análise e gerenciamento do risco baseia-se em aspectos quantitativos envolvendo parâmetros como falhas, alvos, dimensões da árvore e custos, o qual oferece, segundo a empresa, a decisão equilibrada entre a manutenção de níveis aceitáveis de segurança da árvore com os benefícios ecossistêmicos locais que elas proporcionam ao proprietário da árvore e seu entorno. A QTRA possui disponibilidade limitada a clientes dispostos a pagar pelo serviço.

Outra organização inglesa, a VALID, criou um sistema de gerenciamento de risco de árvores homônimo – o VALID (cuja sigla traduzida significa ‘vitalidade’, ‘anatomia’, ‘carga’, ‘identidade’ e ‘decadência’), baseado no aplicativo denominado “Tree Risk” que pode ser instalado em dispositivos móveis (Android e iOS) após cadastramento prévio e treinamento com o mantenedores.

Em que pesem os variados protocolos de análise visual propostos para a avaliação do risco de árvores, sejam eles internacionais, nacionais ou mesmo os criados ao nível municipal ou em escalas menores, a maioria tem em comum a delimitação do(s) alvo(s) que uma eventual queda da árvore ou de suas partes podem atingir. Esses protocolos procuram estabelecer relações entre determinados fatores referentes à estabilidade das árvores e são elaborados com o objetivo de se estimar os perigos que a árvore representa ao ambiente em que está inserida.

Nesse quesito, ressalta-se o trabalho de Alves e Martini (2020), que aplicaram um formulário adaptado do originalmente proposto por Seitz (2005) para análise visual de risco em 129 espécimes de *Spathodea campanulata* P. Beauv. (Angiospermae: Bignoniaceae) no *campus* da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, complementando os dados coletados com informações sobre o entorno dessas árvores, o histórico do local, características da espécie, etc. Dessa forma, as autoras enriqueceram a avaliação com outros elementos para um melhor diagnóstico do risco oferecido pelas árvores, além de mensurar o grau de correlação linear simples entre os fatores avaliados com o total da pontuação de risco alcançada pelos indivíduos de modo a selecionar os fatores que apresentaram maior influência na categorização do risco. Ainda estabeleceram o nível de risco separadamente por região da árvore – base do tronco, tronco e copa, à semelhança do proposto por Seitz (2005), mas com pontuação ponderada em cada segmento, considerando, por exemplo, que a base do tronco teria peso 3 devido a sua importância na estabilidade da árvore.

Trabalho similar foi feito por Conceição, Samolão e Santana (2017), ao analisarem 1.074 árvores em dois parques públicos na cidade de Belém, capital do Pará. Esses autores propuseram uma metodologia de análise visual para avaliação de risco, a qual denominaram “sistema para avaliar o risco potencial de queda de árvores” (SARPQA). Essa metodologia baseia-se na aplicação de uma planilha estruturada de campo, contendo campos relativos a alguns descritores além de informações de cada indivíduo arbóreo como a classificação taxonômica e número de registro da árvore. Os autores selecionaram oito descritores, os quais foram divididos em autodescritores (inerentes à árvore, sendo eles: dap, altura total, biomassa aérea e razão dossel/colmo) e descritores de risco (associados ao risco de queda da árvore, sendo eles: aspecto fitossanitário aparente, inclinação do caule, equilíbrio de copa, presença de lianas e razão altura do dossel/altura do caule). Dessa forma, esses autores aquilataram o risco de queda das árvores (RQ), combinando o aspectos qualitativos (dados pelos autodescritores)

com os aspectos quantitativos (descritores de risco), obtendo-se uma variação de RQ entre 0 a 8, sendo que o maior valor representa maior risco de queda da árvore, agrupando-os ainda em cinco classes de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto). Os autores ainda associaram a cada classe de valores de RQ uma amplitude de probabilidade de estimativa de queda da árvore. Segundo os autores desse estudo, os descritores selecionados foram condizentes com os utilizados por outros autores em estudos similares.

Um parâmetro ou subitem considerado importante pela maioria das metodologias de avaliação e diagnóstico das condições sanitárias de árvores, e que consta no Protocolo de Risco de Falha/Queda de Árvores da Portaria FPJ 136/2018, por exemplo, é a “Cavidade não aparente”. Essa característica se constitui na existência de cavidades ou ocos que ocorrem internamente no fuste ou galhos (tanto na base do fuste – das raízes até $\frac{1}{4}$ da altura do fuste, quanto nos estratos mais altos, sendo mais crítica para a estabilidade da árvore a sua existência na base) devido à deterioração do lenho por organismos xilófagos, notadamente. Por se localizar internamente, sua detecção e dimensionamento somente é possível através da estimativa com o uso de técnicas percussivas (martelo de borracha), ou pela mensuração direta com o uso de equipamentos de prospecção (perfuração associada à boroscopia, tomógrafos, penetrógrafos, resistógrafos, etc.).

A integração de métodos de análise de risco também é prática recomendada na arboricultura, a exemplo do que fizeram Carvalho *et al.* (2019) que analisaram o risco de queda em cento e três indivíduos arbóreos de *Tilia tomentosa* Moench (Angiospermae: Malvaceae), considerada espécie de grande porte e exótica em Portugal, em uma parque público na cidade de Coimbra, naquele país, integrando dois métodos de avaliação: o uso de formulário estruturado para uma avaliação mais externa das condições das árvores (análise visual) e o uso do equipamento de tomografia por impulso Arbotom®.

Devido às características do local de estudo, um parque com intensa movimentação de pessoas e presença de mobiliário urbano diverso, portanto com alvos significativos, esses autores consideraram que os espécimes de Tílias representavam alto risco de causar acidentes e prejuízos. Assim, os autores desse estudo aplicaram um formulário que abrangia três parâmetros principais das condições das árvores, em que cada parâmetro apresentava quatro opções de respostas, as quais recebiam uma pontuação de 0 a 3, sendo o maior valor indicativo de condição mais precária da árvore. Com o somatório das pontuações individuais dos parâmetros obtinha-se um valor total que apontava para o risco de queda da árvore, que foi dividido em quatro classes distintas cada qual representada por uma cor.

Os autores complementaram essa análise por formulário, essencialmente visual (considerada uma análise de nível II), com o uso da tomografia por impulso, tomando-se dezesseis árvores aleatoriamente (quatro árvores por classe de cor de risco), nas quais foram realizadas as tomografias a duas alturas diferentes do fuste. Assim, ao complementar os dois métodos de análise de risco, esses autores observaram que em 88% dos dezesseis espécimes arbóreos analisados com tomógrafo a análise visual foi equivalente aos resultados da tomografia ou mais rigorosa, ao passo que em 12% desses espécimes a tomografia mostrou condição de lenho mais danificado que na análise visual. Dessa forma, os autores recomendaram que os métodos de análise visual sejam acompanhados de avaliação feita por equipamentos mais complexos para visualização das condições internas do fuste de modo a oferecer um diagnóstico mais acertado da condição da árvore.

Duarte (2018) avaliando comparativamente as eficiências técnica, econômica e ergonômica de dois métodos de análise de risco de queda de árvores por diagnose visual e por tomografia de impulso sônica de tronco, em 131 indivíduos arbóreos de cinco espécies, localizadas no campus de Dois Vizinhos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, encontrou que a metodologia TRAQ-ISA (DUNSTER *et al.*, 2013) foi superior técnica e economicamente aos demais métodos comparados, sendo mais eficaz e eficiente. Foi evidenciado que embora os custos operacionais da tomografia tenham sido menores que os demais métodos visuais, o custo final, que leva em consideração o custo de aquisição do

tomógrafo, foi maior por laudo emitido que os demais métodos. A autora apoiou que a tomografia de fuste serve como excelente ferramenta complementar às análises de diagnose visual de risco de queda de árvore urbanas. Entretanto, avaliou que ambos os métodos de diagnose visual ofereceram desgastes ergonômicos, sendo o método de Steiz (2005) o que apresentou menos relatos de desconforto ergonômico pelos avaliadores do que o método TRAQ no período de coleta de dados em campo.

Item relevante para a avaliação da integridade estrutural das árvores é a parede residual, que vem a ser o tecido lenhoso em boas condições que permanece envolvendo os ocos e cavidades no fuste assegurando a estabilidade do ente arbóreo. Até determinado limite de espessura de parede residual existente é aceito um baixo risco de falha no ponto analisado, e esse limite varia em função de o oco/cavidade se posicionar em relação ao centro da seção transversal do fuste. Quanto mais o oco se posicionar no centro da seção transversal do fuste, não evidenciando cavidades aparentes e sendo a parede residual concêntrica ao oco, menor pode ser a espessura da parede para suportar suficientemente e com menor risco de falha as cargas dinâmicas e estáticas que atuam sobre a árvore.

Matteck & Breloer (1994) em seu método conhecido por VTA (“Visual Tree Assessment”), baseado em estudos biomecânicos das árvores, estabeleceram que para o caso de ocos internos (totalmente fechadas por parede residual e não visíveis externamente no fuste) a parede residual deve ter no mínimo 1cm para cada 6cm de diâmetro (aproximadamente 33% do seu raio). Já para o caso de cavidades abertas (visíveis externamente), cuja abertura represente até 30% do perímetro do fuste, a espessura da parede residual deve ser o dobro da do caso anterior de modo a garantir sua integridade estrutural, ou seja, deve ter no mínimo 3,96cm para cada 6cm de diâmetro (66% do raio).

A avaliação das condições de uma árvore pode ser feita empregando-se instrumentos (equipamentos e ferramentas) específicos para essa finalidade ou ainda que possam ser adaptados. Do rol de instrumentos que Palermo *et al.* (2021) apresentaram como passíveis de ser empregados por profissionais das ciências agrárias com o objetivo de auxiliar no diagnóstico de problemas em culturas agropecuárias, considera-se que alguns podem ser aplicáveis para averiguação das condições das árvores. A esse rol de instrumentos podem ser acrescidos outros conforme resumido no **quadro 1**.

Utilizados individualmente ou, como recomendado, o uso combinado desses instrumentos para avaliação das árvores urbanas pode oferecer um diagnóstico coerente com seu estado e estabilidade. Os instrumentos considerados mais simples e de fácil aquisição podem ser eficazes para a detecção e mensuração de defeitos (ISA, 2013), porém sua aquisição e uso são dependentes das condições orçamentárias e necessidades individuais do arborista.

Quadro 1. Relação de instrumentos passíveis de serem utilizados para avaliação de risco de árvores. (continua)

Equipamentos/Ferramentas de maior simplicidade	Exemplos de aplicação
Trena (analógicas, laser)	Para avaliações dendrométricas (alturas de ramos, diâmetros de copa, Dap, Cap), mensuração de distâncias de alvos, etc.
Martelo de borracha	Para detecção e mensuração de cavidades não aparentes no fuste/ramos, bem como das condições do lenho, através do som emitido, sendo bastante utilizado em arboricultura.
Sovela	Avaliação expedita da resistência do lenho ou detecção de perfurações e cavidades em troncos e galhos.
Lanterna	Visualização do interior de cavidades em troncos, ramos, raízes, etc.
Paquímetro analógico ou digital	Medição de dimensões foliares, coletos, raízes, etc.
Pinças	Para manuseio de pragas e partes da planta.
Tesoura de poda	Cortes de ramos de pequeno diâmetro.
Serrote de poda	Cortes de ramos de maior diâmetro.
Tesoura comum	Cortes mais precisos em órgãos mais delicados das árvores.
Canivete	Para cortes diversos.
Estiletes	Para cortes de porções mais finas e delicadas de tecidos da árvore.
Machado combinado Pulaski	Para dissecar galhos e troncos caídos, exposição de raízes para verificação de seu estado.
Bandejas plásticas brancas	Para coleta de pragas e inimigos naturais através da técnica do batimento de folhagem.
Bússola	Para determinação e marcação dos pontos cardeais nas árvores.
Aparelho de GPS	Determinação das coordenadas geográficas de árvores e alvos.
Binóculos/Monóculos	Exame das condições da copa das árvores.
Lupas de bolso e microscópios portáteis acopláveis a celulares/netbooks	Verificação de sintomas e sinais causados por pragas.
Câmera fotográfica	Registros diversos das árvores, local, alvos, sinais e sintomas de pragas.
Caneta laser	Apontamentos de regiões e pontos na copa da árvore.
Fita métrica	Medição de pequenas distâncias estruturais da árvore, Cap, Circunferência do colo, etc.
Fita diamétrica	Medição de Dap.
Suta mecânica ou digital	Medição de Dap.
Clinômetro e Inclinômetro (analógicos ou digitais)	Mensuração da inclinação de caules, de ramos, de terreno, etc.
Hipsômetro ou Clinômetro florestal	Clinômetro especialmente construído para determinação de alturas de árvores.
Vara/Haste metálica graduada	Para mensuração de cavidades aparentes no fuste/ramos além da localização e estimativa da distribuição do sistema radicular.
Nível laser/tripé	Medições de declividade de terreno, levantamento de indícios de pivotamento de raízes, etc.
Termo-anemômetro digital	Medição da temperatura e da direção e velocidade do vento em corredores de vento.
Medidor de pH portátil	Medição dos níveis de acidez/alcalinidade do solo sob as árvores avaliadas.
Anel de Kopeck	Determinação das densidades aparente e real do solo.
Régua ou gabaritos multifuncionais (por exemplo a Régua multiuso Matteck)	Para avaliação expedita dos parâmetros relacionados à arquitetura da árvore.
Trado de incremento	Sondagem das condições internas do lenho e dendrocronologia.
Furadeira elétrica portátil ou perfuratriz a combustível e broca	Para perfuração de fustes e ramos com vistas à sondagem e mensuração de cavidades e das condições internas, além de aquilatação empírica da resistência do lenho.
Boroscópio	Para prospecção interna de fuste e ramos, usado após perfuração com furadeira/perfuratriz.

Quadro 1. Continuação.

Equipamentos/Ferramentas de maior complexidade	Exemplos de aplicação
Tomógrafo por impulso ou sônico	Para avaliação não invasiva das condições internas dos tecidos do fuste, ramos e raízes. Baseia-se na cronometragem de ondas mecânicas, produzidas por leves batidas, as quais percorrem o lenho e são captadas por sensores possibilitando inferir acerca da condição dos tecidos do lenho. A velocidade de propagação das ondas é diretamente proporcional à densidade do lenho da árvore, e quanto maior essa velocidade melhor é a condição do lenho.
Tomógrafo por impedância ou resistividade elétrica	Para avaliação não invasiva das condições internas dos tecidos do fuste e ramos. O equipamento utiliza corrente elétrica e voltagem para mensuração da resistividade do lenho, a qual varia em função da heterogeneidade de sua constituição e estado.
Resistógrafo eletrônico	Para detecção de deteriorações, cavidades internas e fissuras no lenho de árvores. O aparelho registra a amplitude de resistência que o lenho exerce no corpo da broca.
Penetrógrafo eletrônico	Para detecção de deteriorações, cavidades internas e fissuras no lenho de árvores. O aparelho registra tanto a amplitude de resistência oferecida pelo lenho à rotação da broca quanto a amplitude de resistência do lenho à penetração da broca.
Sensores de movimentação	Utilizados para mensurar a movimentação da copa e do sistema radicular sob carga causadas por ventos ou seu próprio peso, sem aplicação de forças externas artificiais.
GPR ou Tree Radar	Mensuração e mapeamento da distribuição do sistema radicular.
Câmera termográfica	Detecção de diferenças de temperaturas nas várias partes da árvore e no entorno.
<i>Air spade</i>	Para escavação de solo e avaliação direta das condições e distribuição do sistema radicular.
Dendrômetro (tipo cinta analógica ou tipo eletrônico)	Monitoramento do crescimento do diâmetro de árvores.

Fonte: Adaptado de Filip *et al.* (2014); Ferreira, M. A. *et al.* (2016); ABNT (NBR 16.246-3/2019); Palermo *et al.* (2021).

Outros itens como tintas (para marcação de árvores e ramos), etiquetas de marcação (para identificação de indivíduos arbóreos), recipientes (sacolas, caixas, etc.) para acondicionamento de amostras de materiais coletados com vistas à análise laboratorial, fichas de identificação de amostras coletadas, pranchetas, canetas, lápis, transferidor, linhas de nylon, barbantes, mapas da região (digitais ou impressos) e até aplicativos para dispositivos eletrônicos móveis também podem se constituir como materiais bastante úteis para auxiliar no trabalho de análise de risco de árvores.

