

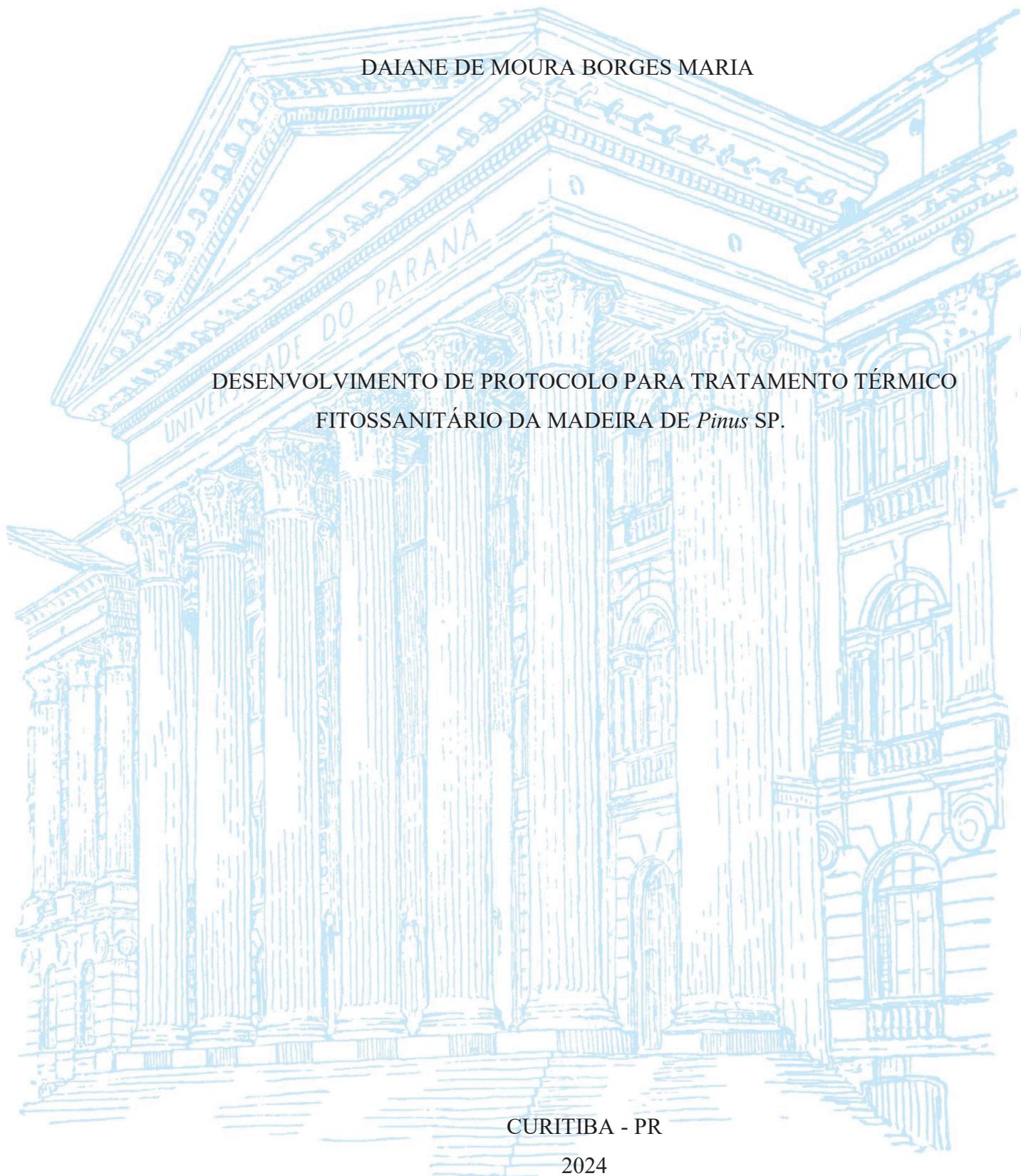
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAIANE DE MOURA BORGES MARIA

DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA TRATAMENTO TÉRMICO
FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

CURITIBA - PR

2024



DAIANE DE MOURA BORGES MARIA

DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA TRATAMENTO TÉRMICO
FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientadores:

Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha e

Prof. Dr. Romano Timofeiczuk Junior

CURITIBA - PR

2024

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

Maria, Daiane de Moura Borges

Desenvolvimento de protocolo para tratamento térmico fitossanitário da
madeira de Pinus sp. / Daiane de Moura Borges Maria. - Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Jorge Klitzke

Coorientadores: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Prof. Dr. Romano Timofeiczuk Junior

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:
Curitiba, 16/08/2024.

1. Madeira - Tratamento térmico. 2. Madeira - Secagem. 3. Fitossanidade -
Normas. 4. Embalagens - Normas. 5. Pragas - Controle. 6. Invasões biológicas
- Prevenção. 7. Pinheiro - Doenças e pragas - Controle. I. Klitzke, Ricardo Jorge.
II. Rocha, Márcio Pereira da. III. Timofeiczuk Junior, Romano. IV. Universidade
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 639.96

CDU - 630*84

634.0.84

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga - CRB9/424



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

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **DAIANE DE MOURA BORGES MARIA** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLO PARA TRATAMENTO TÉRMICO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE *Pinus sp.*** sob orientação do Prof. Dr. RICARDO JORGE KLITZKE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 16 de Agosto de 2024.

Assinatura Eletrônica
19/08/2024 16:12:36.0
RICARDO JORGE KLITZKE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
20/08/2024 11:25:10.0
BÁRBARA LUÍSA CORRADI PEREIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica
19/08/2024 13:25:37.0
JOÃO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica
19/08/2024 13:46:40.0
VICTOR GONÇALVES CREMONEZ
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
20/08/2024 09:00:44.0
RAQUEL MARCHESAN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

Mãe e Pai, tudo nesta minha caminhada é por vocês!

Dedico.

Se a tua dor te aproxima de Deus, agradeça.

(Autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada nesta jornada seria possível. Deus tem sido minha fortaleza e em todas as vezes que estive à beira de desistir dos meus sonhos, Ele segurou firmemente minha mão. Obrigada, Javé, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus pais, Inácio e Maria Aldenia, agradeço por ter crescido cercada de amor. Desde muito cedo vocês me ensinaram a enfrentar o mundo, mesmo sabendo que a jornada jamais seria fácil. Aprendi com vocês a jamais esquecer minhas raízes, não importa o quão longe eu vá em busca de meus sonhos. Aos meus irmãos, Dailton, Douglas e Adaticlea, obrigada pelo amor direcionado a mim e pela demonstração constante do orgulho que têm sentem de mim. Aos meus avós paternos, José e Antônia (*in memoriam*), e avós maternos, Eurípedes e Maria, por todo incentivo, vocês são meu alicerce, minha memória de família batalhadora. Agradeço também aos demais familiares que estão sempre presentes em minha vida. Amo vocês imensamente.

Ao meu namorado, Leonardo Kuhn, agradeço por seu amor, humor e paciência, que tornaram tudo mais leve ao longo desta caminhada. Você esteve ao meu lado nas minhas piores fases e cuidou de mim, sempre me fazendo rir em meio ao caos. A vida é boa com você. Agradeço também à sua família por me acolher e por todo o carinho e cuidado que sempre demonstraram.

Agradeço aos amigos que vida me deu. Desde os meus melhores amigos de infância, que são responsáveis por muito do que sou hoje, até os amigos da pós-graduação e do laboratório, pelos risos compartilhados e por toda a ajuda a mim direcionada. Não vou citar nomes dos amigos, pois não quero cometer a injustiça de acabar me esquecendo de alguém que é importante, mas preciso agradecer especialmente aos amigos do apartamento 301 e aos amigos da família pirraça. Saibam que uma nova e melhor versão de mim brotou ao conviver com vocês. Obrigada a todos que me estenderam a mão, aos que permaneceram, aos que me deixaram uma lição de amor, companheirismo, leveza, fé, respeito e de como é possível ter uma família mesmo longe de casa. Sozinha, eu jamais teria conseguido.

Quero agradecer ao meu orientador, o inigualável Ricardo Klitzke, por sua orientação um tanto quanto desafiadora, mas que me fez crescer muito. Agradeço pelas risadas, pelas comemorações no laboratório, pelo incentivo na vida profissional e pelos ensinamentos. Tenho um carinho enorme pelo senhor.

Agradeço ao meu comitê de orientação e especialmente ao Professor Márcio, que nos acolheu com essência paterna, fazendo toda a diferença na adaptação de tantos aqui. Ao Professor Romano, meu coorientador, agradeço pelos ensinamentos e por aceitar o desafio de me orientar em um tema diferente da sua linha de atuação. Agradeço também aos membros e suplentes da banca examinadora pela avaliação cuidadosa e pelo tempo dedicado à minha tese.

Agradeço a todos os professores e profissionais internos e externos a esta instituição, pelos ensinamentos valiosos cujas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese, tanto na análise bibliométrica quanto na análise estatística. Agradeço também aos técnicos, funcionários da limpeza, do restaurante, da segurança e os secretários da UFPR, que nos auxiliaram em nossos experimentos e fizeram parte dessa jornada acadêmica. Todos são competentes e atenciosos, mas Davi, Míria, Dioneia e Gilmara ultrapassaram a barreira acadêmica e hoje ocupam um lugarzinho no meu coração.

Agradeço ao Mauro Murara e à ACR por todo o incentivo e pelo direcionamento na importância do tema deste trabalho. A Ricardo Uchôa, meu sincero agradecimento pela ajuda desde o início desta tese. Obrigada por contribuir e acreditar no desenvolvimento deste trabalho. À empresa SOLIDA BRASIL, por disponibilizar material essencial para nossos experimentos, e a toda a equipe da empresa MARRARI, agradeço pelo apoio técnico, desde a calibração dos equipamentos até os esclarecimentos sobre a automação. Um agradecimento especial aos funcionários Alberto e André. Agradecemos ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) pelo apoio e incentivo.

Agradeço à UFPR e ao PPGEF, pela infraestrutura que permitiu a realização de todos os experimentos. Agradeço ao CNPq e à CAPES pela concessão de bolsa. Concluo dizendo que desenvolver um doutorado durante a pandemia de Covid-19 e em meio a cortes de verbas na educação, foi uma verdadeira prova de resiliência e superação. Tenho plena convicção que eu não teria vencido sem a rede de apoio (anjos) que Deus carinhosamente colocou em torno de mim. Portanto, a todos os seres vivos que cruzam meu caminho e contribuem direta ou indiretamente com minha evolução pessoal e acadêmica, muito obrigada!

RESUMO

De forma a garantir o tratamento fitossanitário adequado contra pragas de risco florestal, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), exige o uso de sensores e controladores lógicos programáveis durante os tratamentos térmicos de Embalagens e Suporte de Madeira (ESM). Essa medida é obrigatória a menos que seja apresentado um protocolo a ser avaliado pelo MAPA ou que seja realizada a uma série de recomendações que são destinadas apenas a madeira de coníferas. Diante disso este trabalho foi dividido em capítulos visando atender alguns critérios. No capítulo I apresentou-se a estrutura geral da tese; no capítulo II levantou-se informações sobre o tratamento fitossanitário da madeira no mundo e no capítulo III, desenvolveu-se um protocolo de monitoramento da temperatura do ambiente para estimar a temperatura interna da madeira de *Pinus* sp. Para efetivação do capítulo II, informações sobre tratamento fitossanitário da madeira em conformidade com a norma Norma Internacional de Medidas Fitossanitárias nº 15 (NIMF 15) foram levantadas a partir da base de dados científicos *Scopus* (*Elsevier*TM) com o auxílio de palavras-chave. Observou-se que a revisão bibliométrica descreveu qualitativa e quantitativa o avanço mundial das publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira em torno da NIMF 15, demonstrando o panorama científico geral sobre tratamentos fitossanitários para madeira. Palavras-chave como "*phytosanitary treatment*", "*heat treatment*", "*ISPM 15*", "*invasive species*" e "*wood packaging material*", norteiam os principais eixos temáticos das pesquisas na área, demonstrando a importância desses termos no contexto das ciências agrárias. Além disso artigos sobre tratamento fitossanitário dentro da NIMF 15 com uso de modelagem estavam presentes em menos de 5% das publicações analisadas. Finalmente, para efetivação do capítulo III, foram realizadas análises experimentais utilizando madeira de *Pinus* sp. com 15 anos de idade. As amostras de madeira para secagem em estufa convencional foram perfuradas no centro para introdução dos termopares, a fim de monitorar as temperaturas internas durante o processo de secagem. Foram elaborados dois programas de secagem e analisada a qualidade da madeira após a secagem. Os dados coletados foram analisados por meio ANOVA, bem como a análise de correlação de *Pearson* com intervalo de confiança de 95% entre as variáveis analisadas. A construção do modelo matemático ocorreu por meio de análises experimentais e técnica de regressão linear múltipla *stepwise*. O desenvolvimento das modelagens estatísticas foi capaz de prever a temperatura interna da madeira e otimizar o processo envolvido no tratamento fitossanitário da madeira, através do tratamento térmico em estufa convencional. Os resultados do processo de secagem convencional atenderam os requisitos de qualidade. Observou-se que na secagem propriamente dita, o aquecimento interno da madeira sofreu mais influência da temperatura do ambiente do que das demais variáveis. A espessura foi a segunda variável de maior influência positiva na temperatura interna da madeira, mas fraca. O ajuste para estimativa da temperatura central da madeira em função das variáveis analisadas apresentou coeficientes de correlação satisfatórios, acima de 0,98 com erro padrão da estimativa inferior a 1%, ao considerar um processo de secagem completo. O ajuste para estimativa de tempo de aquecimento interno da madeira em função das variáveis analisadas apresentou coeficientes de correlação acima de 0,78 e com erro padrão da estimativa de aproximadamente 10%. Diante disso, modelagens estatísticas tem potencial para serem implementadas como método de tratamento térmico fitossanitário para madeira de *Pinus* sp. Para aprimoramento da pesquisa recomenda-se replicação dos experimentos com dados em escala industrial.

Palavras-chave: Fitossanidade; tratamento térmico; NIMF 15; embalagem e suporte de madeira; modelagem estatística.

ABSTRACT

To ensure proper phytosanitary treatment against forest risk pests, the Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) mandates the use of sensors and programmable logic controllers during the heat treatment of Wood Packaging Materials (WPM). This requirement is compulsory unless a protocol is submitted for evaluation by MAPA, or a series of recommendations, which apply exclusively to coniferous wood, is followed. Consequently, this work was structured into chapters to meet specific criteria. Chapter I presented the general structure and foundational basis of the thesis; Chapter II gathered information on wood phytosanitary treatment worldwide, and Chapter III developed a protocol for monitoring ambient temperature to estimate the internal temperature of *Pinus* sp. wood, in compliance with MAPA phytosanitary requirements. For Chapter II, information on wood phytosanitary treatment in accordance with ISPM 15 was sourced from the Scopus (Elsevier™) scientific database using carefully selected keywords. The bibliometric review revealed a qualitative and quantitative description of the global progress of publications on wood phytosanitary treatment under the International Standards for Phytosanitary Measures No. 15 (ISPM 15), providing a broad scientific overview of the currently accepted phytosanitary treatment methods. The predominant keywords in the analyzed articles, such as "phytosanitary treatment," "heat treatment," "ISPM 15," "invasive species," and "wood packaging material," highlighted the main thematic focus areas of research in this field, demonstrating the relevance of these terms within agricultural sciences. Additionally, articles discussing phytosanitary treatment under ISPM 15 involving modeling represented less than 5% of the analyzed publications. Finally, in Chapter III, experimental analyses were carried out using 15-year-old *Pinus* sp. wood. The wood samples for drying in a conventional kiln were drilled at the center to insert thermocouples, allowing internal temperature monitoring during the drying process. Two drying programs were developed, and the wood quality after drying was assessed. The collected data were analyzed using ANOVA and Pearson's correlation analysis with a 95% confidence interval between the analyzed variables. The mathematical model was constructed through experimental analysis and the stepwise multiple linear regression technique. The experimentally generated data contributed to the development of statistical models capable of predicting the internal temperature of the wood and optimizing the processes involved in wood phytosanitary treatment via conventional kiln heat treatment. The results of the conventional drying process met the required quality standards. It was observed that during the drying process itself, the internal heating of the wood was more influenced by ambient temperature than by other variables. Wood thickness was the second variable with the highest positive influence on the internal temperature of the wood, although weak. The model for estimating the core temperature of the wood based on the analyzed variables showed satisfactory correlation coefficients, above 0.98, with a standard error of estimate below 1%, considering a complete drying process. The model for estimating internal wood heating time based on the analyzed variables had correlation coefficients above 0.78, with a standard error of estimate around 10%. Therefore, statistical models have the potential to be implemented as a phytosanitary heat treatment method for *Pinus* sp. wood. To enhance the research, it is recommended that the experiments be replicated with industrial-scale data.

Keywords: Phytosanitary; heat treatment; ISPM 15; wood packaging material; statistical modeling.

LISTA DE SIGLAS

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ESM - Embalagens e Suporte de Madeira
NIMF 15 - Norma Internacional de Medidas Fitossanitárias de número 15
ONPF - Organização Nacional de Proteção Fitossanitária
IPPC - International Plant Protection Convention
NPPO - National Plant Protection Organizations
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations
HT – Tratamento Térmico
DH – Aquecimento Dielétrico
MB – Brometo de Metila
CT – Concentração-Tempo
SF - Fluoreto de Sulfúrico
IN - Instrução Normativa
CLP – Controlador Lógico Programável
ISPM 15 - International Standards for Phytosanitary Measures n° 15
WPM – Wood Packaging Materials
EPPO Bulletin - European and Mediterranean Plant Protection Organization
AQUIS - Australian Quarantine and Inspection Service
AQUIM - Agriculture Quarantine Inspection Monitoring
IFQRG - Grupo Internacional de Pesquisa em Quarentena Florestal
Vigiagro - Vigilância Agropecuária Internacional
NMP - Nematóide da Madeira do Pinheiro
UE - União Europeia
EUA – Estados Unidos da América
DC – Doença do Cancro
RNA – Redes Neurais Artificiais
TBS – Termômetro de Bulbo Seco
TBU – Termômetro de Bulbo Úmido
UR - Umidade Relativa
UEM - Umidade de Equilíbrio da Madeira
PS - Potencial de Secagem
MEB - Massa Específica Básica
MEapv - Massa Específica Aparente Verde
MEaps - Massa Específica Aparente Seca

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - NÚMERO DE DOCUMENTOS DE ACORDO COM A) O ANO DE PUBLICAÇÃO, B) TIPO DE DOCUMENTO PUBLICADO, C) PERÍODICO DE PUBLICAÇÃO E D) INSTITUIÇÕES FINANCIADORAS	41
Figura 2 - PRINCIPAIS ÁREAS DA CIÊNCIA DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DA <i>SCOPUS</i> PARA OS ARQUIVOS INDEXADOS SOBRE TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO	42
Figura 3 - CLUSTERS DE CO-OCORRÊNCIA E FORÇA DE LIGAÇÃO EM DOCUMENTOS INDEXADOS NA <i>SCOPUS</i> NO PERÍODO DE 2004 ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023 DE A) TODAS AS PALAVRAS-CHAVE E B) APENAS DE PALAVRAS-CHAVE USADAS PELOS AUTORES	41
Figura 4 - ACOPLAMENTO BIBLIOGRÁFICO ENTRE OS AUTORES DOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA <i>SCOPUS</i> NO PERÍODO DE 2004 A 22 DE DEZEMBRO DE 2023.....	44
Figura 5 - ANÁLISE DE COAUTORIA EM RELAÇÃO AOS PAÍSES DOS PESQUISADORES DOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA <i>SCOPUS</i> NO PERÍODO DE 2004 A 22 DE DEZEMBRO DE 2023.....	45
Figura 6 - PRINCIPAIS MATERIAIS DE INTERESSE EM PESQUISA SOBRE TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA ABORDADOS NOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA PLATAFORMA <i>SCOPUS</i> NO PERÍODO DE 2004 ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023	47
Figura 7 - PRINCIPAIS PAÍSES DE ORIGEM DE MATERIAL CONTAMINADO, DE ACORDO COM OS DOCUMENTOS INDEXADOS NA <i>SCOPUS</i> ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023.	52
Figura 8 - PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE <i>Pinus</i> SP. FORNECIDAS POR UMA EMPRESA SITUADA NA CIDADE RIO NEGRINHO - SANTA CATARINA.....	90
Figura 9 - QUANTIDADE E DIMENSIONAMENTO DAS AMOSTRAS PARA AS ANÁLISES EXPERIMENTAIS*	91
Figura 10 - PERFURAÇÃO DE PEÇAS PARA ACOMPANHAMENTO DO PERFIL DA TEMPERATURA INTERNA DE MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	92
Figura 11 - VARIÁVEIS INICIAIS CONSIDERADAS PARA ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DA MADEIRA	93
Figura 12 - REVISÃO DOS PINOS SENSORES, INSERÇÃO NAS PEÇAS E VERIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR ENTRE AS PEÇAS DE MADEIRA NA ESTUFA	97
Figura 13 - IMPERMEABILIZAÇÃO DOS TOPOS DE PEÇAS DE <i>Pinus</i> SP. PARA SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL	98
Figura 14 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ACOMPANHAMENTO DAS TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP. EM TODOS OS TRATAMENTOS	99
Figura 15 - CURVAS DE SECAGEM DE TODOS OS TRATAMENTOS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	108

Figura 16 - RACHADURAS DE SUPERFÍCIE NA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP. APÓS SECAGEM ATÉ A 0% DE UMIDADE.	114
Figura 17 - ENCURVAMENTO, ARQUEAMENTO E ENCANOAMENTO DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP. A DIFERENTES TEORES DE UMIDADE.....	117
Figura 18 - LINHAS DE TENDÊNCIA ENTRE OS DEFEITOS DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP. E AS VARIÁVEIS ESPESSURAS, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA, TEORES DE UMIDADE, TEMPO E TEMPERATURAS.....	121
Figura 19 - DISPERSÃO RESIDUAL DOS DADOS PREDITOS PARA A TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.	131
Figura 20 - VALORES AJUSTADOS EM RELAÇÃO AOS VALORES OBSERVADOS DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA.....	132
Figura 21 - GRÁFICOS DO AJUSTE DAS MEDIDAS DIAGNÓSTICAS DE AUTOCORRELAÇÃO COM VALOR ATUAL BASEADO IMEDIATAMENTE NO VALOR ANTERIOR AR(1).	133
Figura 22 - CURVA DOS DADOS EXPERIMENTAIS E AJUSTADOS DE TEMPO DE AQUECIMENTO INTERNO DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP. DURANTE FASE DE AQUECIMENTO (a) E SECAGEM COMPLETA PARA TODOS OS TRATAMENTOS (b)	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - NOMES CIENTÍFICOS DOS PRINCIPAIS AGENTES XILÓFAGOS DE RISCO PARA ESP.ÉCIES FLORESTAIS	56
Tabela 2 - MADEIRAS MAIS ABORDADAS NOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA <i>SCOPUS</i> , ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023, RELACIONADOS AO TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA	59
Tabela 3 - SUGESTÕES DE CONTROLE OU MEDIDA DE SUPORTE CONTRA A DISSEMINAÇÃO DE AGENTES XILÓFAGOS DE MADEIRA MAIS ABORDADAS NOS DOCUMENTOS	69
Tabela 4 – PROGRAMAS DE SECAGEM DESENVOLVIDOS PARA TODOS OS TRATAMENTOS DA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i>	94
Tabela 5 - EQUAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SECAGEM	99
Tabela 6 – EQUAÇÕES PARA ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i>	101
Tabela 7 – MÉDIAS, COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E ERRO PADRÃO PARA AS VARIÁVEIS* DA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i>	103
Tabela 8 - TEMPO MÍNIMO NECESSÁRIO PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO CONFORME NIMF 15 EM TODOS OS TRATAMENTOS ANALISADOS.....	106
Tabela 9 - TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i>	107
Tabela 10 - CLASSIFICAÇÃO VISUAL DOS ÍNDICES DE RACHADURAS SUPERFICIAIS (%) NA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i> APÓS SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL	112
Tabela 11 - ÍNDICES DE RACHADURAS DE TOPO (%) NA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i> APÓS SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL	115
Tabela 12 - CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFEITOS DE SECAGEM (RACHADURA DE SUPERFÍCIE, RACHADURA DE TOPO, ENCURVAMENTO, ARQUEAMENTO, ECONCANOAMENTO) E O TEOR DE UMIDADE, MASSA ESP.ÉCÍFICA BÁSICA, MASSA ESP.ÉCÍFICA APARENTE (VERDE E SECA) DA MADEIRA DE <i>Pinus SP.</i>	119
Tabela 13 - CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA E AS VARIÁVEIS TEMPO, TEMPERATURA DE BULBO SECO, UMIDADE RELATIVA, UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA, UMIDADE DA MADEIRA, ESP.ESSURA E LARGURA DAS PEÇAS DE <i>Pinus SP.</i> , NA FASE DE AQUECIMENTO, ATÉ AS AMOSTRAS ATINGIREM 56 °C	125
Tabela 14 - CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA E AS VARIÁVEIS TEMPO, TEMPERATURA DE BULBO SECO, UMIDADE RELATIVA, UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA, UMIDADE DA MADEIRA, ESP.ESSURA E LARGURA DAS PEÇAS DE <i>Pinus SP.</i> , NA SECAGEM COMPLETA.....	128