A análise visual abrangendo os diversos fatores que interferem com o crescimento e desenvolvimento das árvores urbanas – condições do solo, condições climáticas, presença de pragas, aspectos topográficos, construções, movimentações de veículos/máquinas/pessoas na área, os alvos, etc. –, usando-se para alguns desses fatores os instrumentos mais simples exemplificados no quadro 1, pode fornecer informações relevantes para fundamentar ou até prescindir a avaliação de terceiro nível, sendo esta última com o uso de equipamentos mais sofisticados e, em grande parte das vezes, de custo de aquisição elevado.

A utilização de drones e da escalada técnica (acrodendrologia) para visualização das condições da porção superior da copa das árvores, notadamente aquelas de grande altura, são também técnicas relevantes e por vezes necessárias ao diagnóstico correto.

Algumas técnicas para diagnóstico do risco de árvores que, dadas as características, complexidade de sua utilização, praticidade e custos, tem sido restritas às aplicações em ambientes de pesquisa, e porventura estendidas às avaliações de árvores veteranas, anciãs, de valor cultural como as oficialmente tombadas por instituições de patrimônio, etc., podendo-se citar: Ensaio de flexão de árvores cujo sistema de coleta de dados infere sobre as forças atuantes, propriedades do lenho, carga de ruptura e pivotamento de raízes, a partir da aplicação

de forças artificiais (*Pulling test*), Análises de tecidos lenhosos por técnicas que utilizam raios-X, etc.

Três instrumentos citados no quadro 1 que são utilizados normalmente para a avaliação interna do fuste de árvores são o tomógrafo de impulso, o penetrógrafo e o resistógrafo, sendo estes dois últimos complementares com o primeiro muitas vezes.

Esses instrumentos permitem inferir sobre a existência de problemas no lenho e a provável localização desses problemas no seu interior, sendo essa última característica a mais importante do ponto de vista biomecânico, pois maior fragilidade mecânica existirá se eventuais tecidos danificados no lenho estiverem localizados periféricamente ao invés de mais para o centro da seção transversal do tronco. Nesse caso, a perda de sustentação da árvore é maior e, conseqüentemente, maior o risco de falha.

Entretanto, o elevado custo de aquisição desses instrumentos configura-os como um óbice para a grande maioria dos profissionais da arboricultura, levando-os ou a contratar esses serviços de empresas especializadas ou ainda fazendo-os buscar por instrumentos e/ou metodologias alternativas mais viáveis técnica e economicamente.

Dessa forma, a técnica de prospecção do lenho de árvores urbanas utilizando-se furadeira/perfuratriz associada com boroscopia é economicamente viável quando comparada aos instrumentos de tomografia, resistografia e penetragrafia, podendo vir a se tornar viável tecnicamente desde que sejam tomadas as devidas precauções.

É perfeitamente desejado que as ferramentas para diagnóstico de problemas em árvores não devem causar danos irreparáveis às estruturas dos entes arbóreos de modo a prejudicar seu desenvolvimento e aumentar a probabilidade de ocorrência de falhas. A NBR 16.246-3/2019 da ABNT é cautelosa, por exemplo, quanto ao uso de equipamento e ferramentas que possam causar danos aos tecidos da árvore, citando inclusive itens como furadeiras, sondas ou trados de incremento. Essa Norma sugere que esses equipamentos/ferramentas sejam restritos àquelas árvores que já apresentem defeitos externos críticos no fuste e em ramos, tais como cavidades aparentes e biodeterioração intensa.

À furadeira/perfuratriz podem ser acoplados acessórios como a serra-copo para retirada de amostras do lenho com a finalidade de análise da integridade das seções através da análise histopatológica ou de densidade da madeira, propriedade essa muito correlacionada com a sua qualidade.

Da mesma forma, durante a operação de prospecção com a furadeira é possível estimar a resistência que o tecido interno oferece à penetração da broca, em determinada profundidade que pode ser registrada por um auxiliar, de modo a oferecer uma breve dimensão da integridade do lenho.

Apesar de invasiva, a prospecção do lenho com furadeira e boroscopia oferece uma leitura direta da existência de ocos, podendo ser complementar a outras técnicas como a tomografia ou a resistografia e vice-versa. Amaral (2002) usou a furadeira seguidamente à resistografia quando esta indicava uma perda de integridade no lenho, de modo que com a furadeira era possível a detecção direta da existência ou não de espaços ocos nesses pontos.

Geralmente, a resistografia ou a penetragrafia são utilizadas pelos arboristas de forma complementar à tomografia, porquanto essa última está sujeita a imprecisões causadas pelo formato do tronco (como sulcamentos por exemplo), ocorrência de rachaduras, pelos níveis de hidratação dos tecidos, etc. Analogamente, acredita-se que a técnica da furadeira/boroscopia também pode vir a se constituir em uma técnica complementar eficaz à tomografia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de coleta dos dados

O estudo foi realizado através do levantamento de informações sobre a sanidade interna de fustes, utilizando-se dois métodos distintos para esse fim. Os indivíduos arbóreos analisados estão localizados no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro de Seropédica/RJ. Guardadas as devidas proporções, dada a semelhança das condições locais onde esses espécimes se desenvolviam com as condições encontradas no ambiente urbano, por exemplo, a proximidade de rede elétrica, a proximidade com vias para tráfego de veículos e pedestres, a existência de calçamento, a proximidade com residências e outros equipamentos urbanos, etc., fez com que o presente trabalho fosse efetuado no local citado. Na **figura 6** tem-se o mapa com a distribuição das árvores na área de estudo.



Figura 6. Distribuição das árvores na área de estudo. A numeração refere-se ao código de cada árvore.

Fonte: Adaptado de Google Earth.

3.2 Seleção dos espécimes arbóreos

Foi feito um caminhamento por algumas vias internas do campus da UFRRJ, procurando-se identificar indivíduos arbóreos que apresentassem sintomas e sinais no caule (tais como fendilhamentos, rachaduras, cavidades aparentes, exsudação de goma/resina, etc.) e mesmo alguns sintomas reflexos na parte aérea que pudessem denunciar algum dano interno no fuste. Além desses sinais e sintomas, a escolha das árvores teve como requisito a medida do diâmetro à altura do peito (Dap) maior que 40 cm, medido com uma fita métrica. A prospecção do interior do caule das árvores selecionadas foi feita em duas datas: 23/01/2022 e 13/03/2022.

As árvores que se enquadravam nesses quesitos foram prospectadas com o uso do martelo de borracha, como instrumento de percussão, para auscultação do ruído produzido e sua associação com possíveis danos internos. Passada essa fase, e interpretando-se como positivo o teste do martelo de borracha, no que tange árvores que aparentemente apresentavam ocos internos, selecionou-se esses espécimes arbóreos, sendo registrada sua localização numa ficha de campo. Após essa seleção, efetuaram-se as seguintes operações: o emprego do tomógrafo de impulso e, por fim, o uso da perfuratriz com broca para perfuração do fuste e uso do boroscópio. Pelo fato de o objetivo do presente estudo ter sido a comparação dos métodos de prospecção interna do fuste, mesmo ocorrendo de algumas das árvores não terem apresentado um resultado de tomografia condizente com o que se supunha pelo método da percussão, essas árvores foram selecionadas para o teste seguinte da perfuração.

Foram selecionadas dez árvores no total, sendo sete espécies distribuídas em quatro famílias botânicas, conforme mostra o **quadro 2**. As principais características dendrológicas dos indivíduos arbóreos selecionados encontram-se na **tabela 2**.

Quadro 2. Relação dos espécimes arbóreos cujos fustes foram analisados internamente por dois métodos distintos.

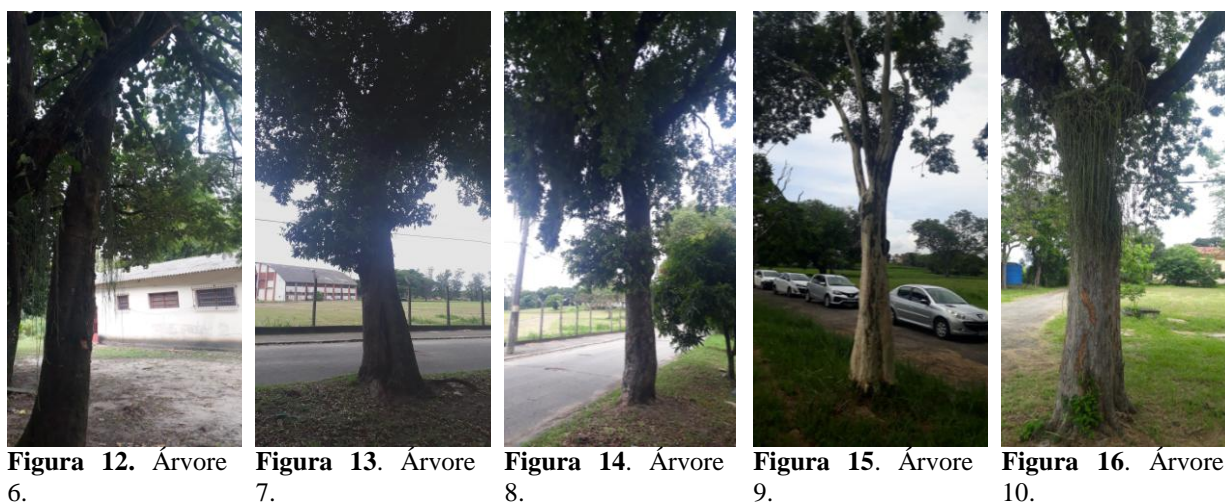
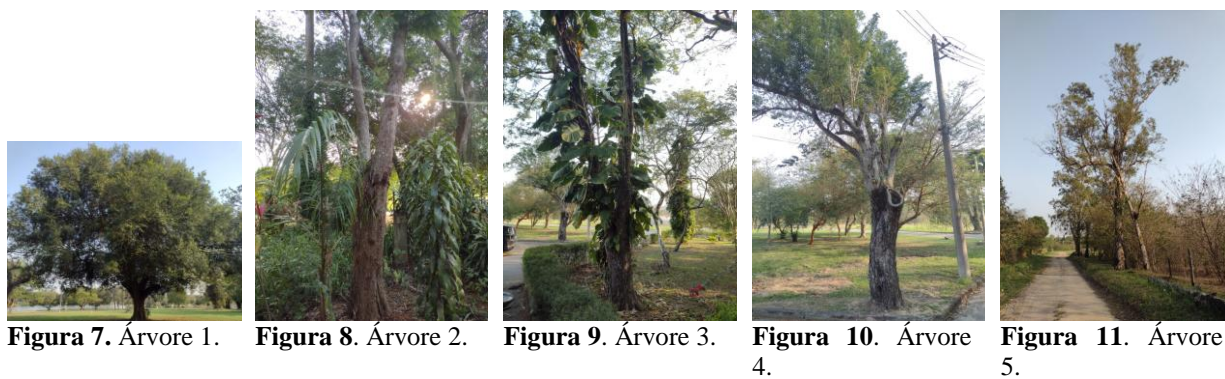
Código da Árvore	Espécie botânica	Nome vulgar	Família botânica
1	<i>Inga spp.</i> Mill.	Ingá	Fabaceae
2	<i>Cenostigma pluviosum var. peltophoroides</i> (Benth.) Gagnon & G. P. Lewis	Sibipiruna	Fabaceae
3	<i>Cenostigma pluviosum var. peltophoroides</i> (Benth.) Gagnon & G. P. Lewis	Sibipiruna	Fabaceae
4	<i>Lafoensia glyptocarpa</i> Koehne	Mirindiba	Lythraceae
5	<i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) K. D. Hill & L. A. S. Johnson	Eucalipto	Myrtaceae
6	<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	Flamboyant	Fabaceae
7	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	Oiti	Chrysobalanaceae
8	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	Oiti	Chrysobalanaceae
9	<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz	Pau-ferro	Fabaceae
10	<i>Cenostigma pluviosum var. peltophoroides</i> (Benth.) Gagnon & G. P. Lewis	Sibipiruna	Fabaceae

Tabela 2. Características dendrométricas dos espécimes arbóreos levantados no estudo.

Árvore	Cap (m)	Dap (m)	R (m)	Altura total (m)	Área da copa (m ²)	Grau de Esbeltez (Ge)
1	3,510	1,117	0,559	16,00	113,14	14,32
2	1,382	0,440	0,220	8,00	28,26	18,18
3	1,910	0,608	0,304	8,00	62,80	13,15
4	1,760	0,560	0,280	6,00	37,00	10,71
5	2,300	0,732	0,366	15,00	39,00	20,49
6	1,240	0,395	0,197	10,00	63,00	25,31
7	1,950	0,621	0,310	12,00	78,00	19,32
8	1,855	0,590	0,295	12,00	78,00	20,33
9	1,460	0,465	0,232	7,00	35,00	15,05
10	1,880	0,598	0,299	14,00	125,00	23,41

Nota: **Cap:** Circunferência do fuste à altura do peito; **Dap:** diâmetro do fuste à altura do peito (sendo $Dap = Cap/\pi$); **R:** raio do fuste à altura do peito (sendo $R = Dap/2$); **Altura total:** comprimento medido do colo da árvore até a extremidade superior da copa; **Área da copa:** área da superfície de projeção da copa medida pela equação da elipse ($Área = \pi \cdot \text{raio maior} \cdot \text{raio menor}$); **Grau de esbeltez (Ge):** indica a probabilidade de falha da árvore baseada na relação entre altura total (m) e o diâmetro à altura do peito (m) [$Ge = H/Dap$]. Os níveis de risco de falha foram estabelecidos com base nos estudos de Mattheck & Breloer (1997), sendo os seguintes: $Ge \geq 50$ (nível de risco 5 – alto), $30 \leq Ge < 50$ (nível de risco 3 – mediano), e $Ge < 30$ (nível de risco 0 – baixo).

Nas **figuras 7 a 16** encontram-se relacionadas as imagens dos dez indivíduos arbóreos selecionadas para o presente estudo.



3.3 Prospecção das condições internas do fuste dos espécimes arbóreos

Além da técnica do martelo de borracha ou da percussão (que usa o sentido humano da audição para detectar alguma condição de anomalia física que envolva reações relacionadas a ondas sonoras audíveis), utilizada como ação preliminar e complementar de prospecção das árvores, foram usados no presente trabalho dois métodos para a avaliação de danos internos do fuste das árvores: a)- método da tomografia de impulso; e b)- método da perfuração do fuste com o uso de perfuratriz e broca específica para madeira, associando-se a esse conjunto o uso da boroscopia. Não obstante, a comparação do percentual de danos internos foi realizada apenas entre os métodos da tomografia e da perfuração.

Para o método da percussão foi usado um martelo de borracha com cabo de madeira, de tamanho médio, com o qual eram desferidos golpes leves no fuste, em toda a circunferência do mesmo, desde a base até um pouco acima da altura normalmente tomada para medição de Dap (**figura 17**). Ante qualquer sinal sonoro que pudesse ser associado a danos internos, essa posição era marcada no caule para posterior comparação com o resultado da tomografia e ou da perfuração. Os golpes desferidos eram feitos com o cuidado de não causar nenhum dano externo aparente na casca ou nos tecidos mais superficiais do caule.

Na tomografia de impulso (TI), utilizou-se o tomógrafo de pulso mecânico da marca Arbotom®, da Empresa Rinntech, com resolução de oito sensores (**figura 18**). Os procedimentos foram de acordo com o recomendado por Heidelberg (2011), ao método empregado por Castro (2011). A Tomografia de impulso foi realizada em uma seção transversal do caule da árvore, respeitando-se sempre que possível a altura do Dap. Na altura do Dap foi medida a circunferência do caule e feita sua divisão por oito, de modo que os pregos que

sustentam os sensores do Arbotom® pudessem ser inseridos equidistantes entre si. Foram feitos os devidos testes nos sensores, após o que, estando aprovada sua instalação, eram desferidos no mínimo cinco golpes nos locais específicos dos sensores com o martelo que acompanha o equipamento para a geração dos dados de velocidade de propagação de ondas mecânicas na seção analisada.

A configuração utilizada para a reconstrução das imagens seguiu ao utilizado por Martins, Santos e Latorraca (2021), exceto o tipo de porosidade da madeira, que foi registrada como desconhecida. Cada tomograma foi configurado de acordo com sua própria escala de velocidade de propagação de onda mecânica (VPOM).