Tabela 15 - TABELA COM COEFICIENTES ASSOCIADOS ÀS VARIÁVEIS E AS ESTATÍSTICAS	130
Tabela 16 - ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	134
Tabela 17 - TABELA COM COEFICIENTES ASSOCIADOS ÀS VARIÁVEIS E AS ESTATÍSTICAS (FASE DE AQUECIMENTO).....	138
Tabela 18 - APLICAÇÃO PRÁTICA DA ESTIMATIVA DE TEMPO PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.	139

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: ESTRUTURA DA TESE	168
1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE TESE	18
2 INTRODUÇÃO GERAL	19
3 OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4 REVISÃO DE LITERATURA	22
4.1 EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA NO BRASIL	22
4.2 MÉTODOS DE TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO TRADICIONAIS.....	24
4.3 PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS NA INDÚSTRIA MADEIREIRA BRASILEIRA	26
5. CONCLUSÕES	28
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
CAPÍTULO 2 - TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA NO MUNDO: AVANÇOS E LACUNAS	31
1 INTRODUÇÃO	31
2. OBJETIVOS	33
2.1 OBJETIVO GERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO E TRIAGEM DOS DOCUMENTOS	34
3.2 ESTADO DA ARTE DOS DOCUMENTOS	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO	37
4.2 ESTADO DA ARTE	46
5. CONCLUSÕES	78
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	789
CAPÍTULO 3: PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>PINUS SP.</i> DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO FITOSSANITÁRIO	88
1. INTRODUÇÃO	88
2. OBJETIVOS	89
2.1 OBJETIVO GERAL	89
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	89
3. MATERIAL E MÉTODOS	90
3.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO.....	90

3.2	ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM DA MADEIRA.....	92
3.3	GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA.....	95
3.4	ACOMPANHAMENTO DAS TEMPERATURAS NO CENTRO DAS PEÇAS	97
3.5	AVALIAÇÃO DOS DEFEITOS DE SECAGEM.....	99
3.6	TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA.....	100
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	100
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	103
4.2	PROGRAMA DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.	104
4.3	TEMPO DE AQUECIMENTO DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.	104
4.4	TAXA DE SECAGEM MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	104
4.5	CURVAS DE SECAGEM DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	108
4.6	DEFEITOS DE SECAGEM EM MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	112
4.7	CORRELAÇÕES ENTRE DEFEITOS DE SECAGEM E VARIÁVEIS DA MADEIRA DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	104
4.8	TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.	124
4.9	MODELOS ESTATÍSTICOS PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE <i>Pinus</i> SP.....	130
5.	CONCLUSÕES.....	141
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144

CAPÍTULO 1: ESTRUTURA DA TESE

1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE TESE

O presente trabalho de tese trata de assuntos relacionados ao tratamento fitossanitário da madeira, em abordagens diferentes que se complementam. Dessa forma, com o intuito de alcançar todos os objetivos, este documento foi organizado em capítulos, conforme a seguinte diagramação:

- Capítulo 1: Introdução geral, objetivo geral e objetivos específicos, organização do trabalho de tese, revisão de literatura, conclusões e referências bibliográficas.
- Capítulo 2: Tratamento fitossanitário da madeira no mundo: avanços e lacunas em quase 20 anos de estudos.
- Capítulo 3: Predição da temperatura interna da madeira de *Pinus* sp.
- Considerações finais, recomendações para trabalhos futuros e referências bibliográficas.

O capítulo 1 aborda a problemática principal da tese, apresentando conceitos básicos e demonstra a importância do tema, ao mesmo tempo em que faz um chamado para os próximos capítulos. O capítulo 2 demonstra os principais avanços e lacunas ainda existentes sobre tratamento fitossanitário da madeira, bem como o direcionamento das pesquisas científicas em todo o mundo sobre a temática

Por fim, o capítulo 3 aborda o desenvolvimento de um protocolo de programa de secagem para estimar a temperatura interna da madeira de *Pinus* sp. com o intuito de atender especificações recomendadas pelo MAPA e contribuir com o setor industrial madeireiro. Com exceção do capítulo 1, os demais estão organizados da seguinte em forma: título do capítulo, introdução, material e métodos, resultados e discussão, conclusões e referências bibliográficas.

2 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é o órgão oficial responsável pela a Organização Nacional de Proteção Fitossanitária (ONPF) do país. O MAPA é quem estabelece os regulamentos e diretrizes nacionais alinhados à Norma Internacional de Medidas Fitossanitária (NIMF 15) desenvolvida pela *International Plant Protection Convention (IPPC)* da *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. Os tratamentos fitossanitários internacionalmente aceitos pela NIMF 15 para as Embalagens e suportes de madeiras (ESM) são tratamento térmico (HT), aquecimento dielétrico (DH) e fumigação.

Há algumas possibilidades de tratamentos fitossanitários de acordo com a NIMF 15, que são eficientes contra as muitas pragas florestais ou insetos de madeira seca, que podem deslocar-se em ESM. Dentre os tratamentos fitossanitários, aqueles com uso de calor, em especial a secagem da madeira em estufa convencional, são considerados eficazes contra pragas quarentenárias. Isso se torna possível devido à transferência de calor do ambiente de secagem até a superfície da madeira, e posteriormente da superfície da madeira até o seu interior. O processo de secagem convencional pode durar semanas, a depender de diversos fatores, como temperatura, espécie da madeira, dimensões, teor de umidade inicial, destinação final, entre outros. Dessa forma, há maior garantia de eliminação de pragas na madeira.

Mesmo assim, o MAPA exige por meio da Instrução Normativa 32/2015 (MAPA, 2015) e Portaria n° 514 (MAPA, 2022a), o uso de sensores e controladores lógicos programáveis para acompanhar a temperatura interna da madeira, para garantir as especificações da NIMF 15. A medida visa proteger o país de novas pragas quarentenárias, as quais podem causar sérios danos econômicos e ambientais quando introduzidas em uma nação via ESM.

Essa medida é obrigatória a menos que seja apresentado um protocolo a ser avaliado pelo MAPA ou que sejam realizadas uma série de recomendações que são destinadas apenas a madeira de coníferas, conforme Portaria n° 514 (MAPA, 2022a). É neste contexto que o presente estudo, centrado no tratamento fitossanitário da madeira, pretendeu responder às seguintes questões:

- Que abordagens científicas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos sobre tratamento fitossanitário da madeira?
- Que tipos de protocolos têm sido propostos para implementação na NIMF 15?

- A utilização de sensores de temperatura na madeira durante o tratamento térmico por secagem em estufa convencional é indispensável?
- Um modelo estatístico consegue prever a temperatura interna da madeira com base em variáveis do ambiente de secagem e variáveis da madeira?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar informações atualizadas sobre o tratamento fitossanitário da madeira no mundo e desenvolver um protocolo de tratamento fitossanitário da madeira por meio de desenvolvimento de modelos estatísticos, para agilizar a certificação junto ao MAPA.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar por meio de um estudo bibliométrico as principais pesquisas que vem sendo desenvolvidas sobre tratamento fitossanitário da madeira.
- Discorrer sobre as principais mudanças com a implementação e atualizações da Norma Internacional de Medidas Fitossanitárias de número 15 (NIMF 15).
- Correlacionar a temperatura da madeira de *Pinus* sp. com as variáveis do ambiente de secagem (tempo, temperatura e umidade relativa do ar) e da madeira (umidade de equilíbrio, teor de umidade, largura e espessura);
- Realizar a predição da temperatura interna e do tempo de aquecimento da madeira de *Pinus* sp. durante secagem em estufa convencional.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA NO BRASIL

Além de estabelecer os regulamentos e diretrizes nacionais alinhados à NIMF 15, o MAPA também realiza fiscalização em pontos de entrada e saída de mercadorias, para garantir que as ESM estejam em conformidade com os requisitos fitossanitários estabelecidos. O órgão ainda emite certificação e autorização para empresas fornecedoras de tratamento fitossanitário da madeira para exportação.

As NIMF adotadas por mais de 180 países, possuem função de proteger a agricultura sustentável e melhoram a segurança alimentar global, além de proteger o meio ambiente e facilitar o desenvolvimento econômico e comercial. A primeira Norma Internacional para Medidas Fitossanitárias (NIMF) foi adotada em 1993 e em dezembro de 2019, já haviam 42 NIMF adotadas (CANTANHEDE, 2021).

Todas essas normas tratam de medidas fitossanitárias destinadas a prevenir a introdução e disseminação de pragas quarentenárias (NIMF 04, 1995; NIMF 9, 1998; NIMF 01, 2006). Isso inclui diretrizes para inspeção, certificação, tratamento e controle de pragas em produtos agrícolas e florestais (NIMF 3, 2005), embalagens e suporte de madeira (NIMF 15, 2009) e áreas de produção e comércio internacional (NIMF 01, 2006).

Ainda, abrangem uma variedade de temas, desde requisitos para importação e exportação de produtos agrícolas e florestais (NIMF 3, 2005) até o estabelecimento de áreas livres de pragas (NIMF 02, 2007; NIMF 04, 1995), uso de tratamentos fitossanitários (NIMF 18, 2003) e certificação de origem e gestão integrada de pragas (NIMF 9, 1998; NIMF 14, 2002; NIMF 28, 2009). O seu objetivo principal é garantir a segurança e a qualidade dos produtos agrícolas, proteger ecossistemas, evitar impactos negativos na saúde humana e promover o comércio internacional seguro e sustentável.

Uma das decisões de maior importância em termos de proteção fitossanitária foi a edição da NIMF 15, que trata de diretrizes para regulamentar as ESM utilizadas no mercado internacional (NIMF 15, 2009). O objetivo dessa NIMF foi estabelecer medidas fitossanitárias para eliminar ou diminuir a introdução da maioria das pragas quarentenárias, e reduzir o risco de outras pragas, como as pragas de madeira seca.

Esse tratamento recomendado para as ESM é o tratamento fitossanitário, que pode ser realizado apenas por empresas credenciadas. O MAPA credencia as empresas que podem executá-lo, emitir os respectivos certificados de tratamento, ou aplicar a marca IPPC, conforme prevê a NIMF 15. O objetivo do tratamento fitossanitário é de garantir que os produtos de origem vegetal arbóreo e seus produtos, bem como ESM, nas operações de exportação e importação, encontrem-se livres de pragas (MAPA, 2020).

Além das NIMF, O MAPA também estabelece instruções normativas e portarias que visam estabelecer critérios e procedimentos para a realização de tratamentos fitossanitários com fins quarentenários. Essas normas ocorrem conforme os padrões internacionais para medidas fitossanitárias publicadas pela FAO (MAPA, 2022b).

Dentre as instruções normativas acerca do tratamento fitossanitário de ESM, uma das mais antigas e importantes é a Instrução Normativa nº 4 (MAPA, 2004). Ela estabeleceu, dentre outras funções, os procedimentos de inspeção e fiscalização de ESM, utilizados no transporte de mercadorias no comércio internacional e passou a certificar as ESM destinadas a países que exigiam os procedimentos preconizados pela NIMF 15, avaliando os certificados de tratamento emitidos por empresas habilitadas e credenciadas pelo MAPA.

Anos depois, foi estabelecida a Instrução Normativa Nº 32, (MAPA, 2015) que dentre outras funções, aborda os procedimentos de fiscalização e certificação fitossanitária de ESM, destinados ao acondicionamento de mercadorias importadas ou a exportar. Preconiza que, toda ESM precisa passar por tratamento adequado para inibir a disseminação de pragas, seguindo o proposto pela NIMF 15. O tratamento fitossanitário pode ocorrer por meio de um dos três tratamentos aprovados internacionalmente: o tratamento térmico, aquecimento dielétrico e fumigação.

A IN 32/2015 (MAPA, 2015) esclarece os parâmetros adequados para a efetivação de cada tipo de tratamento fitossanitário, desde as condições da madeira a ser tratada até as condições das câmaras onde os tratamentos serão realizados. Essa IN exige o uso de sensores e controladores lógicos programáveis para acompanhar a temperatura interna da madeira durante o tratamento térmico, para garantir que o seu centro atinja a temperatura de 56 °C por um período mínimo de 30 minutos contínuos.

Essa IN também possibilita a realização do monitoramento do tratamento térmico com base apenas na temperatura do ar do ambiente interno da câmara (sem uso de sensores de

temperatura na madeira). Para isso deve ser estabelecido um programa de tratamento, a ser aprovado pelo MAPA. Esse programa de tratamento deve ser previamente estabelecido a partir de uma série de tratamentos-testes, onde a temperatura do centro da madeira deve ser medida e correlacionada com a temperatura do ar no interior da câmara, levando em conta a espécie, a espessura e a umidade das peças de madeira (MAPA, 2015).