A análise dos tomogramas consistiu na quantificação do percentual de área caracterizada pela prevalência de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas (LSa%), agrupando-se as árvores de acordo com Rollo (2009) nas classes dadas na **tabela 3**.

Tabela 3. Classes de percentuais de área com prevalência de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas (LSa%), segundo Rollo (2010).

Intervalo de classe de LSa%	≤ 20 %	> 20% LSa ≤ 30%	> 30% LSa ≤ 50%	> 50%
Categoria do LSa%	baixo	médio	alto	muito alto

Empregou-se para a mensuração dos LSa% o *software* ImageJ 1.45r (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). Seguiu-se a classificação de risco proposta por Rollo (2010), adaptada. Também foi considerada a variável percentual de perda de resistência mecânica (PRM), oferecida pelo *software* do Arbotom®.

Foram consideradas como áreas de interesse, para a mensuração e caracterização da expectativa da condição interna dos caules, aquelas que na escala (VPOM versus cores) apresentaram pigmentação rosa (LSa% muito alto), vermelho (LSa% alto) e laranja (LSa% médio), por estarem associadas às velocidades mais baixas. As velocidades de onda mais altas são representadas, nessa escala, pelas cores amarelo e verde.

A partir do tomograma de cada indivíduo arbóreo, e com o uso do *software* ImageJ 1.45r para a delimitação do perímetro das regiões do tomograma relacionadas a cada escala de cor de interesse para o presente estudo, foi possível a mensuração do percentual de área caracterizada pela prevalência de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas (LSa%).

Foram consideradas três cores para a mensuração de área possivelmente danificada no lenho, cada qual formando um conjunto com a cor anterior, a saber: rosa (tida como a cor que representa as mais baixas VPOM), vermelho (com velocidades intermediárias), e laranja (com velocidades mais altas que as anteriores).

No método da perfuração foi utilizado um equipamento Perfurador de madeira e solo da marca STIHL modelo BT45, com 1,1 cv de potência, 27,2 cm³ de cilindrada, movido a combustível composto de gasolina e óleo de motor dois tempos, na proporção de 50:1 (para óleos 2T da mesma marca do Perfurador) ou 25:1 (para óleos 2T de outras marcas) conforme indicações do fabricante, e velocidade de rotação máxima de 7.000 rpm na potência máxima. O Perfurador possui peso total de 4,8kg (sem broca e sem combustível), e o tanque de combustível do Perfurador, capacidade de 250 cm³. Ao perfurador foi acoplada uma broca de aço, com 6mm de diâmetro por 285mm de comprimento, com ponta tripla, normalmente usada para madeira (**figura 19**).

Associado à perfuração, foi feita a visualização da condição interna dos furos e dos ocos encontrados, com o uso do Boroscópio da marca Inskam, modelo 112-2 1080P, equipado com câmera à prova de água, lente de 8mm de diâmetro, cabo de 5 metros, com seis LEDs, tela HD de vídeo colorida, com 4.3 polegadas, munido de cartão TF, bateria de 1.700mAh, IP67 (**figura 20**).



Figura 17. Uso do martelo de borracha para detecção de dano interno no caule.



Figura 18. Uso do tomógrafo de impulso, com os sensores instalados no caule.



Figura 19. Uso do perfurador mecânico e broca para detecção de dano interno no caule.



Figura 20. Uso do boroscópio para verificação da condição interna do fuste.

Para a operação da perfuração foi feita uma adaptação do método de Zorzenon e Campos (2013), cujo trabalho original tinha o objetivo de avaliar os danos internos em caules de árvores urbanas causados por cupins (Insecta: Blattodea), além de proceder ao tratamento dessas árvores. Dessa forma, esses autores fizeram perfurações na base do caule, em três pontos diferentes e equidistantes entre si, optando pela angulação de 45° em relação à normal, de modo a facilitá-la e, principalmente, por usarem os mesmos orifícios para a infiltração de calda inseticida. Segundo os autores (comunicação pessoal), perfurações em 90° seriam problemáticas para os tratamentos devido ao escoamento de calda para fora do tronco, além de serem mais difíceis de serem realizadas nas bases das árvores. Para a mensuração correta da superfície da seção de caule com danos, os autores fizeram uma transformação do comprimento que a broca perseguia até o dano, a 45° (representado por uma diagonal), para o comprimento na horizontal (a 90°), utilizando para tanto a divisão do primeiro valor por raiz quadrada de dois ($\sqrt{2}$).

A angulação de 90° em relação à normal, usada na perfuração do caule das árvores no presente estudo, difere daquela do trabalho original de Zorzenon e Campos (2013), pelo fato de ter sido feita à altura do peito, portanto sem o inconveniente causado pelo solo contíguo ao equipamento. Assim, com a opção por essa angulação, não houve necessidade de transformação do comprimento diagonal (se tivesse sido tomado a 45°) em horizontal, resultando numa medida direta da parede residual dessas árvores. Foram feitos três furos no caule, equidistantes entre si (com angulação o mais próxima possível de 120° entre um furo e o próximo) e com angulação de 90° em relação à normal, ficando a broca na horizontal (paralela ao solo). Dessa forma, a profundidade média que a broca alcançara até os tecidos danificados no interior (MP_{90°) do caule, portanto espessura de lenho intacto, é dada pela **equação 1** a seguir.

$$MP_{90^\circ} = \frac{\sum P_{90^\circ}}{3} \quad \text{eq. 1}$$

Onde:

MP_{90° – Profundidade média que a broca alcançou até o tecido danificado no interior do caule, podendo ser interpretada também como a parede residual ainda íntegra do lenho

$\sum P_{90^\circ}$ – Somatório das profundidades em cada um dos três pontos de perfuração

A determinação da profundidade de cada ponto de perfuração (P_{90°) foi feita utilizando-se o Boroscópio. Após a perfuração com a broca, o cabo maleável do Boroscópio, contendo a

câmera, era introduzido no canal perfurado no lenho de modo que fosse possível checar se havia região oca ao final do furo. No caso de existência de região oca no lenho ao final da perfuração, essa parede residual (medida da superfície do caule até o oco) tinha seu comprimento mensurado usando-se uma trena, a qual era posta da ponta do cabo do boroscópio (local da câmera) até a marcação feita no cabo, relativa à superfície do caule (ponto inicial do furo). Quando inexistente essa região oca do caule, a profundidade do furo era a mesma do raio do caule (r).

Para a determinação da área danificada no interior do caule, e por conseguinte da porcentagem estimada desses danos em relação à área superficial total dessa seção interna, foi necessário obter as seguintes medidas: circunferência à altura do peito (Cap), diâmetro à altura do peito (Dap) e raio do caule à altura do peito (r). Para a obtenção da Cap foi usada uma fita métrica. Essa medida foi anotada na ficha de campo respectiva da árvore. As demais medidas foram calculadas a partir da primeira medida tomada, ou seja, a Cap , conforme as equações 2 e 3 a seguir.

$$Dap = \frac{Cap}{\pi} \quad \text{eq. 2}$$

Onde:

Dap – Diâmetro à altura do peito

Cap – Circunferência à altura do peito

π – número PI (3,1415926)

$$r = \frac{Dap}{2} \quad \text{eq. 3}$$

Onde:

Dap – Diâmetro à altura do peito

r – raio do caule à altura do peito

A área da seção transversal do caule à altura do peito (ASt) é dada pela equação 4 a seguir.

$$ASt = \pi r^2 \quad \text{eq. 4}$$

Onde:

r – raio do caule à altura do peito

O esquema da **figura 21** oferece uma visualização aproximada da realidade para o cálculo do percentual de dano interno no caule, com base nas medidas citadas.

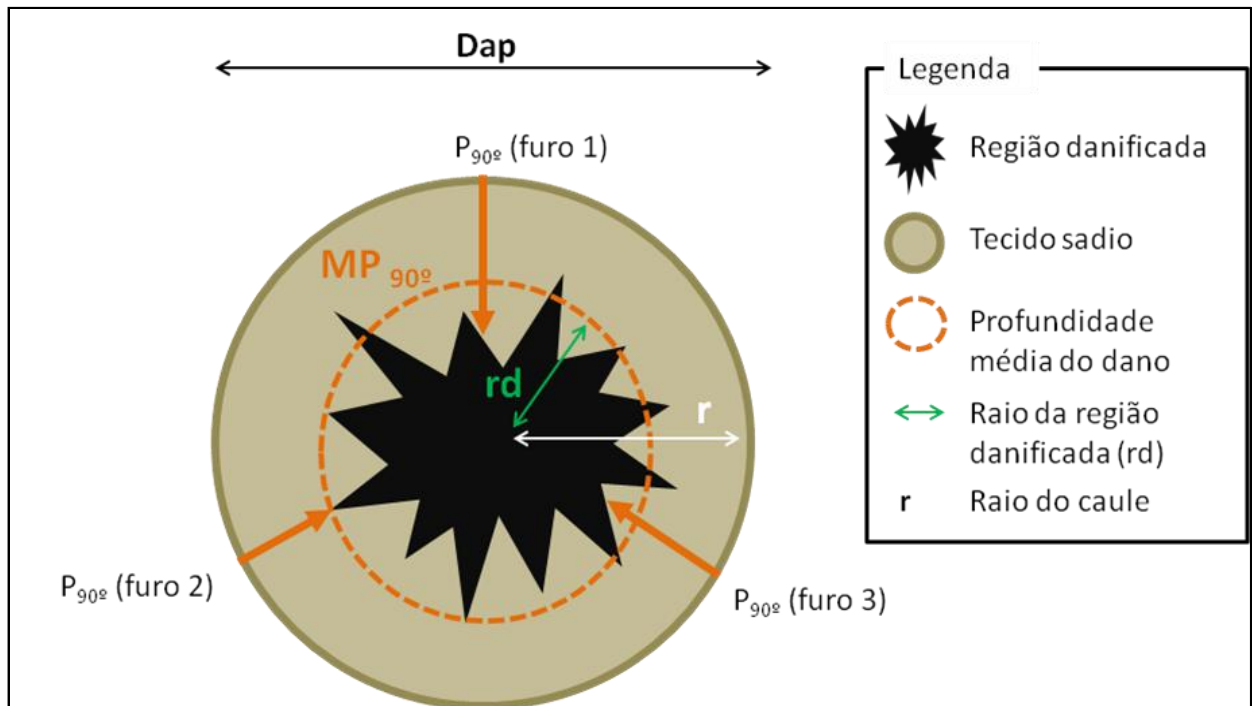


Figura 21. Esquema para o cálculo do percentual de dano interno no caule.

Assim, subtraindo-se da profundidade média da broca até o tecido danificado (MP_{90°) do raio do caule (r), de acordo com a **equação 5**, tem-se o raio da área superficial da região danificada (rd). A obtenção da área superficial da região danificada no interior do caule (Ad) é dada pela **equação 6**, ao passo que a percentagem estimada da área da região danificada em relação à área superficial da seção transversal do caule à altura do peito (PD) é calculada segundo a **equação 7**.

$$rd = r - MP_{90^\circ} \quad \text{eq. 5}$$

$$Ad = \pi * rd^2 \quad \text{eq. 6}$$

$$PD = \left(\frac{rd^2}{r^2} \right) * 100 \quad \text{eq. 7}$$

A título de diferenciação dos percentuais de área da região danificada optou-se chamar de “PDp” aquela relativa ao dano mensurado pelo método da perfuração, ao passo que “PDt” a referente ao resultado da tomografia. Semelhantemente, chamou-se de PRM o percentual de perda de resistência mecânica, dado pelo *software* do tomógrafo Arbotom.

A **equação 7** oferece uma adaptação ao cálculo do percentual de dano estipulado no trabalho de Zorzenon e Campos (2014), pois esses autores consideraram o percentual de dano (PD) como uma razão entre o raio da área da região danificada e o raio do caule, medidas lineares apenas, o que resulta dessa forma em uma superestimativa do percentual de danos, quando comparada a outros métodos de análise espacial de imagens. Se for considerada a dimensão espacial, elevando-se o quociente dos raios ao quadrado, conforme discrimina a eq. 7, o resultado obtido representa uma relação espacial, portanto mais próximo da realidade, porquanto é comparado o percentual de área superficial afetada com a área total da seção do caule à altura do peito (ASt).

As avaliações nas árvores foram categorizadas pelas diretrizes expressas na norma ABNT NBR 16246-3/2019 (Florestas urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas, Parte 3 - Avaliação de risco de árvores). Desta forma, as análises realizadas em cada árvore, foram possíveis em função da obtenção de informações providas de inspeções visuais e com o uso de equipamentos, realizadas durante o caminhamento e inspeções ao redor de cada indivíduo arbóreo. Devido a essa característica, as análises consideradas nesse trabalho são categorizadas no nível I, II e III, definidos pela NBR 16.246-3/2019.

3.3 Análises Estatísticas

Foram utilizados dois softwares estatísticos para o presente estudo, de modo a atender as características dos dados e objetivo das mensurações realizadas. Para organizar os dados, sua tabulação, construção de gráficos específicos e determinação de algumas medidas, tais como de estatística descritiva não comumente oferecidas pelos softwares especializados, foi usado o software Microsoft Office Excel 2010. Para as análises inferenciais, testes de normalidade e formas de distribuição bem como os demais gráficos foi utilizado o software livre BIOSTAT (AYRES *et al.*, 2007).

A análise preliminar dos dados teve o objetivo de organizar e apresentar suas principais medidas estatísticas de tendência central e de dispersão, tais como o valor máximo, valor mínimo, média, mediana, assimetria, curtose, variância, desvio padrão, erro padrão, intervalo de confiança e coeficiente de variação. Foram confeccionados histogramas para as distribuições de dados das perfurações e das regiões de cores dos tomogramas. Aprimorando a análise exploratória, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para se certificar acerca da normalidade de distribuição dos dados.

Foi aplicada ainda a análise de agrupamento (AA) com o objetivo de se mensurar a similaridade entre os indivíduos arbóreos, através do cálculo da distância euclidiana quadrada entre os grupos de algumas variáveis, que não apresentavam multicolinearidade, de cada indivíduo arbóreo entre si, separando-os em conglomerados (*cluster*) de acordo com a similaridade.

Para as análises inferenciais a hipótese nula (H_0) e alternativa (H_1) foram testadas ao nível de 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$). Para a hipótese nula (H_0), considerou-se não haver diferenças estatisticamente significativas entre os grupos para o parâmetro estatístico analisado, ao passo que na hipótese alternativa (H_1), existem diferenças estatísticas significativas entre os grupos em comparação. A hipótese nula (H_0) foi rejeitada quando atendeu a pelo menos um dos pressupostos: $|\text{parâmetro estatístico calculado}| < |\text{parâmetro estatístico crítico ou tabelado}|$ ou $p\text{-valor} < 0,05$. De acordo com a inexistência de normalidade dos dados, foi usado o teste não-paramétrico de Wilcoxon (1945) para amostras pareadas, de modo a se comparar os dados atinentes aos percentuais de dano no fuste dos indivíduos arbóreos.

Para as comparações específicas de correlação, quando não foi respeitado o critério de normalidade da distribuição dos dados, houve aplicação do teste não-paramétrico do coeficiente de correlação para postos de Spearman (r_s), e quando necessário foi feita a correção do número de empates entre postos para esse coeficiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **tabela 4**, a título de informação, tem-se sumarizados os dados climáticos dos dias em que foram realizadas as prospecções internas do caule das árvores selecionadas para o estudo.

Tabela 4. Dados meteorológicos médios referentes aos dias de prospecção das árvores.

Dia	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (m.s ⁻¹)	Pluviosidade total (mm)
23/01/2022	27,80	63,75	1,80	0
13/03/2022	26,55	72,29	1,77	0

Fonte: Estação da Pesagro-Rio/Seropédica-RJ.

Os parâmetros dendrológicos dos indivíduos arbóreos selecionados e prospectados, e que possuem relação direta com o percentual de dano interno no caule encontram-se na **tabela 5**.

Tabela 5. Parâmetros dendrológicos dos espécimes arbóreos levantados no estudo.

Código da Árvore	Cap (m)	Dap (m)	r (m)	AST _{Cap} (m ²)
1	3,510	1,117	0,559	0,980
2	1,382	0,440	0,220	0,152
3	1,910	0,608	0,304	0,290
4	1,760	0,560	0,280	0,246
5	2,300	0,732	0,366	0,421
6	1,240	0,395	0,197	0,122
7	1,950	0,621	0,310	0,303
8	1,855	0,590	0,295	0,274
9	1,460	0,465	0,232	0,170
10	1,880	0,598	0,299	0,281

Nota: **Cap:** Circunferência do fuste à altura do peito; **Dap:** diâmetro do fuste à altura do peito (sendo $Dap = Cap/\pi$); **r:** raio do fuste à altura do peito (sendo $r = Dap/2$); **AST_{Cap}:** área superficial da seção transversal do caule à altura do peito ($AST_{Cap} = \pi * r^2$).

Na **tabela 6** estão listados os parâmetros mensurados diretamente nas árvores, necessários para compor os cálculos destinados a estimar o percentual de dano interno do caule de cada árvore (PDp) medido com a técnica da perfuração.

Tabela 6. Parâmetros mensurados (comprimento da perfuração) e calculados (profundidade média da broca, raio da área superficial da região danificada; área superficial da região danificada; percentual de área danificada no caule relativa à área da seção transversal) dos espécimes arbóreos avaliados.

Código da Árvore	Comprimento da Perfuração (m)			MP _{90°} (m)	rd (m)	Ad (m)	PDp (%)
	P _{90° FURO 1}	P _{90° FURO 2}	P _{90° FURO 3}				
1	0,240	0,260	0,210	0,237	0,322	0,326	33,20%
2	0,110	0,078	0,110	0,099	0,121	0,046	30,04%
3	0,090	0,175	0,120	0,128	0,176	0,097	33,37%
4	0,105	0,290	0,272	0,222	0,058	0,010	4,25%
5	0,285	0,285	0,285	0,285	0,081	0,021	4,90%
6	0,197	0,197	0,197	0,197	0,000	0,000	0,00%
7	0,285	0,285	0,285	0,285	0,025	0,002	0,67%
8	0,285	0,285	0,285	0,285	0,010	0,000	0,12%
9	0,232	0,232	0,232	0,232	0,000	0,000	0,00%
10	0,260	0,224	0,285	0,256	0,043	0,006	2,05%

Nota: P_{90° : **FURO n**: Profundidade da broca no ponto “n” até alcançar a região danificada; MP_{90° : profundidade média da broca até a região danificada no caule; **rd**: raio da área superficial da região danificada; **Ad**: área superficial da região danificada; **PDP**: percentual de área danificada no caule relativa à área da seção transversal.

Nas **figuras 22 a 41** a seguir tem-se os pares de gráficos da tomografia de impulso para cada indivíduo arbóreo, sendo no primeiro gráfico demonstradas as velocidades lineares entre os pontos geradores e receptores das ondas (sensores), que foram calculadas pelo Programa do Arbotom, e o segundo gráfico do par representando o tomograma propriamente dito, com as manchas de cores como resultado final da interpolação das velocidades dadas no primeiro gráfico. Na legenda, à direita de cada gráfico, tem-se uma escala de cores representando a velocidade de propagação da onda mecânica (VPOM) na região transversal do lenho. Geralmente, associa-se que quanto maior a VPOM, mais próxima da cor verde ela é representada nessa escala e maior a higidez do lenho.

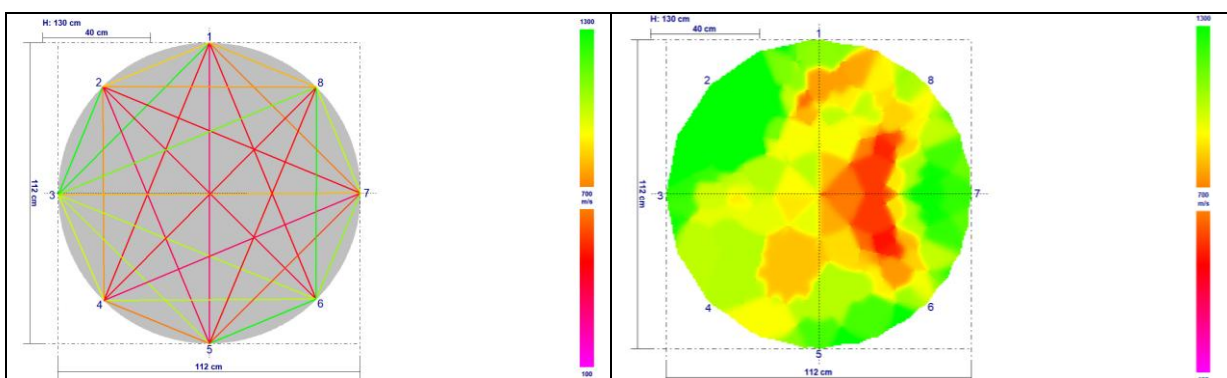


Figura 22. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 23.** Tomograma resultante – Árvore 1.
Árvore 1.

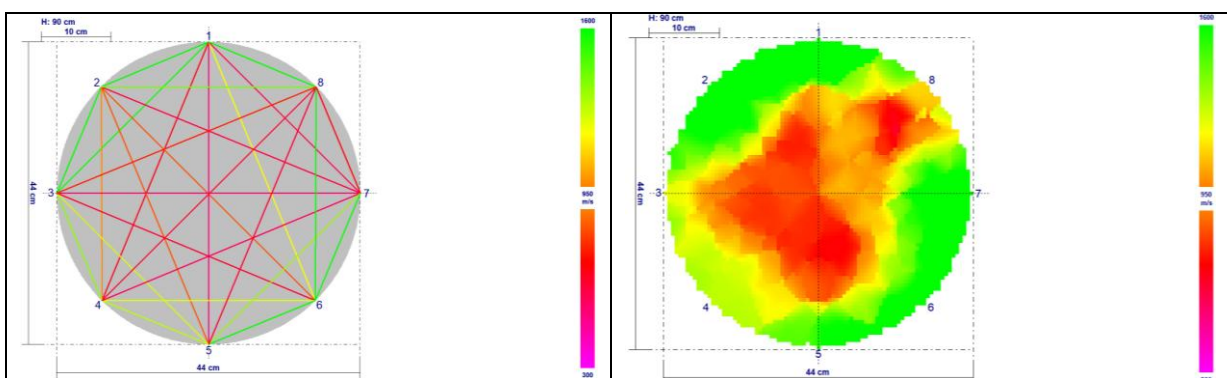


Figura 24. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 25.** Tomograma resultante – Árvore 2.
Árvore 2.

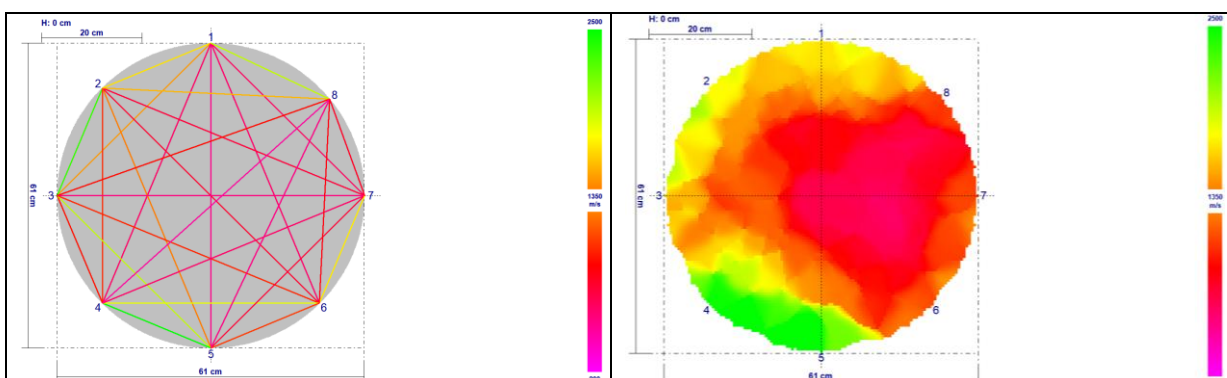


Figura 26. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 27.** Tomograma resultante – Árvore 3.
Árvore 3.

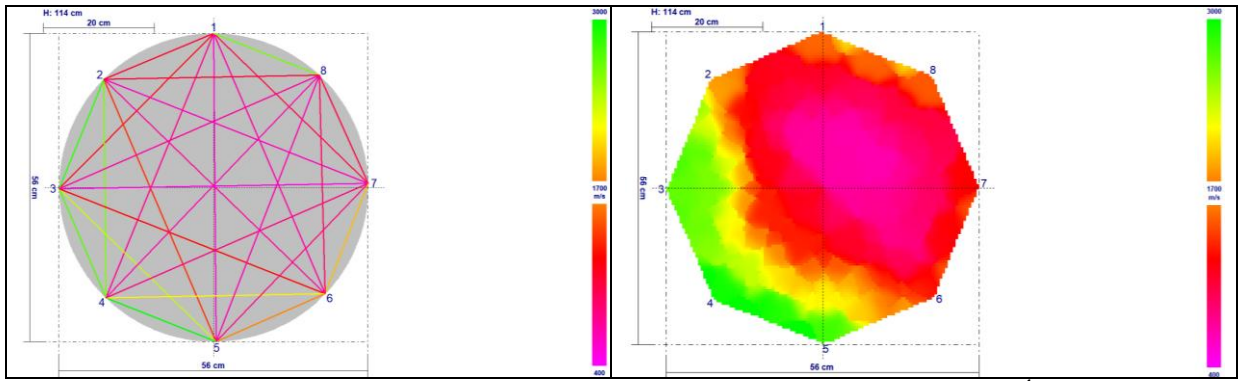


Figura 28. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 29.** Tomograma resultante – Árvore 4.

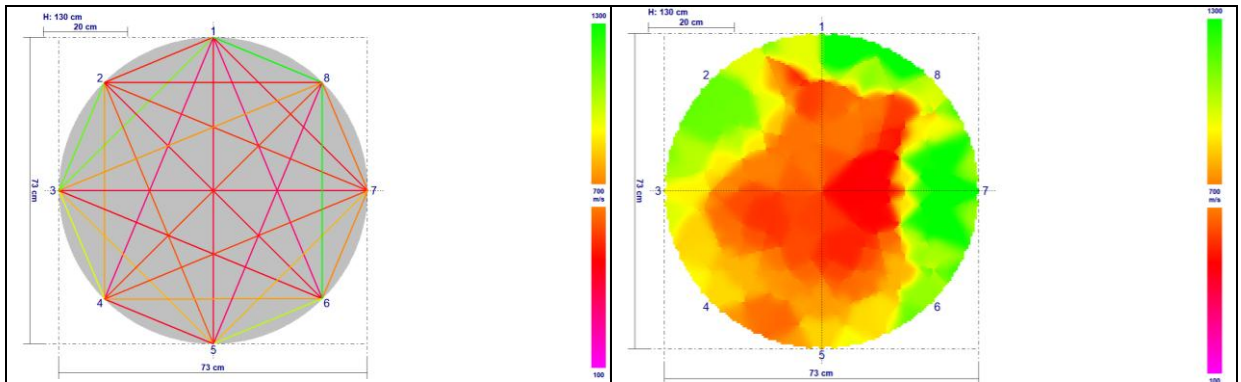


Figura 30. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 31.** Tomograma resultante – Árvore 5.

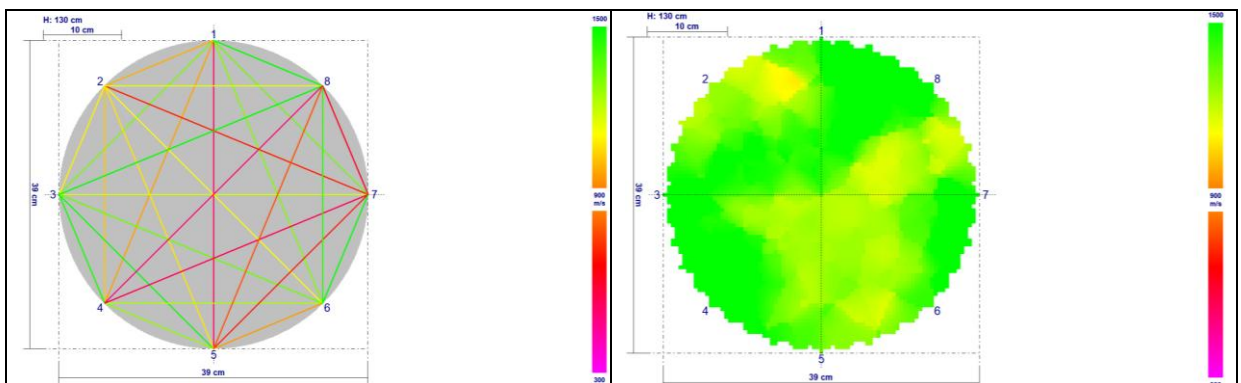


Figura 32. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 33.** Tomograma resultante – Árvore 6.

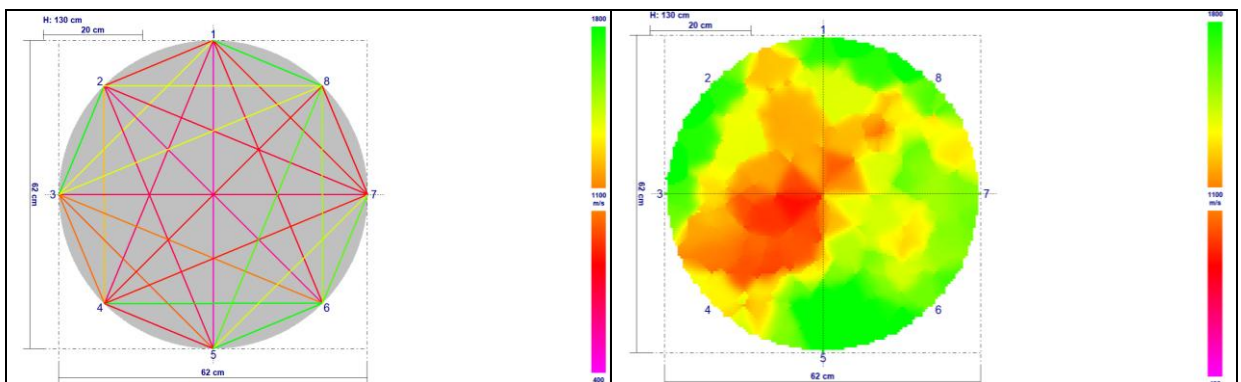


Figura 34. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 35.** Tomograma resultante – Árvore 7.

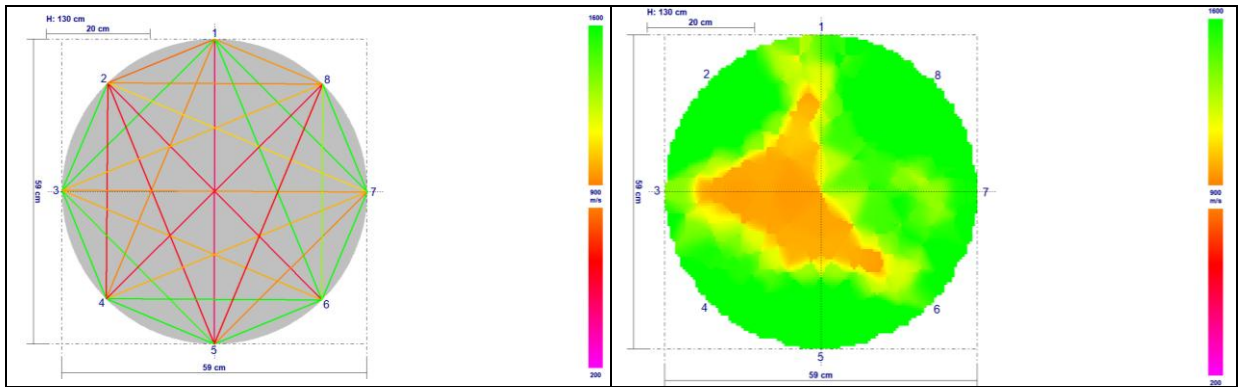


Figura 36. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 37.** Tomograma resultante – Árvore 8. Árvore 8.