Recentemente a portaria nº514 (MAPA, 2022a), revogou a Instrução Normativa nº 32/2015 (MAPA, 2015) e, dentre outras funções, passou a não exigir o uso de sensores de temperatura na madeira (apenas em coníferas), porém com adequação comprovada das recomendações exigidas ao tratamento térmico - HT por secagem em estufa convencional. Parâmetros como espessura da madeira, tempo e temperatura no interior da câmara de tratamento, estão entre as indicações exigidas na portaria para equivaler ao tratamento fitossanitário. Dessa forma, um exemplo é que peças com até 29 mm de espessura, quando passam por tratamento de 52° C, devem permanecer por um período mínimo de oito horas contínuas no interior da câmara para equivaler ao tratamento fitossanitário HT.

A portaria nº514 é a que está atualmente em vigor, e um fator importante é que ela manteve a possibilidade da realização de um novo protocolo com base no monitoramento da temperatura do ambiente, conforme já mencionado na IN 32/15. A realização desse protocolo ainda não foi publicada em nenhuma pesquisa científica brasileira e não houve empresas que apresentassem esse teste para a aprovação do MAPA, demonstrando ser uma lacuna que ao ser preenchida pode contribuir com o setor industrial madeireiro.

4.2 MÉTODOS DE TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO TRADICIONAIS

O tratamento fitossanitário pode ocorrer por meio de um dos três tratamentos aprovados internacionalmente: tratamento térmico, aquecimento dielétrico e fumigação (IPPC SECRETARIAT, 2023). O tratamento térmico convencional, com código de tratamento HT, engloba o ar quente forçado, a secagem em estufa e a impregnação química sob pressão (desde com uso de calor). O tratamento fitossanitário por aquecimento dielétrico, com código DH, é dividido entre microondas (MW) ou por ondas de rádio, a radiofrequência (RF) (MAPA, 2022a). A fumigação utiliza gases ou vapores químicos para eliminar agentes xilófagos da madeira.

O tratamento por ar quente forçado, a secagem em estufa, a impregnação química sob pressão e o aquecimento dielétrico (como micro-ondas e radiofrequência), podem ser considerados HT, desde que atendam aos parâmetros especificados de tratamento térmico (ISPM 15, 2019). O tratamento térmico é conceituado como o processo no qual a ESM é aquecida até atingir uma temperatura mínima, por um período mínimo de tempo (IPPC SECRETARIAT, 2023). De acordo com a NIMF 15, todo tratamento fitossanitário por HT requer uma temperatura mínima de 56°C por no mínimo 30 minutos.

O tratamento térmico por ar quente forçado, leva em consideração a qualidade da câmara de secagem para o tratamento. Dessa forma, segundo o § 1º do Art. 7º da portaria 514 (MAPA, 2022a), a câmara deve:

“I - ser capaz de manter a temperatura mínima requerida durante todo o período de exposição exigido pelo tratamento; II - ser projetada de forma a criar e manter um fluxo uniforme de ar quente em seu interior durante o tratamento; III - dispor de defletores que assegurem o fluxo adequado de ar quente direcionado para a madeira a ser tratada; e IV - dispor de ventiladores para circular o ar quente durante o tratamento de forma que a temperatura na parte interna central da madeira seja mantida no nível especificado durante o período mínimo necessário”.

A portaria também exige que a disposição das peças de madeira dentro da câmara não interfira no fluxo de ar quente para a madeira a ser tratada, organizadas por sarrafos separadores de forma que o ar quente circule dentro e ao redor dela. Dentre outras recomendações, pelo menos dois sensores de temperatura devem estar inseridos na madeira para monitorar a sua temperatura interna.

É possível a dispensa do uso de sensores de temperatura na madeira caso seja apresentado um protocolo de tratamento aprovado pelo MAPA ou observando as especificações exclusivas para madeiras de coníferas de acordo com a espessura mínima da madeira (MAPA, 2022a). Conforme a mesma portaria citada anteriormente, o HT por secagem em estufa é reconhecido desde que a madeira passe pelo processo industrial de secagem com todas as exigências comuns ao HT por ar quente forçado.

Finalmente, o HT por impregnação química sob pressão é o método de tratamento fitossanitário mais recentemente adotado pela norma. Este deverá ser realizado por empresas registradas no Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

(IBAMA), conforme legislação específica dos órgãos intervenientes, e autorizados pelo MAPA, conforme norma específica (MAPA, 2022a).

Independente se o tratamento for realizado por MW ou por RF, a madeira deverá ser aquecida até atingir uma temperatura mínima de 60°C durante 1 minuto contínuo em todo o perfil da madeira, incluindo o centro dela. Deve-se levar em consideração o teor de umidade, tamanho, massa específica e frequência das micro-ondas ou ondas de rádio recomendadas (ISPM 15, 2019). A norma explica ainda que o monitoramento da temperatura deve ser realizado no ponto central da peça. Para DH ou HT, o acompanhamento da temperatura interna da madeira deve ocorrer por meio de no mínimo dois sensores de temperatura para garantir que qualquer falha na temperatura seja detectada.

A fumigação pode ser realizada com brometo de metila – MB ou com fluoreto de sulfúrio – SF (MAPA, 2022a). É um tratamento com um agente químico que atinge o *commodity* em estado gasoso (IPPC SECRETARIAT, 2023). Na fumigação com MB e SF, as ESM devem ser fumigadas de forma que se atinja a Concentração - Tempo (CT), na temperatura alvo e a concentração final residual mínima especificada (ISPM 15, 2019).

De acordo com a norma citada anteriormente, a CT deve ser alcançada em todo o perfil da madeira, incluindo o seu centro, embora a concentração seja medida na atmosfera ambiente. Ainda, a temperatura mínima da madeira e da atmosfera circundante não deve ser inferior a 10 °C e o tempo mínimo de exposição não deve ser inferior a 24 horas.

É válido ressaltar que a fumigação com MB está entrando em desuso devido aos seus efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente, por essa razão sua utilização com tal finalidade é proibida em diversos países (ROSATI et al., 2016). O SF embora seja menos nocivo à camada de ozônio e à saúde humana que o MB, ainda é uma substância química que causa riscos ao meio ambiente.

4.3 PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS NA INDÚSTRIA MADEIREIRA BRASILEIRA

Mesmo havendo a presença da marca IPPC afixada na ESM, a certeza de que o tratamento fitossanitário foi realizado de forma adequada é um desafio, uma vez que pode ter havido falhas durante o tratamento. Como visto anteriormente, uma forma de comprovar que o tratamento fitossanitário da ESM por HT ocorreu de forma correta, é por meio do uso de sensores e controladores lógicos programáveis (CLP). A utilização desses equipamentos visa acompanhar a

evolução da temperatura interna da madeira, afim de garantir que o seu centro atinja a temperatura e tempo mínimos recomendados (MAPA, 2015).

Quando um organismo vivo é detectado em uma ESM certificada pela NIMF 15, não necessariamente pode ser sinal de uma incongruência com a norma. Vários fatores podem estar envolvidos, dentre eles tratamento inadequado ou contaminação por contato com material não tratado, que leva a infestação após o tratamento (IPPC SECRETARIAT, 2023). Ainda de acordo com a IPPC, organismos mortos na madeira ou vestígios de infestações antigas ou inativas não são sinais de não conformidade.

Isso pode ser confirmado também pela pesquisa realizada por Greenwood et al., (2023), sobre gestão de mitigação de pragas relacionadas à cadeia de suprimentos global de ESM. Os autores trazem tópicos que tratam de como ocorre a contaminação de ESM pós-tratamento fitossanitário. Eles relatam que mesmo após a NIMF 15, uma combinação de diversas causas pode ser responsável, dentre elas cita-se o uso de material não tratado, tratamento insuficiente ou incompleto, contaminação pós-tratamento por contato e até mesmo, inconformidade. Todas essas práticas supracitadas são irregulares e estão sujeitas a ação de agentes fiscalizadores, caso seja detectada durante fiscalização. Porém, é importante ressaltar que a existência de um fator isolado não pode assegurar a existência de irregularidades fitossanitárias, como por exemplo resquícios de um patógeno na madeira ou a presença de um patógeno, mesmo após o tratamento fitossanitário. É preciso avaliar todo o histórico da ESM.

Todos os fatores mencionados acabam acarretando em maiores custos financeiros e mais burocracia. Diante disso muitas empresas acabam optando por tratamentos fitossanitários que não necessitam de sensores de temperatura, como a fumigação com brometo de metila, que em contrapartida acarreta em maior impacto ambiental. De forma a reduzir os problemas aqui mencionados, ressalta-se a importância de métodos práticos para tratamento fitossanitário da madeira, com menos impactos ambientais e cientificamente comprovados.

5. CONCLUSÕES

No Brasil, o tratamento fitossanitário da madeira segue as diretrizes da NIMF 15, que estabelece procedimentos para eliminar agentes biológicos da madeira e garantir a qualidade das ESM. A evolução das normativas, como a Instrução Normativa 32/2015 e a Portaria nº 514/2022, reflete um aprimoramento nos critérios de controle fitossanitário no Brasil. A dispensa do uso de sensores em coníferas, com base em protocolos de temperatura ambiente, destaca uma tendência de simplificação, desde que devidamente regulamentada e monitorada.

No entanto, apesar das regulamentações, há necessidade mais pesquisas científicas e maior divulgação de informações confiáveis sobre métodos de tratamento ainda mais práticos e economicamente viáveis. Estudos mostram que modelagem estatística para predição da temperatura interna da madeira durante o tratamento fitossanitário ainda são escassas, mas representam uma área promissora para melhorar a eficácia dos processos na indústria madeireira.

Portanto este trabalho de tese busca desenvolver um protocolo com base em modelos estatísticos para prever a temperatura interna da madeira, simplificando o processo de certificação fitossanitária e contribuindo para a indústria madeireira.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANTANHEDE, Ana Gertrudes Gonçalves. Etapas e requisitos para a certificação fitossanitária de produtos vegetais destinados ao mercado internacional. 2021. 55 f. **Dissertação** (Mestrado em Defesa Sanitária Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

GREENWOOD, L. F. et al., Exploring pest mitigation research and management associated with the global wood packaging supply chain: What and where are the weak links? **Biological Invasions**, v. 25, n. 8, p. 2395–2421, 2023.

IPPC SECRETARIAT. **Guia para regulamentação de materiais de embalagem de madeira: Compreendendo os requisitos fitossanitários para a movimentação de materiais de embalagem de madeira no comércio internacional**. Rome, Italy: FAO, 2023.

ISPM 15. ISPM 15. Regulation of wood packaging material in international trade. **ISPM 15 Regulation of wood packaging material in international trade**, 2019.

MAPA, **PORTARIA MAPA Nº 514, DE 8 DE NOVEMBRO DE 2022 - DOU - Imprensa Nacional**. (2022a). Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou>>. Acesso em: 31 mar. 2024.

MAPA. **Instrução Normativa Mapa nº 32/2015**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/aduana-e-comercio-exterior/manuais/despacho-de-importacao/legislacao/outras-normas/instrucao-normativa-mapano-32-2015>>. Acesso em: 5 fev. 2024.

MAPA. **Instrução Normativa SDA Nº 4 DE 06/01/2004 - Federal - LegisWeb**. 2004. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=240714>>. Acesso em: 31 mar. 2024.

MAPA. **Mapa regulamenta tratamentos fitossanitários com fins quarentenários**. (2022b). Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-publica-portaria-que-regulamenta-a-realizacao-de-tratamentos-fitossanitarios-com-fins-quarentenarios>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

MAPA. **Tratamento fitossanitário e quarentenário**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/guia-de-servicos/tratamento-fitossanitario-e-quarentenario>>. Acesso em: 25 jul. 2024

NIMF 01. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Princípios fitossanitários para a proteção dos vegetais e a aplicação de medidas fitossanitárias no comércio internacional NIMF 1**. p. 1-10. 2006. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/j7483pt/j7483pt.pdf>>.

NIMF 02. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Estrutura para análise de risco de pragas NIMF 2**. p. 1-17. 2007. Disponível em: <https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_02_2007_PTFINAL.pdf>.

NIMF 03. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Diretrizes para a exportação, o embarque, a importação e a liberação de agentes de controle biológico e outros organismos benéficos NIMF 3.** p. 1-13. 2005. Disponível em:<https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_03_2005_PTFINAL_0.pdf>.

NIMF 04. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Requisitos para o estabelecimento de áreas livres de pragas NIMF 4.** p. 1- 9. 1995. Disponível em:<<https://www.fao.org/3/w1127o/w1127o.pdf>>.

NIMF 09. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Diretrizes para programas de erradicação de pragas NIMF 9.** p. 1- 10. 1998. Disponível em:<<http://www.cosave.org/sites/default/files/nimfs/454a99e7998649f7d435880fb8c52234.pdf>>.

NIMF 14. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **O uso de medidas integradas em um sistema de mitigação de risco para o manejo de risco de pragas NIMF 14.** p. 1-11. 2002. Disponível em:<https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_14_2002_PTFINAL_0.pdf>.

NIMF 15. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Regulamentação de material de embalagem de madeira no comércio internacional NIMF 15.** p. 1-10. 2009. Disponível em:<https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_15_2009_PTFINAL_0.pdf>.

NIMF 18. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Diretrizes para o uso de irradiação como uma medida fitossanitária NIMF 18.** p. 1-17. 2003. Disponível em:<https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_18_2003_PTFINAL_0.pdf>.

NIMF 28. NORMAS INTERNACIONAIS DE MEDIDAS FITOSSANITÁRIAS. **Tratamentos fitossanitários para pragas regulamentadas NIMF 28.** p. 1-28. 2009. Disponível em:<https://www.ippc.int/largefiles/NIMF_28_2009_PTFINAL_0.pdf>.

ROSATI, M. C; BICALHO, S. T. T.; CALABREZI, S. Riscos do tratamento fitossanitário por Brometo de Metila e High Temperature de embalagens e pallets de madeira para exportação no Aeroporto de Viracopos – Campinas/SP. **Anais do V SINGEP.** São Paulo – SP. ISSN: 2317 – 8302. p. 1-3. 2016.

CAPÍTULO 2 - TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA NO MUNDO: AVANÇOS E LACUNAS

1 INTRODUÇÃO

Após problemas econômicos e ambientais em diversos países devido a invasões biológicas, a *International Plant Protection Convention (IPPC)* da *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, culminou a norma *International Standards for Phytosanitary Measures n° 15 (ISPM 15)*, em 2002, o que no Brasil é chamada de Norma Internacional para Medidas Fitossanitárias n° 15 (NIMF 15).

Embora as espécies de agentes xilófagos introduzidas fora dos seus habitats naturais nem sempre causem problemas nas suas novas localizações, muitas dessas espécies exóticas podem ser altamente destrutivas para o ambiente e para a biodiversidade onde for inserida. Por essa razão, a ISPM 15 estabelece as diretrizes para a regulamentação de embalagens e suporte de madeira passar antes do seu envio para o destino final, que são eles o tratamento térmico (HT), o aquecimento dielétrico (DH) e fumigação.

Segundo dados publicados pela The Business Research Company (2023), o mercado global de embalagens de madeira, que era avaliado em US\$ 11,84 bilhões em 2023, deve atingir US\$ 12,42 bilhões em 2024, com uma taxa de crescimento anual de 4,9%. A empresa acredita que haverá expansão no setor, projetando-se que alcance US\$ 15,27 bilhões até 2028, impulsionado por práticas econômicas circulares e preferências por materiais ecologicamente corretos.

Estatísticas sugerem que entre 50 % e 80 % do comércio mundial de mercadorias são transportadas em ESM (STRUTT, et al., 2013). Existem cerca de 450 milhões de novos paletes produzidos na América do Norte a cada ano e 1,9 bilhões estão em circulação em todo o mundo (GÓES, 2019). Por isso a ISPM 15 se tornou uma medida tão importante e adotada por mais de 180 países, pois alta circulação de ESM pode ser um caminho fácil para a disseminação de pragas de importância florestal. Estima-se que a implementação da norma nos últimos anos tenham reduzido o movimento de pragas em ESM em até 60% apenas nos EUA (HAACK ET AL. 2014), o que pode ter gerado milhões de dólares de economia no país (ORMSBY, 2022). Ao se pensar no comércio global e meio ambiente como um todo, obtém-se uma noção da importância da implementação da norma.

Mesmo diante da alta demanda de ESM, observa-se que os registros associados aos seus métodos de tratamento fitossanitário, visando adequação à ISPM 15, são limitados. Plataformas de busca científica reconhecidas, como *Scopus*, possuem poucas publicações que abordem os principais avanços e desafios enfrentados no setor industrial madeireiro.

1. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão bibliométrica para compreender o estado da arte de trabalhos sobre tratamentos fitossanitários da madeira

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a evolução das publicações, de forma a destacar os tipos, periódicos, instituições e áreas relevantes para a temática;
- Apresentar as palavras-chave e autores mais presentes entre os documentos, para orientar buscas futuras e fortalecer conexões entre pesquisadores interessados;
- Discorrer sobre os produtos à base de madeira, espécies de madeira e agentes xilófagos de maior interesse, e as origens, caminhos e medidas de suporte contra pragas atrelados a madeira;
- Apresentar os tipos de tratamentos fitossanitários da madeira utilizados no mundo, incluindo aqueles em análise para implementação na norma.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Levantamento bibliométrico e triagem dos documentos

Com o intuito ampliar os estudos da presente tese, informações sobre tratamento fitossanitário da madeira em conformidade com a ISPM 15, foram levantadas a partir da base de dados científicos *Scopus* (Elsevier™). Essa base de dados foi escolhida por ser considerada a que disponibiliza o maior banco de publicações científicas revisadas por pares, além do constante aprimoramento e presença de pesquisas com qualidade científica (MD KHUDZARI et al., 2018; PATRO; MISRA, 2020; GASPARYAN; KITAS, 2021). A *Scopus* tem ainda o diferencial de ser usada atualmente para complementar a avaliação dos programas de pós-graduação no Brasil. Além disso, consegue contemplar um maior número de publicações indexadas, incluindo a maior parte das pesquisas indexadas em outras bases (SILVA et al., 2020; UCELLA-FILHO et al., 2022).

Dentro da plataforma *Scopus* (Figura 1) a pesquisa foi realizada por meio do filtro “*Search within*” e selecionou-se a opção “*Article title, Abstract, Keywords*”. Então na aba “*Search documents*” foram inseridos diversos termos e siglas, com o intuito de levantar o maior número de publicações e de forma a garantir que a literatura pesquisada estivesse totalmente alinhada com o tema. Os termos foram utilizados em inglês, com vista a contemplar um maior número de publicações. Ressalta-se que as chaves de busca foram realizadas focando em termos internacionais, sobretudo, anglófonos e lusófonos à cerca do tema de interesse.

Alguns termos não puderam ser inclusos na busca, pois a inclusão de termos genéricos pode acarretar em milhares de documentos que nem sempre tem alguma relação com o tema. Assim, deve-se estudar preliminarmente o tema de interesse e identificar os termos mais relevantes e adequados para uma melhor e maior visibilidade para um artigo de revisão bibliométrica (MININI et al., 2024).

Os termos escolhidos para a sequência de busca foi conduzida da seguinte forma: (TITLE-ABS-KEY ("ISPM - 15" OR "ISPM No. 15" OR "ISPM 15" OR " ISPM nº 15" OR "HEAT TREATMENT OF WOOD" OR "PHYTOSANITARY TREATMENT") AND TITLE-ABS-KEY ("ROUNDWOOD" OR "SAWNWOOD" OR "FOREST PEST" OR "WOOD PESTS" OR "WOOD" OR "LOG" OR "TIMBER" OR "PLANKS" OR "PALLET" OR "WOODEN BOX" OR "WOODEN"

OR "TAPEN" OR "WOOD-PACKING" OR "WOOD PACKING" OR "WOOD PACKAGING MATERIALS" OR "WOOD BORING").

Após a coleta de dados, ou seja, após o levantamento dos documentos gerados pelos termos de busca, foi realizada uma triagem manual, em que todos os artigos foram visualizados e somente os documentos relacionados diretamente com a temática foram selecionados para descrição neste trabalho. Não foi limitado o ano de publicação, ou seja, foram coletados os trabalhos publicados até 22 de dezembro de 2023.

Ao longo deste capítulo da tese a norma será mencionada como “ISPM 15” e não “NIMF 15”, por se tratar de um levantamento em sua totalidade de trabalhos internacionais. Além disso, “ISPM 15” é o termo universal publicado pela FAO e reproduzido por todos os trabalhos gerados pela busca. Da mesma forma, a sigla para representar embalagem e suporte de madeira (ESM), aqui será WPM (*Wood Packaging Material*), pois também é a sigla presente nos documentos analisados.

Os critérios de seleção da triagem seguiram o proposto nos objetivos deste trabalho, especialmente levando-se em consideração se abordavam a ISPM 15. Após essa triagem foi realizado o download dos dados dos artigos selecionados, exportando as informações geradas pela *Scopus* em um arquivo de Excel no formato CSV.

Para análise bibliométrica foram coletadas as seguintes informações:

- i) Número, tipos, periódicos e instituições de origem dos documentos abordados;
- ii) Áreas temáticas dos documentos;
- iii) Palavras-chave indexadas pelos autores e pela *Scopus*;
- iv) Principais autores e interação entre publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira;
- v) Países originários das pesquisas sobre tratamento fitossanitário da madeira.

3.2 Estado da arte dos documentos

Para conhecer o estado da arte do tema de estudo, foram coletadas as seguintes informações:

- i) Tipos de materiais de madeira de maior interesse para o tratamento fitossanitário;
- ii) WPM contaminados e suas principais origens;

- iii) Principais agentes xilófagos relatados para tratamento fitossanitário da madeira;
- iv) Principais gêneros e espécies arbóreas relacionadas ao tratamento fitossanitário da madeira;
- v) Direcionamento científico geral sobre a tratamento fitossanitário da madeira conforme ISPM 15;
- vi) Principais formas de controle e medida de suporte contra a disseminação de agentes xilófagos.

Os mapas geográficos e alguns gráficos foram desenvolvidos utilizando o software Microsoft Excel (Version 2104). As redes de clusters foram criadas por meio do software *VOSviewer* (version 1.6.20) (VAN ECK; WALTMAN, 2009; *VOSviewer - VISUALIZING SCIENTIFIC LANDSCAPES*, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO

4.1.1 Número, tipos, periódicos e instituições de origem dos documentos abordados

Foram quantificados 216 documentos, dos quais após a triagem 104 documentos foram incluídos nesta pesquisa (eram 106, porém dois estavam em duplicata ou errata). A plataforma Periódicos da Capes (Acesso CAFe) disponibiliza gratuitamente o acesso de muitos artigos. Houve acesso parcial (resumo) de apenas 5 documentos, porém por meio da plataforma *Researchgate* foi possível solicitar os documentos aos próprios autores, que prontamente forneceram os documentos via plataforma ou e-mail.

Para fins de comparação, foi incluído na busca os termos genéricos "Nonindigenous" OR "invasive" OR "exotic". A busca que antes havia gerado 218 arquivos, resultou em 8.890 documentos, o que tornaria a triagem e estado da arte inviáveis. Dessa forma, a análise bibliométrica foi realizada apenas com os termos mencionados na metodologia desse artigo.

Em meados dos anos 2000 iniciou-se a preocupação sobre o desenvolvimento de normas internacionais de quarentena para minimizar o risco associado aos WPM, que são uma importante via de entrada para organismos invasores (ALLEN; HUMBLE, 2002). Naquela época, os autores já entendiam que as necessidades de investigação incluíam a melhoria na capacidade de detecção de patógenos e pragas, avanço nas ferramentas de diagnóstico e nas medidas de mitigação, bem como avaliações de impacto socioeconômico e informações biológicas básicas sobre espécies não indígenas e as suas interações com os hospedeiros.

A partir das palavras-chave escolhidas, as publicações indexadas na plataforma *Scopus* sobre o tema iniciaram-se 2004, após a implementação da ISPM 15, devido às preocupações à cerca da fitossanidade das florestas no mundo. Nesse ano, houve duas publicações (ALÉON, 2004; KEIRAN; ALLEN, 2004), o primeiro refere-se a imediata preocupação em abordar um sistema de medição de temperatura, que visava a facilidade de implementação da ISPM 15, além de proporcionar melhores garantias de que toda a madeira passou por tratamento adequado.

Os autores já entendiam que regular as condições do ar seria muito mais simples do que utilizar sondas de temperatura inseridas na madeira, com a vantagem de garantir que todas as

amostras serão submetidas ao tratamento térmico adequado, ao passo que, no caso da medição da temperatura da madeira, apenas uma percentagem muito pequena das peças de madeira pode ser controlada (ALÉON, 2004).