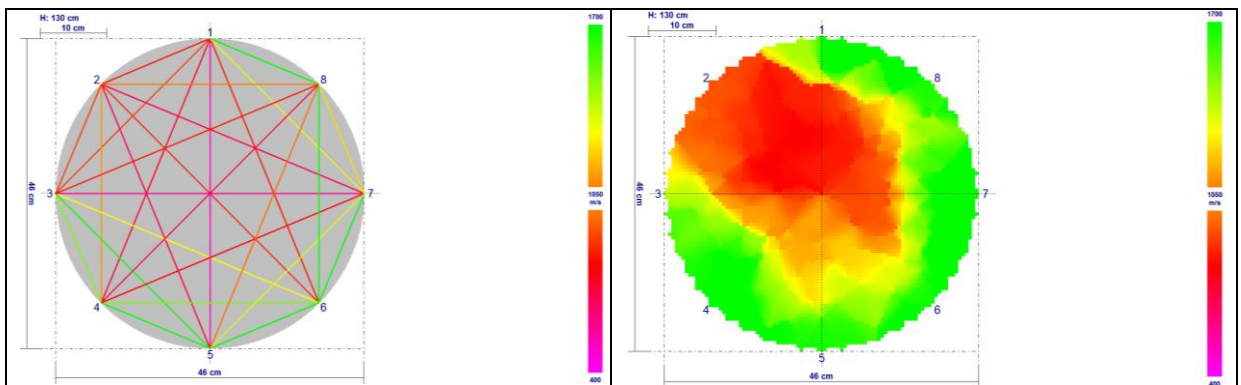


Figura 38. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 39.** Tomograma resultante – Árvore 9. Árvore 9.

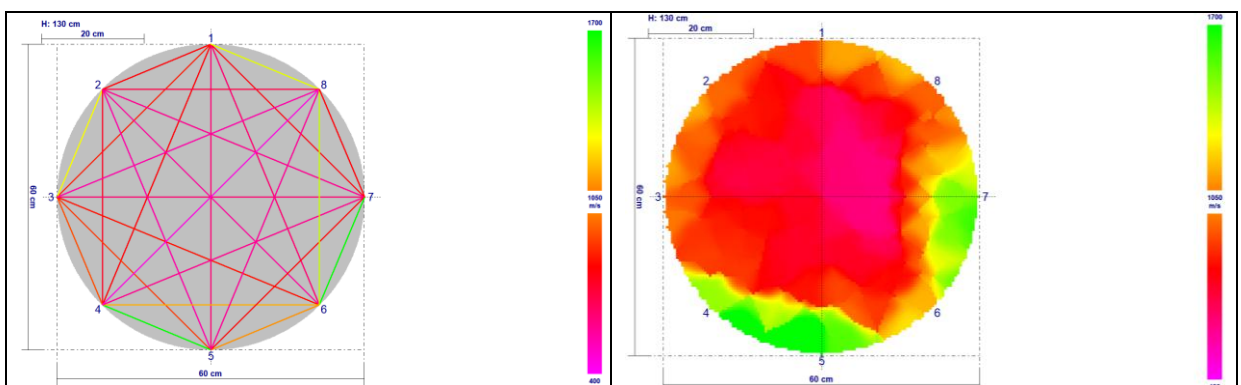


Figura 40. Gráfico de VPOM entre os sensores – **Figura 41.** Tomograma resultante – Árvore 10. Árvore 10.

As regiões de prevalência de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas (VPOM) foram sugestivas a áreas com maior probabilidade de se encontrarem tecidos danificados e com oco no lenho, portanto com maiores percentuais de dano (PD). Cumpre observar que na região do vermelho encontra-se também sobreposta o rosa, e na região do laranja estão sobrepostas as cores rosa e vermelho.

Essa mesma apreciação de apenas algumas cores do tomograma como representativas para indicação de danos no lenho, foi feita por Carvalho *et al.* (2019), ao analisar espécimes de *Tilia tomentosa* Moench, em um parque público na cidade de Coimbra, Portugal. Esses autores, usando o Arbotom em suas investigações, argumentaram que pelo fato de as velocidades médias de propagação de ondas mecânicas terem intervalo muito parecido para as cores verde e amarela do espectro, 941 a 1056 m.s⁻¹ e 818 a 1.137 m.s⁻¹, respectivamente, foi impraticável a detecção de diferenças entre imagens nessas duas cores.

Na **figura 42** a seguir tem-se uma exemplificação da marcação dos perímetros das regiões rosa, vermelha e laranja do tomograma (transformadas em tons de cinza), executada com o software ImageJ 1.45r, para o indivíduo arbóreo número 3. Na figura, os perímetros das cores citadas estão circundados por uma linha amarela.

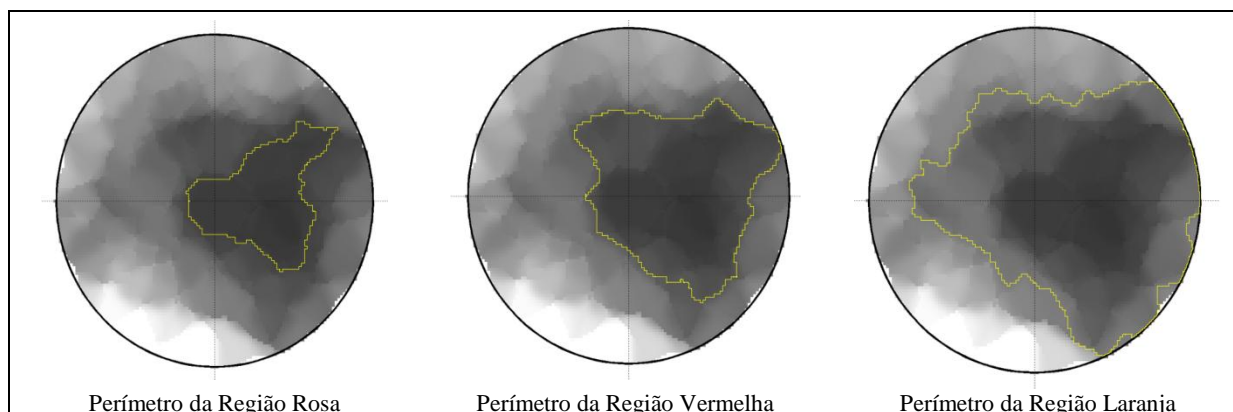


Figura 42. Perímetros determinados, em relação à expectativa de dano interno, na Árvore 3 com o uso do software ImageJ.

Na **tabela 7** estão listados os resultados obtidos com o método da tomografia de impulso relacionados ao percentual de lenho possivelmente danificado (PDt). Além do percentual de dano, a tabela também oferece o PRM (percentual de perda de resistência mecânica) para cada árvore, que fora calculado pelo próprio programa do tomógrafo.

Tabela 7. Percentuais de lenho possivelmente danificado (PDt) por região da escala de cores e PRM dos espécimes arbóreos levantados.

Código da Árvore	PDt – região rosa (%)	PDt – região vermelha (%)	PDt – região laranja (%)	PRM (%)
1	0,00	5,07	40,52	24
2	0,00	7,80	32,31	23
3	13,28	30,20	55,18	51
4	17,46	61,56	74,79	51
5	0,00	5,45	33,83	35
6	0,00	0,00	0,00	3
7	0,00	1,21	31,14	15
8	0,00	0,00	16,18	9
9	0,00	15,77	40,64	27
10	21,45	44,85	81,01	40

Nota: PDt: percentual de área possivelmente danificada no lenho relativa à área da seção transversal do caule calculado com o método da tomografia de impulso.

As árvores apresentaram heterogeneidade em relação a suas medidas dendrométricas, o que repercutiu numa variação do Dap entre 39 a 112 cm. As VPOM variaram entre 67 a 2.858 m.s⁻¹ e as velocidades médias de propagação de ondas mecânicas (VmPOM) variaram entre 415 a 948 m.s⁻¹.

O diâmetro exerce influência sobre a velocidade de propagação da onda mecânica, uma vez que, essa é dada pela distância entre os sensores e pelo tempo que a onda leva para ser gerada no sensor emissor e ser captada pelo sensor receptor.

A **tabela 8** sintetiza a estatística descritiva para os dados de percentual de área danificada (PD) mensurados pelos métodos da tomografia (PDt) e da perfuração (PDp). Para o método da tomografia foram considerados os dados especificamente por região de VPOM, ou seja, por

região colorida do tomograma. Com essas medidas preliminares, dentre outras considerações, foi possível caracterizar parcialmente o tipo de distribuição de frequências em relação à normalidade.

Tabela 8. Sumário estatístico descritivo dos conjuntos de dados.

Estadística	PDt região rosa	PDt região vermelha	PDt região laranja	PRM	PDp
N	10	10	10	10	10
Mínimo	0	0	0	3,00	0,00
Máximo	21,45	61,56	81,01	51,00	33,37
Moda	0	0	nd	51,00	nd
Mediana	0	6,63	37,17	25,50	3,15
Média	5,22	17,19	40,56	27,80	10,86
Variância	74,33	458,23	606,93	271,96	220,64
Desvio Padrão	8,62	21,41	24,64	16,49	14,85
Erro Padrão	2,73	6,77	7,79	5,21	4,70
IC mínimo	-0,12	3,92	25,29	17,58	1,65
IC máximo	10,56	30,46	55,83	38,02	20,07
CV%	165%	125%	61%	59%	137%
Curtose	-0,34	0,62	-0,09	-0,99	-1,19
Assimetria	1,22	1,30	0,24	0,09	0,99

Fonte: Medidas originadas no Biostat e Microsoft Excel 2010. **Nota:** nd – não determinado; n – número de observações; **Erro Padrão** ($Erro\ Padrão = Desvio\ Padrão/\sqrt{n}$); **IC mínimo** – intervalo de classe mínimo ($ICmin = Média - 1,96 * Erro\ Padrão$); **IC máximo** – intervalo de classe máximo ($ICmax = Média + 1,96 * Erro\ Padrão$); e **CV%** - Coeficiente de variação ($CV\% = Desvio\ Padrão/Média * 100$).

Para subsidiar a análise da normalidade dos dados, foi confeccionado o gráfico boxplot em bloco para os dados de cada grupo de PD (**figura 43**), os quais forneceram maior clareza acerca da normalidade da distribuição. Com o teste de Shapiro-wilk, cujo resultado encontra-se resumido na **tabela 9**, foi possível concluir sobre quais grupos de dados são, pelo menos aproximadamente, provenientes de uma distribuição normal segundo esse teste ao nível de significância dado.

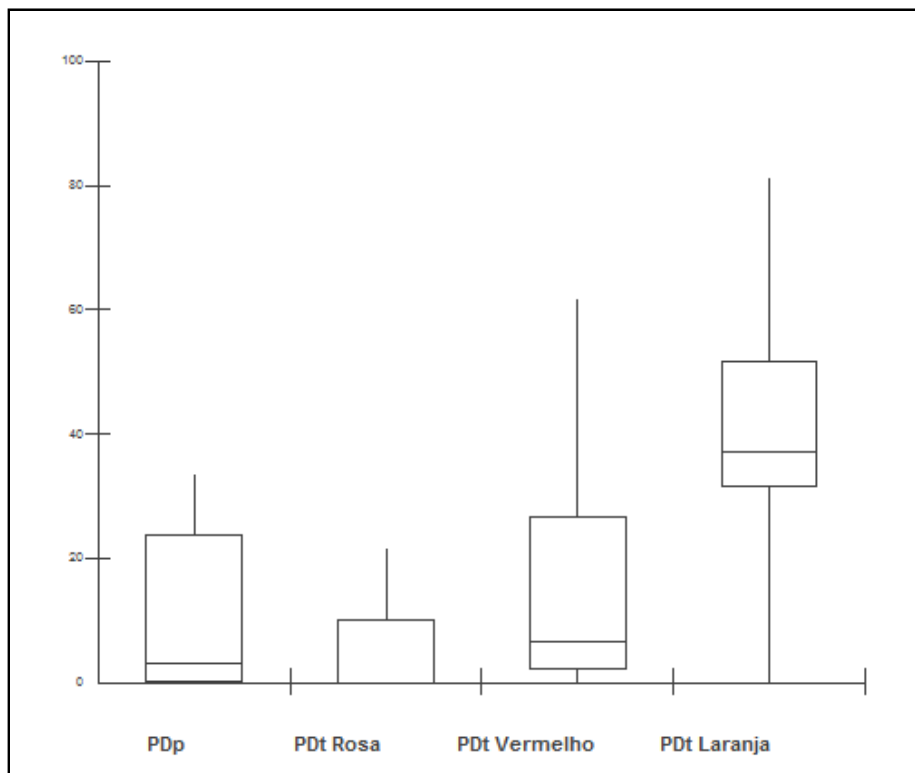


Figura 43. Boxplot das distribuições de percentual de dano

Tabela 9. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para as variáveis quantitativas.

Parâmetros do Teste	PDp	PDt região rosa	PDt região vermelha	PDt região laranja	PRM
Valor W_{Calc}	0,692	0,652	0,807	0,954	0,9535
p-valor	0,0089	0,0084	0,0210	0,6945	0,6829
Tipo de Distribuição	Não normal	Não normal	Não normal	Normal	Normal

Fonte: Medidas originadas no Biostat. **Nota:** Valor de significância do Teste de Shapiro-Wilk de 0,05 (para p-valor < 0,05 houve diferença significativa da hipótese de normalidade, portanto o resultado encontra-se em negrito na tabela). Para valores de $W_{calculado}$ maior que o valor crítico de 0,842 ($W_{tabelado}$) foi aceita a hipótese nula (H_0), ou seja, há normalidade na distribuição dos dados. Para $W_{calculado} < W_{tabelado}$ a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, configurando-se uma distribuição não normal.

Com a constatação da não normalidade da maioria dos dados, foram escolhidos os testes estatísticos não-paramétricos para as análises inferenciais de comparação entre os percentuais de danos obtidos diretamente com a perfuração e os obtidos com a tomografia.

A **tabela 10** apresenta os valores dos coeficientes de correlação por postos de Spearman (r_s) entre os percentuais de perdas dados pelo tomograma (PDt em três regiões, além do percentual de perda de resistência mecânica - PRM) e pela perfuração (PDp). Pelos resultados do teste de correlação verifica-se que, muito embora os valores dos coeficientes entre o PDp tenham aumentado moderadamente conforme o aumento da área superficial danificada dada pelas regiões do tomograma, e apresentando maior correlação com o PRM, esses valores não foram estatisticamente significativos ao nível de probabilidade do teste.

Tabela 10. Matriz de coeficientes de correlação por postos de Spearman (r_s) entre os percentuais de danos no lenho obtidos pelos métodos da tomografia (PDt e PRM) e pela perfuração (PDp).

	PDt rosa	PDt vermelha	PDt laranja	PDp	PRM
PDt rosa	1				
PDt vermelha	0,8003	1			
PDt laranja	0,8128	0,9362	1		
PDp	0,2618	0,3750	0,3951	1	
PRM	0,7629	0,9146	0,9240	0,5366	1

Fonte: Medidas originadas no *software* Biostat. **Nota:** Os coeficientes destacados em negrito foram significativos ao nível de 5% de probabilidade. Os valores da diagonal superior são equivalentes aos valores da diagonal inferior, portanto foram suprimidos.

Foi aplicada a análise de agrupamento (AA) com o objetivo de caracterização da similaridade entre os indivíduos arbóreos, através do cálculo da distância euclidiana quadrada entre os grupos de variáveis de cada indivíduo arbóreo entre si, separando-os em conglomerados (*cluster*) de acordo com a similaridade.

Com o exame das principais medidas descritivas dos dados originais, verificou-se que, muito embora a maioria dos dados de percentual de dano (PD) tivesse distribuição não normal, isso não foi impeditivo para utilização da técnica de análise de agrupamento, visto não se tratar de pressuposto para essa técnica. Porém, como houve existência de multicolinearidade entre alguns desses grupos de variáveis, denunciado pelos valores significativos dos coeficientes de correlação dados na tabela 10, e sendo a ausência de correlação um pressuposto para aplicação da técnica de AA, só foram consideradas para essa análise as variáveis PDp, PRM e Dap.

Na **figura 44** tem-se o dendrograma que agrupa as dez árvores segundo as variáveis analisadas (PDp, PRM e Dap).