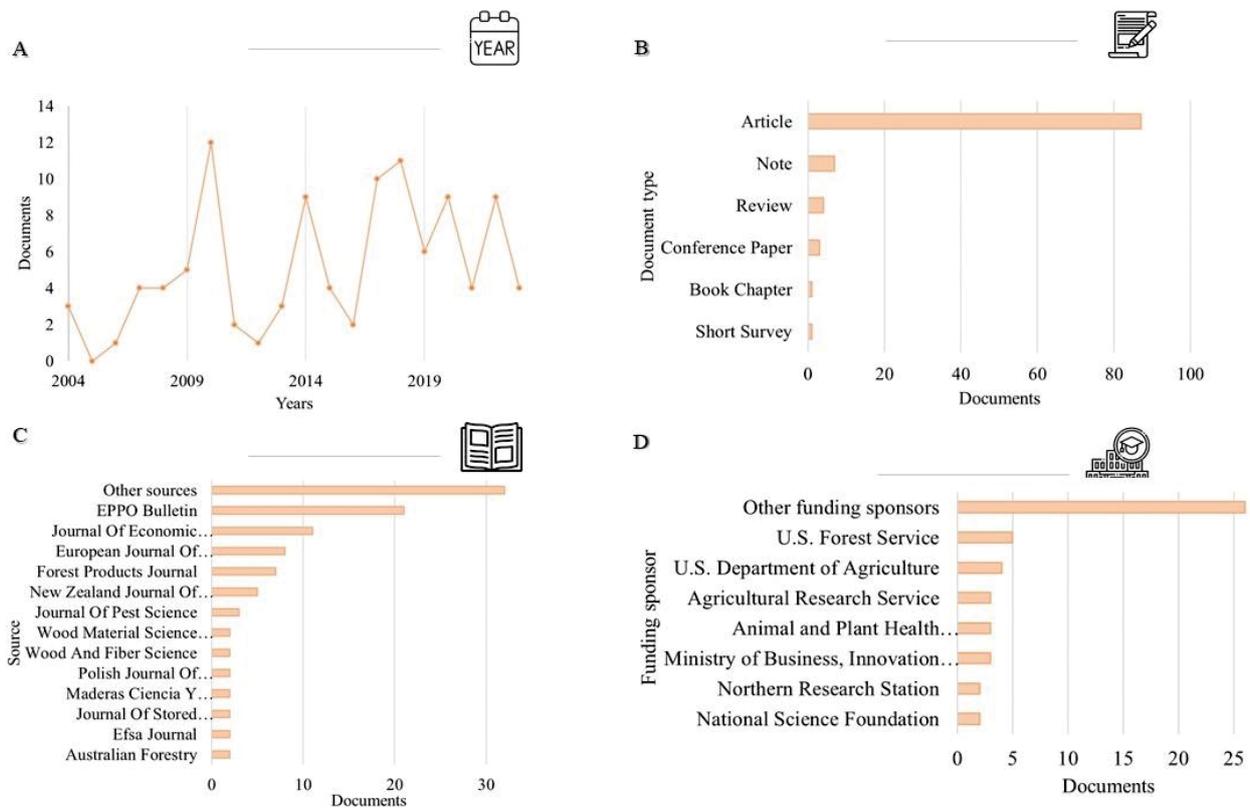
O outro documento publicado no mesmo ano teve como objetivo alertar sobre o risco de disseminação e origem de patógenos de preocupação para aquela época e explica que embora Austrália, Canadá, México, Nova Zelândia e Estados Unidos da América já estavam começando aplicar a nova implementação, ainda existiam desafios frente à implementação da ISPM 15 por parte de outros países. Os principais empecilhos eram instalações inadequadas, falta de sistemas de certificação de importação ou exportação, ou até mesmo falta de recursos para instruir os fabricantes e exportadores sobre os mecanismos de aplicação da norma (KEIRAN; ALLEN, 2004). Ressalta-se também que em 2005 não foram registradas publicações.

O ano de 2010 foi o que apresentou maior quantidade de publicações, com 12 documentos indexados (Figura 1a), o triplo do número de publicações em 2023 sobre o tema (até a data do levantamento). Entre os documentos publicados em todo o período analisado encontram-se artigos (83,00%), notas (6,60%), revisões (3,80%), documentos de conferência (2,80%), capítulos de livro (0,90%) e comunicados curtos (0,90%). Desses, a maior relevância está nos artigos, experimentais ou de estudos de caso, com 88 documentos (Figura 1b).

Aproximadamente 70,83% dos periódicos só tiveram uma publicação sobre ISPM 15, classificados na Figura 1c) como “outras fontes”. Nesses, houveram algumas instituições financiadoras, dos quais 6 documentos foram financiados pela *U.S. Forest Service* e 6 pela *U.S. Department of Agriculture*. Aproximadamente 79,41 % foi referente a apenas uma instituição financiadora por documento, classificado na Figura 1d) como “outras instituições financiadoras”.

Artigos são publicações desenvolvidas por uma metodologia definida, pela qual os autores adquiriram seus resultados, além disso, expõe e discute ideias, métodos e técnicas; capítulos de livros são aqueles que fazem parte de compilações bibliográficas e reviews são publicações que visam discutir assuntos explorados por outros autores, coleta de informações sobre assuntos específicos, realizando uma revisão da literatura atual sobre o tema (SILVA et al., 2020). As notas e comunicados curtos possuem conceitos semelhantes, pois ambos visam publicações menores e mais objetivas que um artigo completo.

Figura 1 - NÚMERO DE DOCUMENTOS DE ACORDO COM A) O ANO DE PUBLICAÇÃO, B) TIPO DE DOCUMENTO PUBLICADO, C) PERIÓDICO DE PUBLICAÇÃO E D) INSTITUIÇÕES FINANCIADORAS



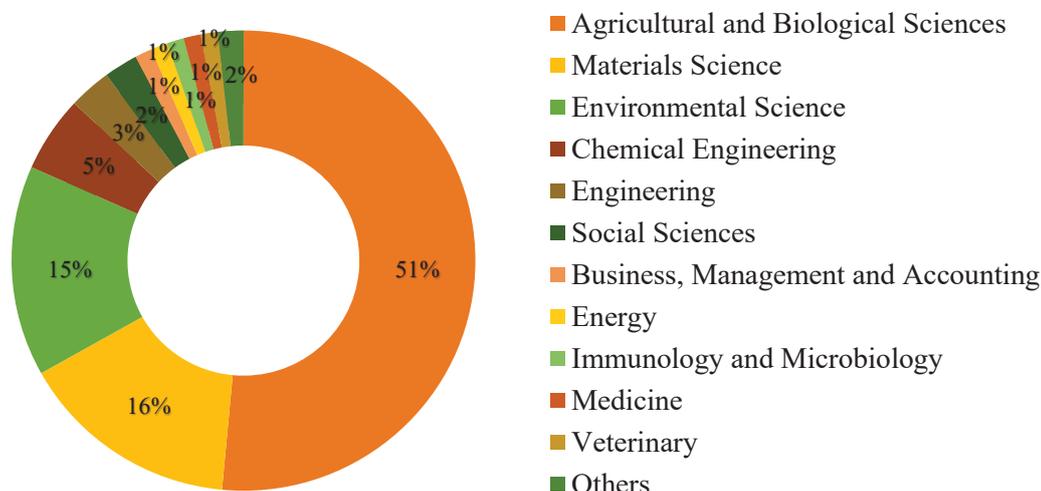
FONTE: A autora (2024).

Os documentos foram publicados em 48 fontes (periódicos ou revistas) e um dos primeiros trabalhos publicados (ALÉON, 2004), de acordo com as palavras-chave utilizadas, foi publicado na *EPPO Bulletin*, que junto com o *Journal of Economic Entomology*, estão entre os principais periódicos mais procurados pelos autores.

4.1.2 Áreas temáticas dos documentos

Houve variação das áreas de interesse de acordo com a classificação do *Scopus* no período analisado. As principais áreas da ciência dos arquivos indexados sobre tratamento fitossanitário da madeira estão dispostas na Figura 2.

Figura 2 - PRINCIPAIS ÁREAS DA CIÊNCIA DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DA *SCOPUS* PARA OS ARQUIVOS INDEXADOS SOBRE TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO



FONTE: A autora (2024).

As áreas das Ciências com mais publicações dentro da temática analisada foram Ciências Agrárias e Biológicas, com 88 documentos, perfazendo 51,00% das publicações. Seguido das Ciência dos Materiais (15,60%) e da Ciência Ambiental (15,00%). É importante ressaltar que um periódico pode abordar diversas áreas, ou seja, pode ser multidisciplinar, o que demonstra o leque de possibilidades de publicações, independente a área.

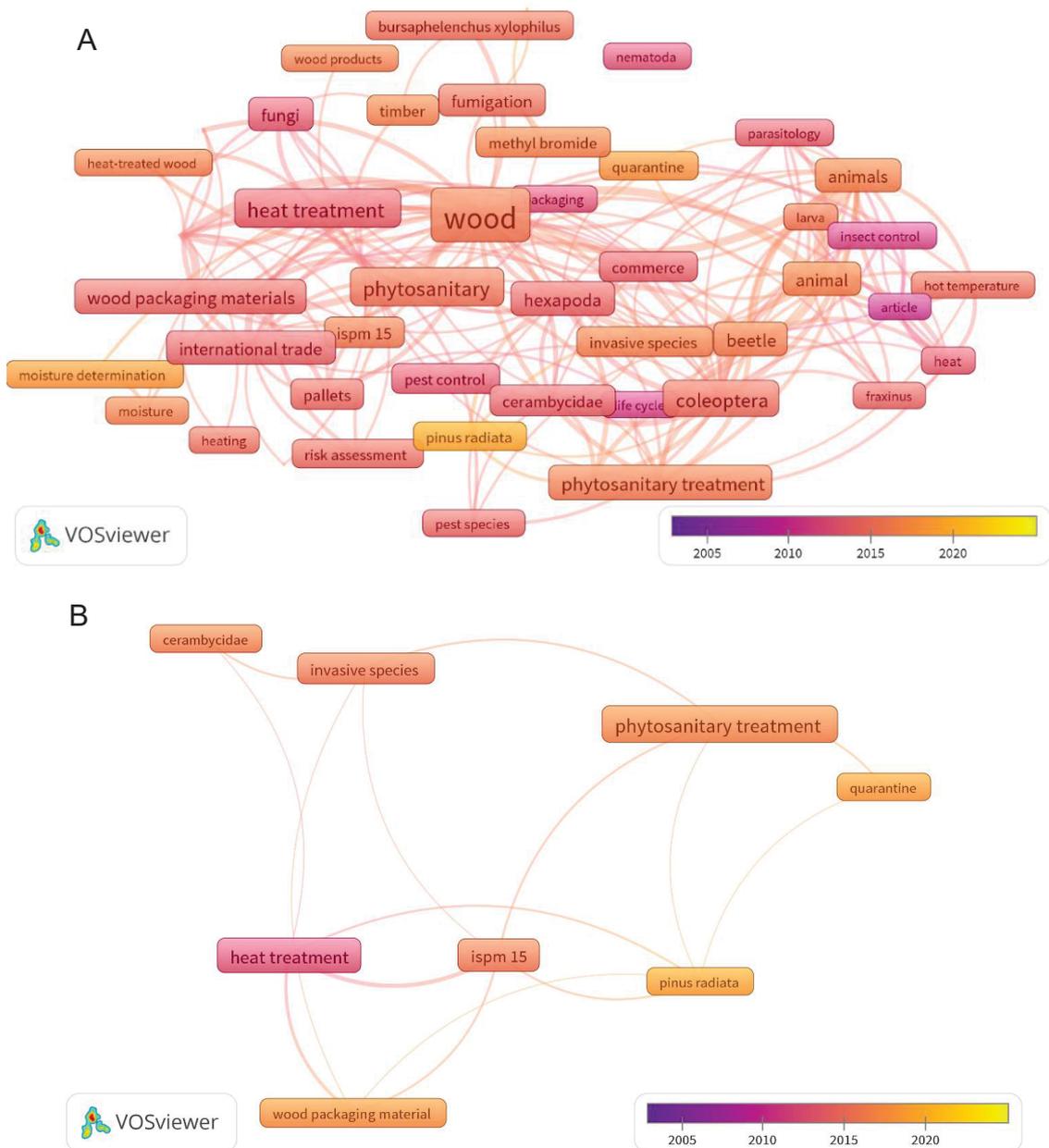
O interesse nessas áreas pode ser justificado porque a madeira é um produto comum a diversas áreas, seja como WPM ou na sua utilização em diversas finalidades, como estruturas, cavacos, movelarias, etc. Além disso, a introdução de patógenos em florestas podem levar, entre outros fatores, a consequências negativas nos ecossistemas naturais, em plantios de florestas (FAO, 2008) e no comércio internacional. Isso torna a temática abordada neste artigo intrinsecamente significativa para as Ciências Agrárias, Biológicas, Ambientais e de Materiais.

4.1.3 Palavras-chave indexadas pelos autores e pela *Scopus*

As áreas de interesse das publicações estão diretamente relacionadas com as palavras-chave utilizadas. Assim, a partir da análise dos documentos levantados, foi possível desenvolver

dois agrupamentos (cluster) de co-ocorrência das palavras-chave mais frequentes e com maior força de links entre os documentos. Um deles é referente às palavras-chave indexadas pela plataforma e pelos autores (Figura 3a), e outro refere-se apenas às indexadas pelos autores (Figura 3b).

Figura 3 - CLUSTERS DE CO-OCORRÊNCIA E FORÇA DE LIGAÇÃO EM DOCUMENTOS INDEXADOS NA SCOPUS NO PERÍODO DE 2004 ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023 DE A) TODAS AS PALAVRAS-CHAVE E B) APENAS DE PALAVRAS-CHAVE USADAS PELOS AUTORES



FONTE: A autora (2024).

É importante ressaltar que o valor da força do link indica a coesão de um conjunto de termos utilizados e até que ponto essas palavras estão ligadas a outras palavras, ou seja, a sua associação por meio dos documentos (MININI et al., 2024). Ao observar a Figura 3, é possível notar que o uso das palavras-chave está disposto ao longo dos anos por meio colorações indicadas na legenda. A maior frequência das palavras-chave está relacionada às maiores áreas (MORAIS; PALHA, 2021) dos quadros, e as maiores forças de links entre os termos são confirmados pela proeminência das linhas que ligam os quadros.

A análise co-ocorrência de todas as palavras-chave resultou em 858 termos (Figura 3a). Para criação do mapa, foi configurado no *VOSviewer* o número mínimo de 5 ocorrências da palavra-chave, de forma que foi possível gerar um mapa com quatro grupos distintos de documentos, que são os *clusters* secundários, interconectados entre si. Esses grupos apresentaram um total de 49 conexões, que são os termos de *links*.

Dentre todas as palavras-chave da rede, cita-se *wood* ($n = 38$), *phytosanitary* ($n = 19$), *heat treatment* ($n = 19$), *coleoptera* ($n = 16$), *forestry* ($n = 15$), *packaging materials* ($n = 15$) e *phytossanitary treatment* ($n = 15$), como os mais frequentes nos documentos. “Wood” foi o termo com maior ligação com os demais, apresentando 234 links. É importante ressaltar que, de acordo com o foco da presente pesquisa, todos os documentos inclusos na triagem abordaram tratamento fitossanitário da madeira, mas nem sempre as palavras-chave nessa análise da Figura 3a tem relevância para a temática abordada, por capturar uma ampla gama de termos.

Já as palavras-chave indexadas pelos autores são mais específicas, pois referem-se às selecionadas pelos próprios autores para representar os documentos. A análise co-ocorrência e força de ligação nesse caso resultou em 234 termos e está disposta na Figura 3b. Para criação do mapa, foi configurado no *VOSviewer* o número mínimo de 5 ocorrências da palavra-chave, de forma que foi possível gerar um mapa com três clusters secundários conectados entre si, com um total de 8 termos de links.

Dentre os termos gerados apenas com as palavras-chave indexadas cita-se *Phytopsanitary treatment* ($n = 14$), *heat treatment* ($n = 12$), *ISPM 15* ($n = 10$), *invasive species* ($n = 8$), *wood packaging material* ($n = 6$), *quarantine* ($n = 5$), *cerambicidae* ($n = 5$) e *Pinus radiata* ($n = 4$) como mais frequentes nos documentos. “*ISPM 15*” foi o termo com maior ligação com os demais, apresentando 11 links.

A análise dos termos indexados pelos autores nos documentos revela uma maior afinidade com a temática de interesse em comparação com a compilação de todos os termos apresentados na Figura 3a. Isso mostra a relevância da seleção criteriosa de termos, tanto por parte dos autores que publicam e querem uma boa divulgação de seus resultados, quanto pelo público-alvo que procura por termos específicos documentos relacionados a temática interesse.

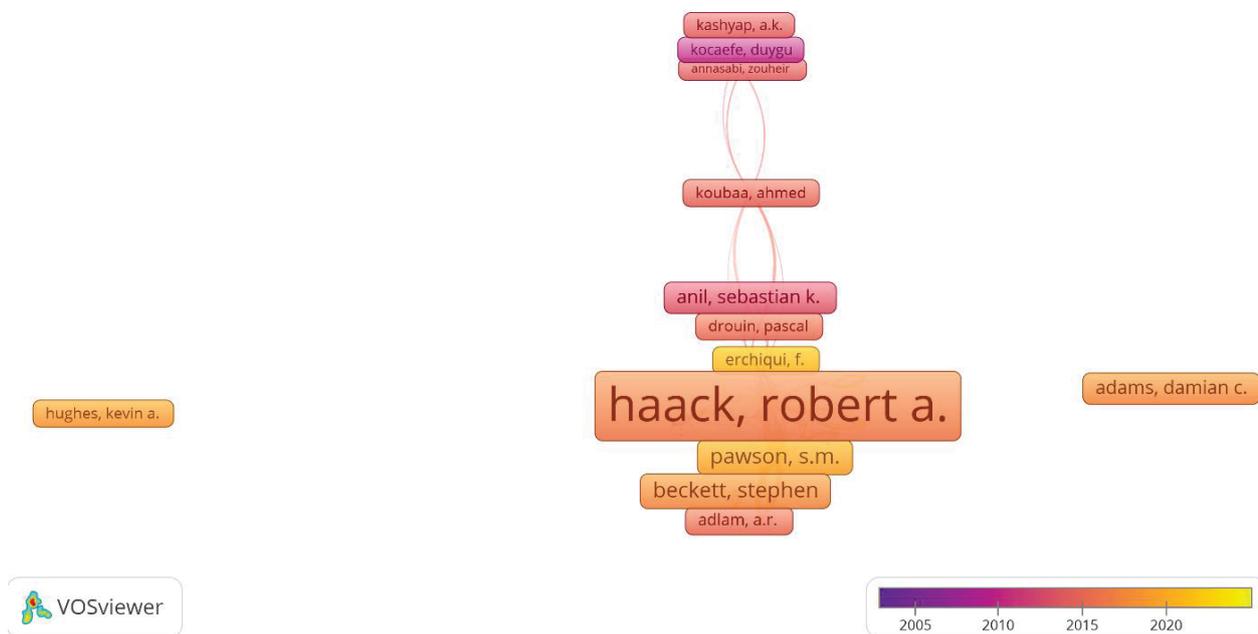
A escolha inadequada de palavras-chave ou não específicas para o tema influencia os resultados de pesquisa, uma vez que os mecanismos de busca dependem parcialmente delas (MININI, 2024). Para pesquisas futuras, sugere-se a utilização de termos mais específicos sobre o tema, como os relatados no tópico "Palavras-chave indexadas pelos autores e pela *Scopus*".

A norma é abordada de diferentes formas nos títulos e palavras-chave das publicações, sendo elas: *ISPM – 15*, *ISPM N°. 15*, *ISPM 15* e *ISPM n° 15*. Essa variação pode limitar a divulgação dos trabalhos, uma vez que o termo mais usual é "*ISPM 15*", além disso ele está de acordo com o descrito na *Regulation of wood packaging material in international trade* (ISPM 15, 2019). Dessa forma, aos autores das próximas publicações sobre a temática, sugere-se o uso do termo universal e simples "*ISPM 15*".

4.1.4. Principais autores e interação entre publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira

Uma outra forma de aumentar a divulgação de uma publicação, é por meio da união entre pesquisadores para publicações conjuntas. Essa união acaba atingindo um público mais amplo e atrai a atenção de diversos pesquisadores. Além disso, o trabalho com autores renomados aumenta a credibilidade de um documento. Assim, visando a relevância de diferentes nomes a frente das publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira, foi realizado o acoplamento bibliográfico dos principais autores que publicam na área (Figura 4).

Figura 4 - ACOPLAMENTO BIBLIOGRÁFICO ENTRE OS AUTORES DOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA SCOPUS NO PERÍODO DE 2004 A 22 DE DEZEMBRO DE 2023.



FONTE: A autora (2024).

Até o momento do levantamento, a análise resultou em um número total de 76 autores. Para isso foi considerado o número mínimo pelo menos um documento com uma citação. O autor com mais publicações indexadas na plataforma e com mais citações foi Haack Robert. A, com sete documentos, 266 citações e 4124 links.

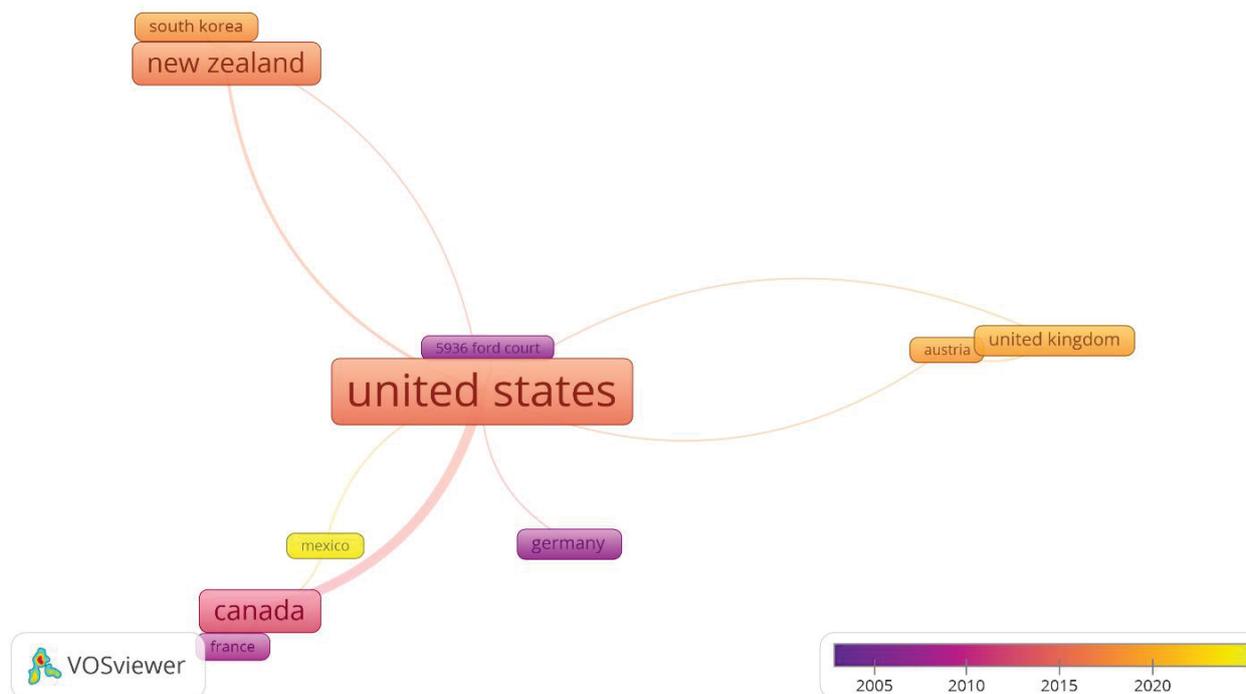
Haack é pesquisador entomologista emérito, no *Northern Research Station*, nos Estados Unidos. Segundo dados anexados na plataforma Researchgate (2024), ao longo de sua jornada o pesquisador tem quase duzentas publicações sobre temas como insetos florestais exóticos nas áreas de biologia e gestão, estratégias melhoradas de captura e monitorização, avaliação de risco e análise de percurso, tratamentos para ESM, entre outras.

4.1.5 Países originários das pesquisas sobre tratamento fitossanitário da madeira

A partir da análise dos documentos levantados é possível observar também a interação entre os países das publicações. Assim, está apresentado na Figura 5 um cluster com a força de

ligação entre os países que mais ocorrem coautoria entre os diversos pesquisadores interessados em tratamento fitossanitário da madeira.

Figura 5 - ANÁLISE DE COAUTORIA EM RELAÇÃO AOS PAÍSES DOS PESQUISADORES DOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA SCOPUS NO PERÍODO DE 2004 A 22 DE DEZEMBRO DE 2023



Nota: o Vosviewer nomeou uma publicação dos EUA como “5936 ford court”. A correção foi realizada na contabilização dos documentos para cada país.

FONTE: A autora (2024).

Para criação do mapa, foi configurado no VOSviewer o número mínimo de ocorrência de um documento e uma citação por país. Dessa forma foi gerado um cluster de 29 países e 26 links, logo, 26 países possuem maiores publicações com contribuição conjunta. Os países com mais publicações foram Estados Unidos (38), Canadá (14) e Nova Zelândia (14) e interações entre os autores foram de 19, 10 e 5, documentos para os respectivos países no tema abordado. Os países com maiores números de citações foram Estados Unidos (579), Nova Zelândia (244), Canadá (161) e Austrália (100). Das publicações mais recentes até a data do levantamento, duas são de autores da Itália (BRAGARD et al., 2023a, 2023b); duas do Canadá, México e Estados Unidos (GREENWOOD et al., 2023; YANG et al., 2023) e uma de Cuba e Bélgica (FONG CASAS et al., 2023).