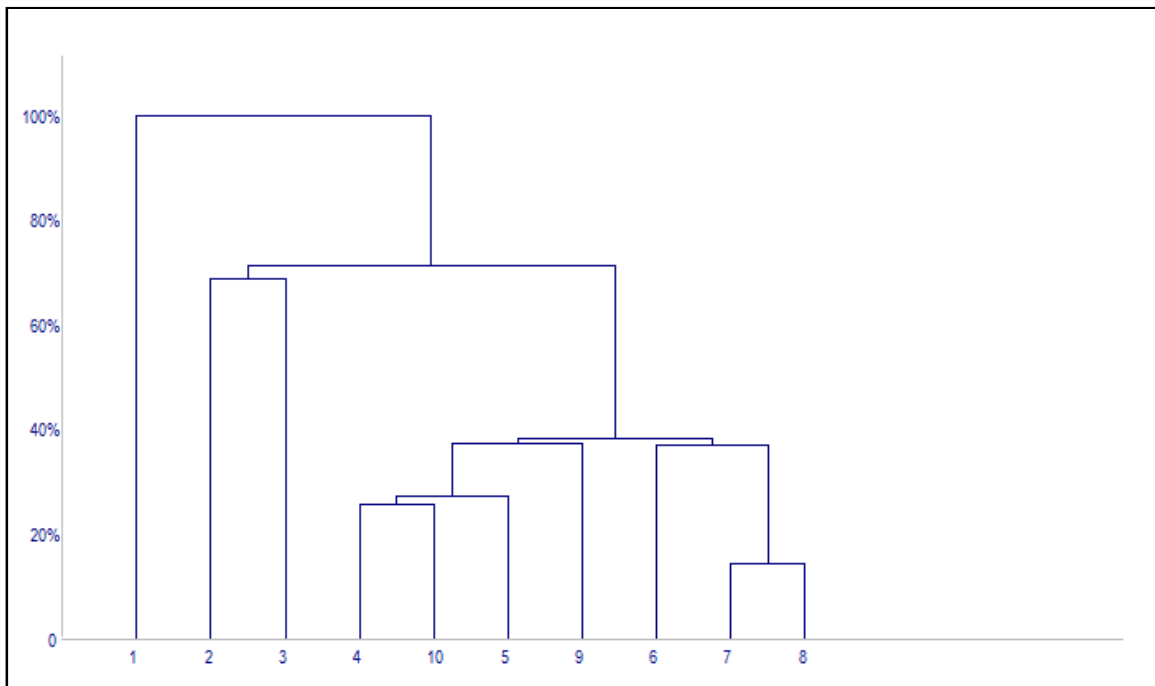


Figura 44. Dendrograma dos conglomerados de indivíduos arbóreos.

A análise gráfica do dendrograma da fig. 44, sugere a divisão dos dez indivíduos arbóreos em quatro *clusters*, dentro dos quais a distância euclidiana entre os indivíduos é menor e, portanto, composto por aquelas árvores com maior similaridade, segundo as variáveis analisadas. Assim, podem-se caracterizar os seguintes *clusters*: A- composto por apenas um indivíduo arbóreo, o de código 1 (Ingá); B- composto pelos indivíduos arbóreos de código 2 e 3 (ambos da mesma espécie botânica e próximos em sua localização geográfica); C- composto pelos indivíduos 4, 10, 5, 9 e 6; e D- composto pelo indivíduos 7 e 8 (ambos Oitis), sendo esse último conglomerado considerado o de maior similaridade ou de menor distância euclidiana.

A verificação de semelhança entre os resultados de percentuais de danos obtidos com o método da tomografia (PDt nas diferentes regiões do tomograma) e o resultado obtido com o método da perfuração (PDp) foi realizada com a aplicação do teste não-paramétrico de Wilcoxon (1945) para amostras pareadas. Esse teste baseia-se nos postos das diferenças entre os pares de valores comparados, em número absoluto, descartando os pares cujas diferenças resultaram nula e dando maior importância às diferenças maiores. Assim, o teste de Wilcoxon compara se os tratamentos tiveram diferença significativa entre suas medianas (geralmente a hipótese alternativa – H_1), ou se não encontra evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula (H_0), na qual os tratamentos não tiveram diferenças significativas entre seus resultados.

Desse modo, a **tabela 11** apresenta os resultados do teste de Wilcoxon ao comparar os percentuais de dano no lenho estimados pelos tomogramas, por região de cor, com os percentuais de dano dados pela perfuração do tronco (PDp), além de comparar este último tratamento com o PRM (percentual de perda de resistência mecânica).

Tabela 11. Resultados do teste de Wilcoxon comparando os percentuais de dano pela tomografia e perfuração.

Parâmetros do Teste	PDp x PDt região rosa	PDp x PDt região vermelha	PDp x PDt região laranja	PDp x PRM
Valor $Z_{\text{Calculado}}$	9	18	0	6
Valor Z_{tabelado}	3	5	5	8
n (pares válidos)	8	9	9	10
p-valor	0,2076	0,5940	0,0077	0,0284
Rejeição de H_0	Não	Não	Sim	Sim

Fonte: Medidas originadas no Biostat. **Nota:** Valor de significância do teste de Wilcoxon de 0,05 (para p-valor bilateral $< 0,05$ houve diferença significativa da hipótese de nulidade entre os tratamentos (H_0), sendo o resultado encontrado em negrito na tabela). Correspondentemente, para valores de $Z_{\text{calculado}}$ maior que o valor Z_{tabelado} não foi rejeitada a hipótese nula (H_0).

Pelos resultados do teste verifica-se que não houve diferenças significativas entre os percentuais de dano obtidos com o método da perfuração e os obtidos pelo tomograma nas regiões rosa e vermelho. Ao passo que quando comparado o PD da perfuração (PDp) com o da região laranja houve diferença significativa, bem como com o PRM dado pela tomografia.

Importante destacar que o tomograma é produto de uma interpolação de velocidades de propagação de onda mecânica entre os sensores dispostos no caule, na seção dada, e que ele apresenta regiões desta seção de caule com maior ou menor probabilidade de existência de tecidos lenhosos danificados. Porém, mesmo nas regiões de baixas velocidades de onda mecânica, geralmente representadas pelas cores mais róseas e vermelhas, pressupondo a existência de um vazio, em grande parte das vezes, esses danos nos tecidos podem não ser necessariamente a presença de ocos no caule, mas sim tecidos bastante deteriorados, com muito baixa resistência mecânica, ou diferenças na umidade e densidade da madeira. Esse fato pode divergir do resultado obtido diretamente com a perfuração, com a qual se visualiza e calcula o oco porventura existente no lenho, e que em média e em mediana foi maior que o percentual de dano representado pela região rosa do tomograma e menor que o representado pela região vermelha.

Na **figura 45** é apresentado o resultado gráfico do teste de Wilcoxon para a comparação entre os métodos de avaliação de percentual de dano (PD) usados no presente estudo.

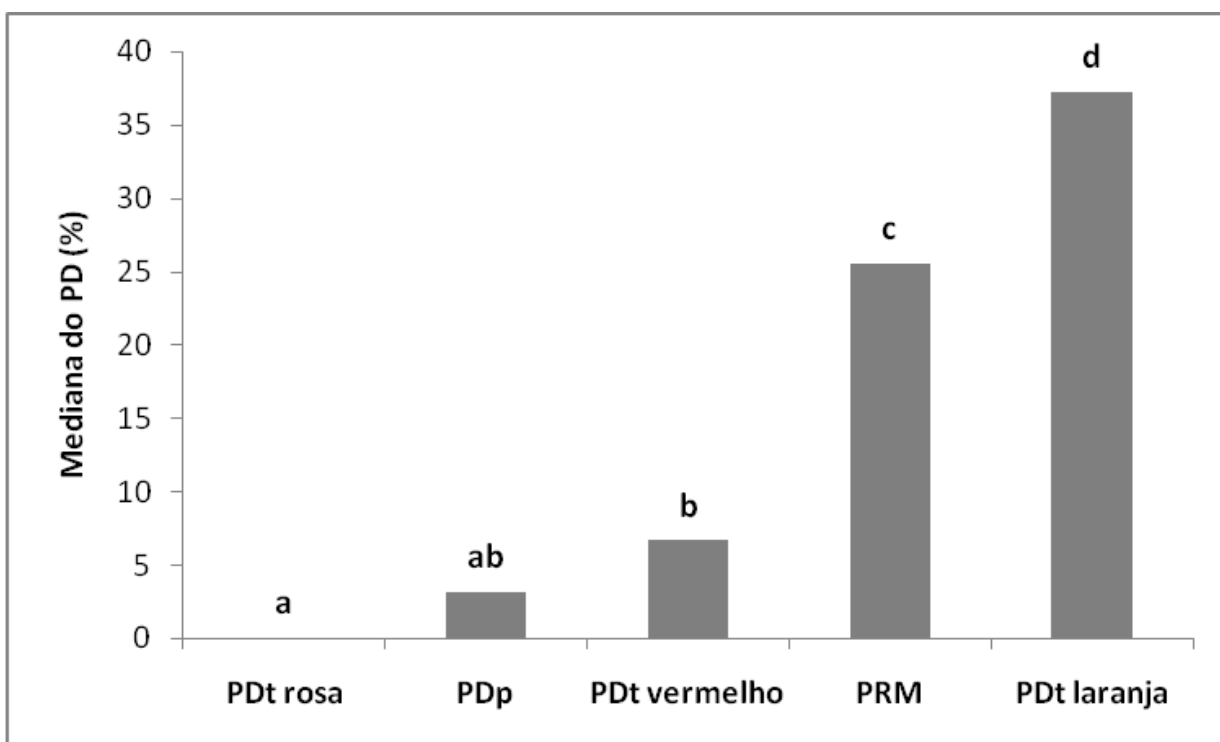


Figura 45. Resultado gráfico do teste de Wilcoxon. **Nota:** Barras seguidas de mesma letra indica que não houve diferença estatística significativa, ao nível de 5% de probabilidade, entre as medianas de percentuais de dano (PD) dos conjuntos de dados obtidos pelos diferentes métodos de avaliação de PD.

Os resultados do teste de Wilcoxon ilustrados no gráfico da figura 45, demonstram que a cavidade diretamente detectada pelo método da perfuração teve maior probabilidade de estar situada na região compreendida pela cor rosa até a vermelha do tomograma do que fora dessa região, mas que não obrigatoriamente a área superficial da cavidade tenha coincidido plenamente com a área superficial das regiões rosa ou vermelha do tomograma.

Além disso, o teste indicou que os métodos da perfuração e da tomografia apresentaram resultados considerados semelhantes estatisticamente, podendo os dois métodos se tornarem complementares entre si, ao validar os resultados um do outro.

Os valores dos coeficientes de Spearman (r_s) da tabela 10, que correlacionam os percentuais de dano no lenho obtidos com os métodos da tomografia e da perfuração, não

foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, porém esses coeficientes tenderam a aumentar sutilmente à medida que se aumentou a superfície da região colorida compreendida pelo tomograma.

À primeira vista, a falta de significância estatística desses resultados parece contradizer os dois métodos de prospecção analisados (tomografia e perfuração), porém, esse fato demonstra que as regiões de cor rosa e vermelha do tomograma não necessariamente indicaram a existência de cavidades mas sim que o lenho nessas regiões apresentou algum grau de alteração em sua integridade. Da mesma forma, existindo a cavidade, sua área superficial pode não ser exatamente igual à área superficial das regiões com menores VPOM.

Conforme citado anteriormente, as imagens geradas pelo tomógrafo são dependentes das interpolações das VPOM captadas entre os sensores, que por sua vez são dependentes da qualidade dos tecidos do lenho nas seções analisadas, características essas notadamente relacionadas à densidade da madeira, inferindo-se que quanto mais altas as VPOM melhores as condições da madeira e vice-versa (SHIMOYAMA, 2005; PEREIRA *et al.*, 2007).

Ao se contabilizar a quantidade de vezes em que houve concordância entre as condições do lenho dadas pela perfuração com aquelas dadas pela tomografia (seja na existência ou não de cavidades), verificou-se que na região da cor rosa do tomograma essa concordância ocorreu em 50% das amostras. Da mesma forma, quando considerada a região de cor vermelha, essa concordância ocorreu em 80% das amostras. Ou seja, até a região de cor vermelha do tomograma a probabilidade de os dois métodos terem apresentado o mesmo resultado foi suficientemente alta.

A árvore 6, com o menor Dap e que não apresentou cavidade em seu fuste (detectada pela perfuração), foi a única amostra em que o tomograma também não forneceu regiões coloridas com tonalidades de cor indicadoras de baixas VPOM (rosa, vermelha e laranja), condizentes com a maior probabilidade de ocorrência de cavidades. Ou seja, houve concordância plena entre o resultado dado pela perfuração e o resultado do tomograma - no caso a ausência de cavidades. Esse dado sugere que quanto menor o Dap menor o tempo de propagação e de recepção da onda, conforme apontou Castro (2011), inferindo-se ser mais preciso o nível de detecção do tomógrafo, desde que outros fatores de influência se mantenham constantes (por exemplo, a umidade da madeira, uniformidade da madeira, etc.).

Esse fato ainda é mais evidente quando se correlaciona o Dap dos indivíduos arbóreos com os pares de concordância plena entre a condição do lenho encontrada com a perfuração (presença ou ausência de ocos) e regiões róseas efetivamente mostradas no tomograma. O coeficiente de correlação de Pearson (r) para essa relação foi de -0,45, ou seja, considerada uma correlação negativa moderada, indicando que quanto maior o Dap menor a probabilidade de concordância entre o resultado da perfuração e o da tomografia.

As comparações realizadas por diferentes autores têm mostrado que a extensão real ou perímetro das cavidades efetivamente existentes nos fustes de árvores após serem abatidas são geralmente menores do que o perímetro correspondente às regiões de prevalência de baixas VPOM dos tomogramas (PEREIRA *et al.*, 2007; PERLIN, 2015; CARVALHO, 2019; EMERICK, 2021), fato esperado conforme comentado anteriormente, porquanto essas regiões de baixas VPOM não indicarem obrigatoriamente cavidades, mas sim regiões com alterações na qualidade da madeira a qual vai se tornando menos crítica à medida que se ultrapassa a periferia dessas regiões.

A perfuração com o uso de furadeiras/perfuratrizes pode ser considerado um método muito menos preciso, mais rústico e com menor sensibilidade de detecção de defeitos no lenho quando comparado a aparelhos sofisticados como o resistógrafo e o penetrógrafo. Isso pode ser verificado no trabalho de Rollo *et al.* (2013), os quais compararam os dados das leituras do resistógrafo com os do tomógrafo para avaliação interna de fuste de árvores, e encontraram uma correlação muito forte nos dados gerados por esses dois aparelhos. Deve-se essa alta correlação principalmente à sensibilidade que esses dois aparelhos possuem de detectar diferenças sutis na qualidade do lenho, fato que não ocorre com o método da

furadeira/perfuratriz e boroscopia, que apesar de não ser tão sensível quanto os equipamentos supracitados, oferece uma leitura mais direta da existência ou não de cavidades internas.

Sendo assim, cumpre destacar que, embora não tenha sido analisado neste trabalho, se a perfuração tivesse sido feita com cuidado de se registrar o grau expedito de resistência oferecida pelo lenho à penetração da broca em cada profundidade de avanço, esses dados poderiam enriquecer a análise e oferecer correlações mais fidedignas com as VPOM dadas pelas cores do tomograma, elevando-se dessa forma a precisão da determinação das regiões de maiores ou menores danos no lenho.

Dessa forma, as regiões coloridas representando baixas VPOM podem ser consideradas como regiões com probabilidade maior de se encontrarem ocos, cuja averiguação e detalhamento de sua extensão pode ser realizada com o uso de métodos invasivos como resistografia, penetrografia ou o da perfuração.

Uma das preocupações resultantes de métodos invasivos de avaliação do interior do lenho em árvores é acerca do possível dano causado pelas perfurações. Entretanto, em monitoramento das árvores avaliadas após um tempo pôde-se constatar que houve fechamento considerável dos canais abertos pela broca, com crescimento de novos tecidos lenhosos, em períodos que variaram de três a cinco meses após a perfuração. Para conferência da vedação natural dos furos foi utilizada um apontador telescópico graduado a cada 1cm, com diâmetro de 7.0mm na ponta, de modo que pudesse ser inserido nos furos.

Excetuando-se a árvore número 2, a qual não teve cicatrização nas três perfurações realizadas, para todas as nove árvores restantes observou-se que a vara graduada penetrou em cada furo cerca de 1.0cm, em média, medido da superfície da casca da árvore, até encontrar a barreira de tecidos novos formados no sentido medula-casca (**figura 46**). Assim, para 90% dos indivíduos cujo caule sofreu perfuração pela broca, a taxa de cicatrização foi, em média, de 6.8cm de comprimento de tecido crescido por mês, ou, em termos percentuais, correspondendo a uma vedação do canal perfurado de aproximadamente 25% por mês. Dessa forma, a estimativa é de que em intervalo de tempo em torno de quatro meses haja cicatrização total dos furos feitos no lenho.

Esse resultado encontra respaldo em Zorzenon e Campos (2014), os quais observaram cicatrização satisfatória dos furos feitos nas 1.477 árvores estudadas em poucos meses, não sendo portanto, segundo eles, uma prática que resulte em problemas fitossanitários nos indivíduos arbóreos, muito menos uma prática que levou qualquer desses indivíduos arbóreos à morte. Naturalmente, o tempo de cicatrização dos tecidos pode variar para condições edafoclimáticas e para espécies botânicas diferentes das observadas no presente estudo, bem como o risco de desenvolvimento de problemas fitossanitários nas árvores é dependente dos cuidados durante as operações, das condições climáticas e de eventuais potenciais de inóculo previamente existentes nos indivíduos arbóreos.

Importante ressaltar que Ferreira, M. A. *et al.* (2016) consideram como a maior desvantagem do uso de técnicas invasivas, mais especificamente da prospecção de lenho com a utilização de furadeiras, é a abertura de ferimentos na madeira que se constituem em portas de entrada para organismos xilófagos.

Amaral (2002), avaliando a infestação de térmitas em árvores urbanas em Higienópolis (SP) através da conjugação de métodos visuais externos e de prospecção do tronco, naquelas árvores em que era executada a prospecção do tronco com o uso de furadeira e broca associada à boroscopia, foi feito o fechamento desses orifícios com o uso de batoques de madeira de *Pinus* sp. impregnados com o preservante de madeira CCB (cobre/cromo/boro) a fim de se evitar infecções por patógenos e entrada de insetos xilófagos.

No trabalho de Zorzenon e Campos (2014), os autores citam que as aberturas no lenho feitas com o uso da furadeira foram impregnadas com produtos a base de cobre (pasta bordalesa) para evitar a infestação de organismos xilófagos.

Comparativamente, no campo da produção agrícola, em árvores frutíferas notadamente, é recomendável e eficaz, do ponto de vista fitossanitário, o uso de pastas e produtos químicos

inibidores da entrada, infecção, colonização e crescimento de organismos xilófagos, o que leva a crer que, pelos mesmos princípios, sua eficácia se estenda às árvores em ambientes urbanos. No entanto, do ponto de vista legal, essa prática não é indicada devido à inexistência até o momento de produtos químicos ou mesmo à base de bioinsumos registrados nos Órgãos Oficiais para uso exclusivo em árvores urbanas, com a finalidade supracitada.

Por outro lado, pode-se reduzir ou mesmo eliminar o risco de disseminação de prováveis organismos xilófagos entre diferentes indivíduos arbóreos, ao se usar os métodos invasivos de prospecção do lenho, através da sanitização dos aparelhos e acessórios com produtos apropriados para essa finalidade, cuja aplicação não é feita nas árvores propriamente ditas, mas sim nos equipamentos usados nas prospecções.



Figura 46. Detalhe da profundidade do furo após crescimento de tecido de cicatrização em seu interior.
Nota: A- árvore 1; B- Árvore 3; C- Árvore 4.

Amaral (2002) avaliou em seu estudo que em algumas árvores urbanas prospectadas o uso do boroscópio não fora adequado devido ao curto comprimento da haste do equipamento utilizado (cerca de 50cm de comprimento) e pela ocorrência de distorção nas imagens produzidas pelo instrumento, limitando a abrangência da área sob exame notadamente no sentido axial do tronco. Entretanto, atualmente, a melhoria, a diversidade e quantidade de acessórios que acompanham esse tipo de equipamento (a exemplo de periscópio, gancho de coleta de amostras, etc.) contornam satisfatoriamente a problemática citada pela autora.

Na **figura 47** tem-se as fotos realizadas com a câmera do boroscópio no interior dos canais perfurados mostrando os detalhes dos tecidos do lenho e as cavidades internas existentes no fuste.

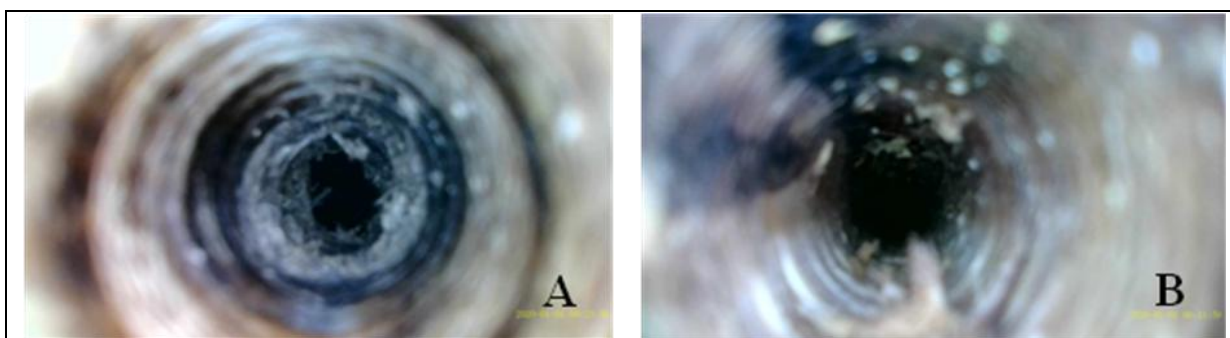


Figura 47. Fotos do boroscópio mostrando os detalhes dos túneis perfurados com a prospecção do caule.
Nota: A- árvore 1; B- Árvore 3.

O **quadro 3** lista de forma resumida as principais vantagens e desvantagens dos métodos da perfuração com boroscopia e o da tomografia para avaliação de danos em lenho de árvores urbanas.

Quadro 3. Vantagens e desvantagens dos métodos da perfuração e da tomografia para avaliação do lenho.

Item	Método	
	Perfuração	Tomografia
Custo operacional	Baixo	Baixo
Custo de aquisição de equipamentos	Baixo	Muito alto
Observação direta da existência de dano no lenho	Sim	Não
Possibilidade de visualização de danos internos ao longo do fuste	Sim	Não
Possibilidade de coleta de amostras nas cavidades (pragas, tecidos, etc.)	Sim	Não
Risco de favorecer a ocorrência de problemas fitossanitários nas árvores	Sim	Não
Possibilidade de uso em árvores de interesse especial (tombadas, anciãs, etc.)	Com cautela	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a determinação da profundidade média que a broca alcançou até o tecido danificado no interior do caule (ou parede residual íntegra do lenho, denotado por MP_{90°), a técnica da perfuratriz/boroscopia permitiu a mensuração direta da parede residual no fuste, de modo que possibilitou a análise desse parâmetro de estabilidade mecânica de cada árvore avaliada, de acordo com o conceito de parede residual dado por Matteck e Breloer (1994) (**tabela 12**).

Segundo esses autores, as árvores que tiveram espessura da parede residual maior que um valor mínimo calculado foram consideradas como tendo estabilidade adequada. Esse valor mínimo, que é um parâmetro de segurança, é dado pela divisão por seis do diâmetro do fuste à altura da seção avaliada (para o caso daquelas árvores cujo fuste não apresente cavidades aparentes) ou por três para o caso de árvores cujo fuste apresente cavidades aparentes cuja abertura máxima seja de 30% de sua circunferência.

Tabela 12. Parâmetros relacionados à parede residual medida com a perfuratriz/boroscopia e estabilidade mecânica da árvore.

Árvore	Nome vulgar	Dap (m)	MP_{90° (m) [A]	Cavidade aparente no fuste	Parâmetro de Segurança – Dap/f (m) [B]	A > B	Critério de estabilidade atendido
1	Ingá	1.117	0.237	não	0.186	Sim	Sim
2	Sibipiruna	0.440	0.099	não	0.073	Sim	Sim
3	Sibipiruna	0.608	0.128	não	0.101	Sim	Sim
4	Mirindiba	0.560	0.222	não	0.093	Sim	Sim
5	Eucalipto	0.732	0.285	não	0.122	Sim	Sim
6	Flamboyant	0.395	0.197	não	0.066	Sim	Sim
7	Oiti	0.621	0.285	sim	0.207	Sim	Sim
8	Oiti	0.590	0.285	não	0.098	Sim	Sim
9	Pau-ferro	0.465	0.232	não	0.077	Sim	Sim
10	Sibipiruna	0.598	0.256	não	0.100	Sim	Sim

Fonte: Organizado com dados gerados no estudo. **Obs.:** [A] – Comprimento ou espessura média da parede residual determinada com a perfuração e boroscopia (em metros); [B] – para o cálculo do parâmetro de segurança foi usada a razão entre o Dap e um fator “f”, o qual pode ser igual a 6 (quando o fuste não apresenta cavidades aparentes) ou a 3 (quando o fuste apresenta cavidades aparentes de até 30% de abertura em relação à circunferência do fuste).

Com base nos resultados da tabela 12 tem-se que nenhuma das árvores avaliadas apresentou comprometimento de sua estabilidade por falta de atendimento ao parâmetro de segurança relacionado à parede residual mínima preconizado por Matteck & Breloer (1994). Ou seja, considerando-se esse quesito apenas, todas as árvores foram consideradas mecanicamente estáveis.

Com relação à confiabilidade do método da percussão (uso do martelo de borracha), foi realizada uma análise comparando-se os dados de perfuração com os resultados do teste do martelo de borracha.

Na **tabela 13** a seguir tem-se sistematizados ambos os conjuntos de dados para melhor visualização.

Tabela 13. Correspondências entre os dados obtidos com o teste do martelo e com o método da perfuração.

Código da Árvore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Detecção de cavidade com o teste do martelo de borracha	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	sim
Cavidade detectada com a perfuração	sim	sim	sim	sim	sim	não	sim	sim	não	sim	
PD obtido com a perfuração - PDp (%)	33.2	30.04	33.37	4.25	4.9	0	0.67	0.12	0	2.05	
Quantidade de Acertos	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	

Fonte: Dados obtidos em campo.

Pelos dados da tabela 13 verifica-se que os acordos entre o teste do martelo e o da perfuração corresponderam a 80% de acertos diretamente. Porém, esse percentual direto apenas não leva em consideração a análise marginal dos desacordos ou a frequência com que os métodos podem estar concordando por acaso, não oferecendo uma análise adequada da concordância entre os métodos.

Para avaliar o nível de confiabilidade do teste do martelo, considerando que o método da perfuração foi infalível ao determinar diretamente a existência de cavidade no lenho, calculou-se o Coeficiente de kappa de Cohen – k (Cohen, 1960) a partir da sistematização dos dados de acordos e desacordos entre os testes conforme mostra a **tabela 14**.

Tabela 14. Sistematização dos dados de acordos e desacordos entre os métodos do martelo e da perfuração.

		Método da Perfuração		Total
		Indica cavidade	Não indica cavidade	
Teste do Martelo	Indica cavidade	7	1	8
	Não indica cavidade	1	1	2
Total		8	2	10

Fonte: Extraídos da tabela 12.

O coeficiente de kappa (k) foi calculado pela **equação 8** a seguir.

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \quad \text{eq. 8}$$

Onde:

Po – concordância observada

Pe – concordância por acaso

Os resultados do teste de kappa de Cohen encontram-se na **tabela 15**.

Tabela 15. Resultados do teste de kappa de Cohen para os métodos do martelo e da perfuração.

Concordância observada	Concordância esperada	Coeficiente kappa (k)	Intervalo de confiança 95%	a p-valor	Nível de concordância (Landis & Koch, 1977)
80%	68%	0,375	-0,400 a 1,150	0,1178	Razoável

Fonte: Medidas originadas no Biostat e Microsoft Excel (2010).

O nível de concordância expresso pelo coeficiente de kappa está de acordo com a classificação estabelecida por Landis & Koch (1977), os quais admitiram seis níveis de concordância para o coeficiente de kappa: menor que 0 – ausência de concordância, 0 a 0,20 – concordância mínima, 0,21 a 0,40 – concordância razoável, 0,41 a 0,60 – concordância moderada, 0,61 a 0,80 – concordância substancial e de 0,81 a 1,00 – concordância perfeita. Já McHugh (2017), de forma mais conservadora, propôs os seguintes níveis de concordância: 0 a

0,20 – nenhuma concordância, 0,21 a 0,39 – concordância mínima, 0,40 a 0,59 – concordância fraca, 0,60 a 0,79 – concordância moderada, 0,80 a 0,90 – concordância forte, e acima de 0,90 – concordância quase perfeita.

Apesar de o coeficiente de kappa ter sido considerado razoável segundo Landis & Koch (1977) ou mínimo, segundo McHugh (2017), atribui-se essa baixa replicabilidade do método do martelo a alguns fatores tais como: pouca experiência do operador do método e ao baixo percentual de dano interno no lenho daqueles indivíduos arbóreos (notadamente as árvores de código 6 e 8) o que dificultou a sua detecção. Pela tabela 13 depreende-se que o percentual de acordos entre os métodos foi maior para as árvores que apresentaram percentual de dano no lenho maior que 2%.

A verificação da existência de alguma relação entre o percentual de dano no lenho (variável quantitativa) e a combinação de detecção de cavidades pelos métodos do martelo e da perfuração (variável qualitativa) foi feita através da análise do ganho relativo na variância. Para essa análise, foram discriminadas quatro categorias segundo a combinação entre os métodos, conforme a **tabela 15**.

Tabela 16. Correspondências entre os dados obtidos com o teste do martelo e com o método da perfuração.

Categoria	Árvores código	Percentual de dano – PDp		
		Média	Desvio padrão	Variância
A Detecção de cavidade com o teste do martelo de borracha e com o método da perfuração	1, 2, 3, 4,5, 7 e 10	15,50	14,56	211,99
B Detecção de cavidade com o teste do martelo de borracha, mas não com o método da perfuração	6	0	0	0
C Não detecção de cavidade com o teste do martelo de borracha, mas sim com o método da perfuração	8	0,12	0	0
D Não detecção de cavidade com o teste do martelo de borracha e com o método da perfuração	9	0	0	0

Fonte: Sistematizados a partir das tabelas 6 e 12.

O ganho relativo na variância (R^2) entre as categorias é dado pela **equação 9**, e consiste em aquilatar o grau de associação entre o percentual de dano no lenho (variável quantitativa), definido por PDp, e a detecção de cavidades pelos métodos do martelo e da perfuração (variável qualitativa), ou seja, se a chance de se detectar cavidades no lenho aumenta conforme se aumenta o PDp. O valor de R^2 varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior será o grau da associação entre as variáveis.

$$R^2 = 1 - \frac{\bar{s}^2}{s^2} \quad \text{eq. 9}$$

Onde:

\bar{s}^2 – variância ponderada das categorias

s^2 – variância total

O resultado do ganho médio da variância (R^2) foi de 0,3275 indicando que, apesar de moderada, existe uma associação entre as variáveis PDp e detecção de cavidade no lenho.

Desse modo, acredita-se que tende a ocorrer maior incremento no nível de concordância desse método com o método da perfuração, bem como ocorrer maior possibilidade de detecção de cavidade no lenho pelo método do martelo, quando este método for usado por operadores mais experientes e quanto maior for o percentual de dano no interior do lenho.

Ante os resultados obtidos com o presente trabalho, dadas as limitações de tempo para uma maior abrangência tanto de regiões quanto de diversidade botânica, recomenda-se a ampliação desse estudo em um número maior de amostras bem como em quantidade maior de espécies botânicas, de modo a se construir um banco de dados sobre velocidade de propagação de ondas mecânicas e de cavidades existentes nas diversas espécies botânicas, possibilitando assim correlações mais precisas entre as diferentes variáveis.

Outrossim, é recomendável que nos estudos similares ao presente seja inserida a análise histopatológica dos tecidos residuais removidos com a perfuração bem como nos tecidos de cicatrização no lenho, com o objetivo de avaliar se eventuais agentes bióticos envolvidos nesses ferimentos já estavam presentes no lenho antes da prospecção ou se de fato foram inoculados por essa operação, inclusive fazendo essa comparação em fustes onde foram usados produtos preservantes de madeira e onde não houve utilização de qualquer produto.

Por fim, recomenda-se a ampliação do estudo de confiabilidade do uso do método da percussão (martelo de borracha) em mais indivíduos arbóreos de diferentes espécies botânicas, inclusive com a participação de mais de um operador da técnica, com o objetivo de avaliar se haverá incremento na sensibilidade de detecção de cavidades ocultas no lenho.

5. CONCLUSÕES

- Nas condições do presente estudo e com as espécies botânicas analisadas, conclui-se que o método da perfuração do fuste para avaliação de cavidades no lenho de árvores urbanas apresenta moderada equivalência com o método da tomografia para o mesmo propósito;
- A utilização de boroscopia associada ao método da perfuração permite a visualização direta da extensão do dano no lenho das árvores urbanas em todas as direções, bem como a observação e coleta de amostras de eventuais agentes bióticos nas cavidades existentes;
- Houve melhoria na obtenção do percentual de dano no lenho quando foi realizado o ajuste da equação original de Zorzenon e Campos (2014), ao considerar a razão entre áreas superficiais em vez de distâncias lineares;
- É prudente que a avaliação das condições internas do lenho de árvores urbanas realizada com o método da tomografia por impulso seja complementada com métodos que determinem diretamente a região com tecidos danificados, sendo viável, técnica e economicamente, o método ajustado da perfuração proposto por Zorzenon e Campos (2014);
- As perfurações causadas aos tecidos do lenho nas árvores que foram submetidas à técnica da prospecção com o emprego da perfuratriz e broca foram cicatrizadas quase que totalmente em um período médio de quatro meses, através do seu preenchimento com novos tecidos produzidos pelas árvores; e
- O método da percussão, com o uso do martelo de borracha, constitui-se numa técnica preliminar e viável economicamente para a sondagem inicial que sugira a detecção de danos internos no lenho de árvores urbanas, notadamente quando existirem proporções maiores de lenho danificado, e desde que o operador da técnica possua experiência adequada para sua execução.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. E. D. **O mundo mais urbanizado e as cidades virando saunas**. 2021. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2021/01/27/o-mundo-mais-urbanizado-e-as-cidades-virando-saunas/>>, acesso em: 05 de junho de 2022.
- ALVES, M. C. A.; MARTINI, A. Potencial de falha dos indivíduos de *Spathodea campanulata* existentes no campus da UFV, em Viçosa-MG. **REVSBAU**, Curitiba: PR, v.15, p.13-27, 2020.
- AMARAL, R. D. A. M. **Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis, na cidade de São Paulo**. Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba: SP, 2002. 71p.
- ARBOR DAY FOUNDATION. **The economics of urban forestry**. Tree City USA Bulletin, november-december/2021. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.246-3: Florestas urbanas - Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas Parte 3: Avaliação de risco de árvores**. Rio de Janeiro, p.14. 2019.
- AYRES, M. *et al.* **BioEstat 5.0 – Aplicações Estatísticas nas Áreas das Ciências Biológicas e Médicas**. Belém: ONG Mamiraua, 2007. ISBN 978-8585924102.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. **Diário da República Federativa do Brasil**. Brasília, 5 out. 1988.
- BRASIL. Lei nº 10.257, de 10/07/2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário da República Federativa do Brasil**. Brasília, 11 jul. 2001.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25/05/2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário da República Federativa do Brasil**. Brasília, 28 mai. 2012.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de lei – PL 4309/2021**. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2310535>>, acesso em: 30 de julho de 2022.
- CARVALHO, A. L. P; FERREIRA, D.; DOS SANTOS, M. C. P. N. Análise de risco de queda de árvores: *Tilia tomentosa* Moench. **REVSBAU**, Curitiba: PR, v.14, p.01-16, 2019.
- CARVALHO, C. A. **Tomógrafo de impulso como método não destrutivo para determinação da sanidade de árvores plantas às margens do rio Carahá no município de Lages/SC**. 87p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2019.
- CARVALHO, E. F. **Perícia ambiental: elementos básicos**. Goiânia: GO, GEV, 2001. 433p.
- CASTRO, V. R. 2011. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. Et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.)**. dissertação, Universidade de São Paulo, Escola Superior de

Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-13092011-112235/publico/Vinicius_Resende_de_Castro_versao_revisada.pdf>, acesso em 12/08/2022.

COHEN J. A. **Coefficient of agreement for nominal scales**. Journal of Educational and Measurement, v.20, n.1, p.37-46. 1960.

CONCEIÇÃO, I. J.; SAMOLÃO, R. P.; SANTANA, A. C. Proposal for a system of trees fall potential risk assessment in urban park1. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 4, p. e410408, 2017.

DIEESE; MDA. **Estatísticas do meio rural 2010-2011**. 4ed. São Paulo: DIEESE, NEAD, MDA, 2011. 292p.

DIENER, A.; MUDU, P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. **Science of the Total Environment**, 796, 2021, 18p.

DUARTE, P. G. S. **Comparação de métodos de análises de risco de queda de árvores urbanas: eficiência técnica, ergonômica e econômica**. Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR, Dois Vizinhos: PR, 2018. 89p.

DUNSTER, J. A.; SMILEY, E. T.; MATHENY, N.; LILLY, S. **Tree Risk Assessment Manual**. Champaign, International Society of Arboriculture. 2013.

DUNTEMANN, M; STUART. N. **Uma avaliação de sistemas ordinais de avaliação de risco de árvores**. Natural Path Urban Forestry, 2016. 6p.

EBC. **IBGE inicia ação do Censo 2022 pesquisando entorno de domicílios**. Agência Brasil, 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-06/ibge-inicia-acao-do-censo-2022-pesquisando-entorno-de-domicilios#:~:text=A%20Pesquisa%20Urban%C3%ADstica%20do%20Entorno,relevantes%20para%20a%20administra%C3%A7%C3%A3o%20p%C3%ABblica>>, acesso em 20/06/2022.

EMBRAPA. **Áreas urbanas no Brasil em 2015**. Dados vetoriais, mar./2018. Embrapa Gestão Territorial. Disponível em: <http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15>, acesso em: 04 de junho de 2022.

EMERICK, T. G. **Risco de queda de árvores urbanas: a associação entre os parâmetros de da análise visual, tomogramas e ocorrência de queda**. 134p. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

EVERS, H. *et al.* **DOTS nos planos diretores: guia para inclusão do desenvolvimento orientado ao transporte sustentável no planejamento urbano**. WRICidades.org, 132p. jan/2018.

FARIAS, A. R. *et al.* **Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, Comunicado Técnico 4. 2017. 5p.

FERREIRA, M. A. *et al.* Métodos diagnósticos da podridão do lenho de árvores vivas. **In:** ALFENAS, A. C.; MAFIA, R. G. editores. Métodos em Fitopatologia, 2ed., Editora UFV, Viçosa: MG, 516p., 2016.

FILIP, G. M. *et al.* **Field guide for hazard-tree identification and mitigation on developed sites in Oregon and Washington forests.** U.S. Department of Agriculture (USDA)/Forest Service, Oregon Department of Forestry, Washington State Department of Natural Resources, 120p., 2014.

GAETE, C. M. **Mapa da urbanização no mundo entre 1950 e 2030.** 9mar2015. Trad. Julia Brant. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/763172/mapas-a-urbanizacao-no-mundo-entre-1950-e-2030>>, acesso em: 4jun.2022.

HERMS. **How are trees affected by climate change?** The Davey Tree Expert Co., 2022. Disponível em: <<https://blog.davey.com/2022/06/how-are-trees-affected-by-climate-change/>>, acesso em 19/06/2022.

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

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa.** Rio de Janeiro: Objetiva, 2001. 2922p.

IBGE. **Censo demográfico.** 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>, acesso em: 05 de junho de 2022.

IBGE. **Projeção da população por sexo e idade – 2010 a 2060.** Atualizado em 06/04/2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>>, acesso em: 04 de junho de 2022.

INMET. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa – BDMEP.** 2013. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>, acesso em: 9 de agosto de 2022.

IPT. Árvores nas cidades: Consultora do IPT concede entrevista à Record News sobre arborização urbana. **Giulina Velasco, 2017. Disponível em:** <https://www.ipt.br/ipt_na_midia/546-arvores-nas-cidades.htm#:~:text=Muito%20se%20fala%20sobre%20uma,no%20m%C3%Admimo%2012%20m%C2%B2%2Fhabitante>, acesso em 20/06/2022.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ARBORICULTURE. **Recognizing Tree Risk.** 2013. Disponível em: <https://www.treesaregood.org/Portals/0/TreesAreGood_Recognizing%20Tree%20Risk_0721.pdf>, acesso em: 31/07/2022.

ISO 45001:2018. **Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional - Requisitos com Orientação para Uso.** ABNT, Mai. 2018. 47p.

KLECHOWICZ, N. A. **Diagnóstico dos acidentes com árvores na cidade de Curitiba-PR.** Dissertação, UFPR, Curitiba: PR, 2001. 96p.

LÜTTGE, U.; BUCKERIDGE, M. Trees: structure and function and the challenges of urbanization. **Springer Nature**, Berlim, published on line, 8p., mar./2020.

- MANLY, B. F. J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. 3ª. ed. trad. Sara Ianda Carmona. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.
- MATTECK, C.; BRELOER, H. Field guide for visual tree assessment (VTA). **Arboricultural Journal**, v.18, p.1-23, 1994.
- MARTINS, B. C.; SANTOS, G. C. V. dos; LATORRACA, J. V. F. Oleoresin prospection in *Copaifera* L. trees by using impulse tomography. **CERNE**, v.27, n.1, 2021. doi: 10.1590/01047760202127012831.
- McHUGH, M. L. **Interrater reliability: the kappa statistic**. *Biochemia medica: Biochemia medica*, 22(3), 276-282. 2012.
- MILLER, R. H.; MILLER, R. W. Planting survival of selected street tree taxa. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 17, n. 7, p.185-191, jul./1991.
- MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 297p.
- MIT/WEF. **Treepedia**. 2022. Disponível em: <<http://senseable.mit.edu/treepedia>>, acesso em: 3 de julho de 2022.
- MMA. **Brasil participa de reunião das Nações Unidas que discute metas de redução de gases na atmosfera**. 2022. Disponível em: <<http://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/brasil-participa-de-reuniao-das-nacoes-unidas-que-discute-metas-de-reducao-de-gases-na-atmosfera>>, acesso em: 20 jul.2022.
- MRV&CO. **Rewilding urbano: a floresta agora é dentro da cidade**. *Habitability*, 8jun2022. Disponível em: <<https://habitability.com.br/rewilding-urbano-a-floresta-agora-e-dentro-da-cidade/>>, acesso em: 18jun.2022.
- NEUFELD, J. L. **Estatística aplicada à administração usando Excel**. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 434p.
- ONU. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>, acesso em: 5 de junho de 2022.
- PACHECO, P. **O que gera a densidade urbana e quais os efeitos do adensamento nas cidades**. WRI Brasil, mai./2017. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2017/05/o-que-gera-densidade-urbana-e-quais-os-efeitos-do-adensamento-nas-cidades>>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- PACHECO, P. **Além do ar puro: os benefícios econômicos da arborização urbana**. *The City Fix Brasil/WRI Brasil*. 2016. Disponível em: <<https://www.thecityfixbrasil.org/2016/06/14/alem-do-ar-puro-os-beneficios-economicos-da-arborizacao-urbana/>>, acesso em 17/07/2022.
- PALERMO, L. F.; SILVA, L. V.; FARIAS, A. P. G. O engenheiro agrônomo e suas ferramentas. **Jornal AEARJ**, RJ: Rio de Janeiro, ano 7, n.9, Especial 2021, p. 15-17. 2021.

PEREIRA, L. C.; SILVA FILHO, D. F.; TOMAZELO FILHO, M.; COUTO, H. T. Z.; MOREIRA, J. M. M. Á. P.; POLIZEL, J. L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 65-75, 2007.

PERKONS. **Acidente com árvore não é fatalidade, é crime**. 2012. Disponível em: <<https://www.perkons.com/noticias/acidente-com-arvore-nao-e-fatalidade-e-crime/>>, acesso em 06/06/2022.

PERLIN, L. P. **Tomografia ultrassônica em concreto e madeira: desenvolvimento de ferramenta computacional**. 278p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAXIAS DO SUL. **Plano Diretor de Arborização Urbana de Caxias do Sul**. Caxias do Sul, RS: Prefeitura Municipal de Caxias do Sul, 2020. 102p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIÂNIA. **Plano Diretor de Arborização Urbana de Goiânia**. Goiânia, GO: Prefeitura Municipal de Goiânia, 2008. 134p.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. **Central de atendimento 1746 – análise de serviços**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTdiMjMxYTItZWNjZi00YmM3LWIwMzUtZjljMmZhNjFkZDBhIiwidCI6IjcyODMxNDVILTQyYjEtNDVIZi1iMzJiLTE3ZTk2OTIhNWRjOSJ9>>, acesso em: 29/05/2022.

RIO DE JANEIRO. Portaria FPJ nº 136, de 17/07/2018. Estabelece procedimentos para análise técnica visual de espécimes arbóreos, situados em áreas públicas e privadas, nas solicitações de remoção, poda e transplantio e dá outras providências. **Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 24 jul. 2018.

ROLLO, F. M. A. **Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (*Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze)**. [Dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2009. Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-16032010-142305/pt-br.php>. [acessado em 24 de julho de 2020].

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

SANTAMOUR JR., F. S. Trees for urban planting: diversity, uniformity and common sense. **In**: Conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance, 7., 1990, Lisle. Proceedings... Lisle: Metria, 1990. p.57-65.

SANTOS, P. M. *et al.* **8 princípios da calçada: construindo cidades mais ativas**. WRICidades.org, 136p. ago./2017.

SEITZ, R. A. A avaliação visual das árvores de risco. **Revista Ação Ambiental**. v.33: p.15-20, 2005.

SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. **NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis**. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. doi:10.1038/nmeth.2089. 2012.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas da propriedade da madeira de *Pinus taeda* através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 151p. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in climatology, v. 8).

UKRI. **Living near woodlands is good for young people’s mental health**. 2021. Disponível em: <<https://www.ukri.org/news/living-near-woodlands-is-good-for-young-peoples-mental-health/#:~:text=Analysis%20of%20young%20people's%20proximity,of%20emotional%20and%20behavioural%20problems.>>, acesso em: 05 de junho de 2021.

VAN DEN BOSCH, C. K. Introducing the 3-30-300 rule for urban forestry. **In:** Congresso Brasileiro e Iberoamericano de Arborização Urbana. 3 a 6 outubro/2021.

VIGEVANI, I. *et al.* Particulate Pollution Capture by Seventeen Woody Species Growing in Parks or along Roads in Two European Cities. **Sustainability**, 14, 1.113, jan./2022, 20p.

WANG, J.; ZHOU, W.; JIAO, M. Location matters: planting urban trees in the right places improves cooling. **Frontiers in Ecology and the Environment**, doi:10.1002/fee.2455. The Ecological Society of America, 2022, 5p.

WRI BRASIL. **Cities4Forests**. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/o-que-fazemos/projetos/cities4forests>>. Acesso em: 05 de junho 2022.

WRI BRASIL. **Potencial das áreas verdes de reduzir as desigualdades nas cidades ainda é subestimado**. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/potencial-das-areas-verdes-de-reduzir-desigualdades-nas-cidades-ainda-e-subestimado>>. Acesso em: 05 de junho 2022.

ZHOU, W. *et al.* Urban tree canopy has greater cooling effects in socially vulnerable communities in the US. **One Earth**, 4, 1764–1775, dec./2021.

ZORZENON, F. J.; CAMPOS, A. E. C. Methodology for internal damage percentage assessment by subterranean termites in urban trees. **Sociobiology**. 61(1), p.78-81, mar./2014.

8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BEASLEY, C. R. **Bioestatística usando R – apostila de exemplos para o biólogo**. Bragança: Universidade Federal do Pará. 2004. 56p.

BUSSAB, W. O. & MORETTIN, P. A. **Estatística básica – Métodos quantitativos**. 4.ed. São Paulo: Atual, 1987. 321p.

BUSSAB, W. O.; MIAZAKI, E. S.; ANDRADE, D. F. Introdução à análise de agrupamentos. **In:** 9º. Simpósio nacional de Probabilidade e Estatística. Associação Brasileira de Estatística-ABE. São Paulo: SP. Jul./1990. 104p.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255p.

COSTA, S. F. **Introdução ilustrada à estatística**. 4.ed. São Paulo: Harbra, 2005. 399p.

LARSON, R. & FARBER, B. **Estatística aplicada**. 2.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. 476p.