Aproximadamente 19% das publicações não tinha definição do país, e isso se torna um problema, pois o *software* faz a leitura apenas dos dados indexados nas plataformas de busca, ou seja, a bibliometria. Isso pode contribuir para uma análise de agrupamento mais tendenciosa.

Os Estados Unidos detem aproximadamente 28% das publicações sobre o tema. Até o ano de 2018, foi o país que mais publicou artigos científicos de todas as áreas (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2024), e isso pode ser explicado pois possuem umas das maiores economias do mundo e um volume considerável de comércio internacional de madeira, bem como centros de pesquisas e organizações governamentais com maior investimentos.

Em 2021, a produção mundial de madeira serrada atingiu 344,2 milhões de metros cúbicos, com um crescimento médio anual de 2,1%, no entanto, devido ao impacto da pandemia de Covid-19, houve uma queda na produção de 1,7% em relação a 2019 (ABIMCI, 2022). O estudo relata que os Estados Unidos se destacaram como o maior produtor mundial de madeira serrada de coníferas, representando 18% do total global em 2021. Analisando o comércio de madeira entre 2000 e 2020, 69,26% da produção foram destinados aos Estados Unidos e à União Europeia (MARTINS; NONNENBERG, 2022). Logo a regulamentação ISPM 15 é de grande importância para os EUA, pois problemas relacionados podem afetar diretamente as importações de produtos agrícolas e florestais.

O número reduzido de documentos indexados chamou atenção, por ser um tema tão importante, o que mostra que ainda há uma carência de publicações sobre a temática. Além disso, observou-se que 100% das publicações levantadas são internacionais, mostrando interesse externo pelo avanço em conhecimento cientificamente comprovado de tratamento fitossanitário da madeira.

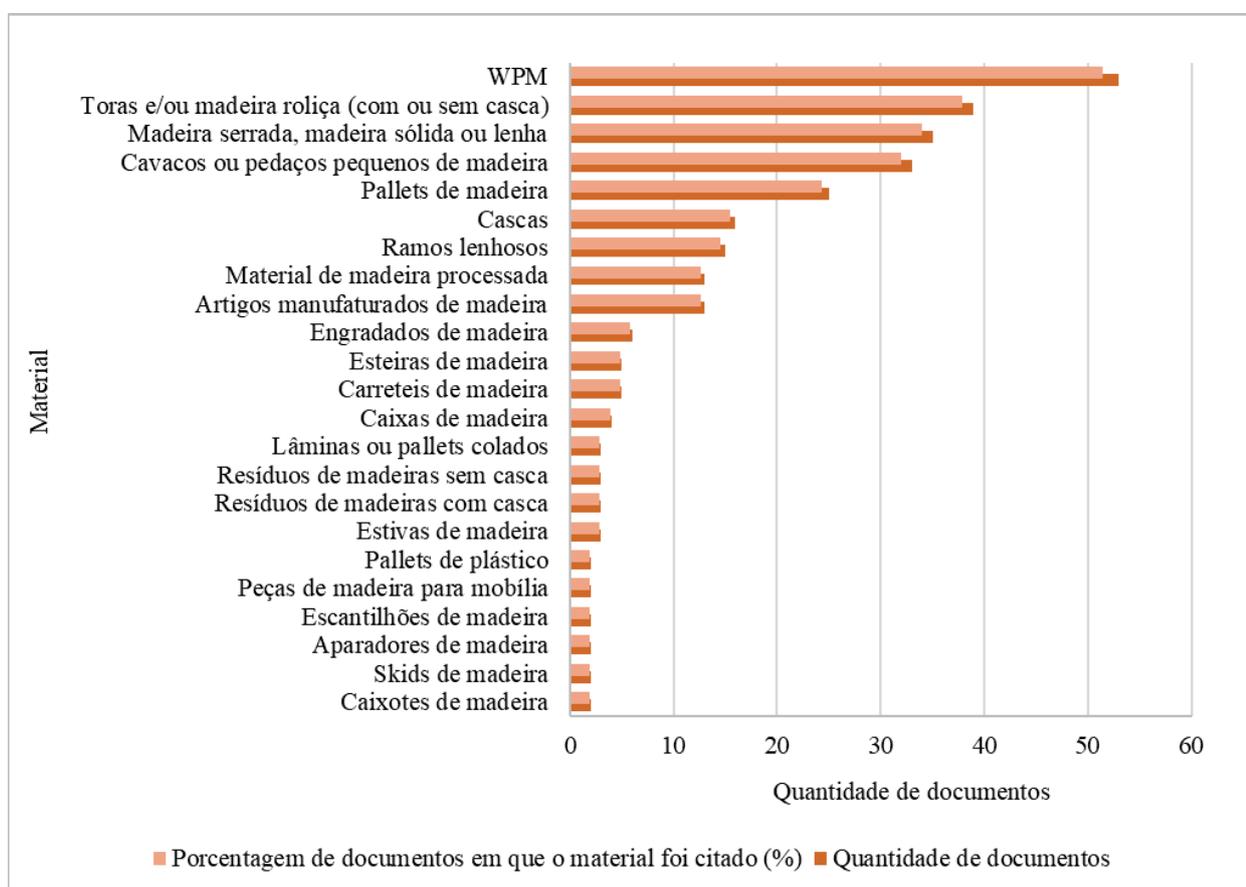
Existe uma quantidade considerável de publicações brasileiras e internacionais sobre o tratamento fitossanitário da madeira que não estão indexados na plataforma *Scopus*. Muitos desses documentos tratam-se de trabalhos para conferências ou congressos, entre outros. Existem muitos trabalhos acadêmicos, como monografias, dissertações, teses e alguns documentos são diretrizes ou normativas publicadas por órgãos regulamentadores.

4.2 ESTADO DA ARTE

4.2.1 Materiais de madeira de maior interesse para o tratamento fitossanitário

Os principais materiais de interesse de pesquisa sobre tratamento fitossanitário da madeira são apresentados na Figura 6. Observa-se que os WPM estão presentes em aproximadamente 52% das publicações, seguido de toras e/ou madeira roliça (37,86%), madeira serrada, madeira sólida ou lenha (33,98%), Cavacos ou pedaços pequenos de madeira (32,04%) e paletes de madeira (24,27%).

Figura 6 - PRINCIPAIS TIPOS DE MATERIAIS ABORDADOS NOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA PLATAFORMA SCOPUS NO PERÍODO DE 2004 ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023.



* O mesmo material pode ter sido abordado em mais de um documento.

FONTE: A autora (2024).

Qualquer embalagem de madeira usada para apoiar, proteger ou transportar uma mercadoria pode ser chamada de WPM. O termo inclui peças em madeira, das quais são possíveis citar os paletes, skids, contêineres, engradados, caixas, bobinas, tambores, tábuas de carga, material de apoio

(KEIRAN; ALLEN, 2004; USDA, 2023), entre outros citados na Figura 6. De acordo com a Comissão Europeia, as embalagens de madeira podem suportar, proteger e transportar mercadorias em até 90% do transporte global.

A ocorrência de alguns patógenos em WPM de países considerados livres pode provavelmente, ser explicada pela circulação global de materiais de embalagem de madeira entre países infestados e não infestados (GU et al., 2006). De acordo com um estudo de caso sobre a implementação das normas fitossanitárias ISPM 15 em alguns países da África, Papyrakis e Tasciotti, (2019) confirmam que o aumento do comércio internacional é responsável por aumento da movimentação de WPM e conseqüentemente, ocorre um aumento na introdução de novas pragas. Os autores relatam que para reduzir introdução de espécies não nativas por meio dos WPM, é necessário a realização do tratamento fitossanitário das peças seguido da marca oficial para demonstrar que foi submetido a um dos métodos de tratamento aprovados.

A marca (Figura 8) deve incluir o símbolo oficial, um código do país de duas letras que identifica o país onde o tratamento foi realizado, o número atribuído pela organização de proteção à estação de tratamento da embalagem, e um código de duas letras para o tratamento utilizado. A marca deve ser legível, permanente e intransferível e colocada em local visível, preferencialmente em pelo menos dois lados opostos do WPM (MAPA, 2015; PAPYRAKIS; TASCIOTTI, 2019; NASCIMENTO et al., 2023). A ausência ou falha da marca tem muita relação com as peças contaminadas. Foram detectados organismos nocivos em 0,9% das remessas e 1,1% das importações não tinham marcações em conformidade com a norma internacional para o tratamento de WPM, ISPM 15 (EYRE et al., 2018).

Figura 8 - VARIAÇÕES NOS COMPONENTES DA MARCA PERMITIDAS PELA
ISPM 15

	XX - 000 YY
	XX - 000 YY
	XX - 000 - YY
	XX - 000 YY
	XX - 000 - YY
	XX - 000 YY

Fonte: Adaptado de ISPM 15 (2019).

A maioria dos artigos levantados sobre tratamento fitossanitário da madeira usam apenas o termo WPM por ser mais genérico. Dentre as abordagens há estudos levantamento de pragas interceptadas em WPM (BURNIP; VOICE; BROCKERHOFF, 2010), com o levantamento de possíveis pragas quarentenárias na UE, como *Urocerus albicornis* (BRAGARD et al., 2023a) e *Urocerus japonicus* (BRAGARD et al., 2023b), presentes em WPM. Há preocupação com a identificação de temperaturas letais para patógenos da madeira (HENIN et al., 2008; HAACK et al., 2022a), ainda sobre patógenos que sobreviveram ao tratamento fitossanitário (RAMSFIELD et al., 2010; SOBEK et al., 2011; BORIANI et al., 2019; KRISHNANKUTTY et al., 2020), entre outros.

Durante a fabricação do WPM, é importante atentar-se a diversos fatores, um exemplo diz respeito às dimensões, pois peças de madeira de maiores espessuras aumentam a probabilidade de pragas estarem presentes ou de sobreviverem durante o tratamento fitossanitário (HAACK et al., 2014). Há estudos sobre a estimativa do tempo necessário para que ocorra o tratamento térmico eficiente da madeira (ALÉON, 2004; WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010; ANANÍAS; SEPÚLVEDA-VILLARROEL; SALVO-SEPÚLVEDA, 2021;).

A intensa circulação de WPM influenciam a economia mundial devido à alta demanda do comércio exterior. Assim, há estudos sobre diversos custos da adoção da ISPM 15, dentre eles os custos para treinamento de funcionários alfandegários responsáveis pela inspeção de WPM (PAPYRAKIS; TASCIOTTI, 2019), impactos econômicos e comerciais da ISPM 15 (HASSLER et al., 2010; STRUTT et al., 2013), usos alternativos de WPM, como por exemplo a partir de paletes de plástico, bem como suas consequentes implicações, custos, benefícios (ANIL et al., 2020; GREENWOOD et al., 2023), e seus ciclos de vida (ANIL; RAY; KREMER, 2010; ANIL et al., 2020; ANIL; RAY; KREMER, 2010).

Como o tratamento fitossanitário acarreta em custos, alguns locais acabam não o realizando ou o fazem de forma incorreta. Atualmente existe uma sugestão de diagnóstico para comprovação do tratamento térmico por meio do teor de umidade das peças de WPM (KIM; RYU; EOM, 2019).

Além disso, o tratamento fitossanitário da madeira para WPM deve ser adequadamente armazenada para evitar contaminação fúngica antes do transporte (HUGHES et al., 2018; GREENWOOD et al., 2023), dessa forma os WPM devem ser produzidos sob rigorosos padrões de qualidade, sendo uma alternativa a remoção da casca, uma vez que maiores proporções de cascas influenciam o desenvolvimento de alguns patógenos (HAACK; PETRICE, 2009).

Os WPM devem também ser tratados com preservativos de madeira, secos até um determinado teor de umidade e armazenados ao abrigo das intempéries ambientais (MEISSNER et al., 2013). Os autores sugerem que a ISPM 15 pode considerar uma alteração que forneça isenções para WPM de baixo risco. Porém, eles explicam que são necessárias mais pesquisas para determinar quais características ou combinações de características do WPM justificariam designações de baixo risco. Durante o armazenamento, as pilhas de madeira devem ainda estar dispostas de forma a se manterem arejadas e sem contato direto com o chão, em local sem incidência de umidade e sem contato com outros WPM que ainda não passaram pelo tratamento fitossanitário.

Esse compilado de informações relata o principal interesse das pesquisas que utilizaram WPM em publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira. Muitas pesquisas ainda podem ser desenvolvidas, uma vez que a exportação de qualquer produto necessita de apoio e proteção. A madeira, por questões econômicas e ambientais, ainda é o material mais promissor para essa função (ANIL et al., 2020). Além disso a madeira é uma fonte renovável, especialmente quando proveniente de florestas manejadas de forma sustentável.

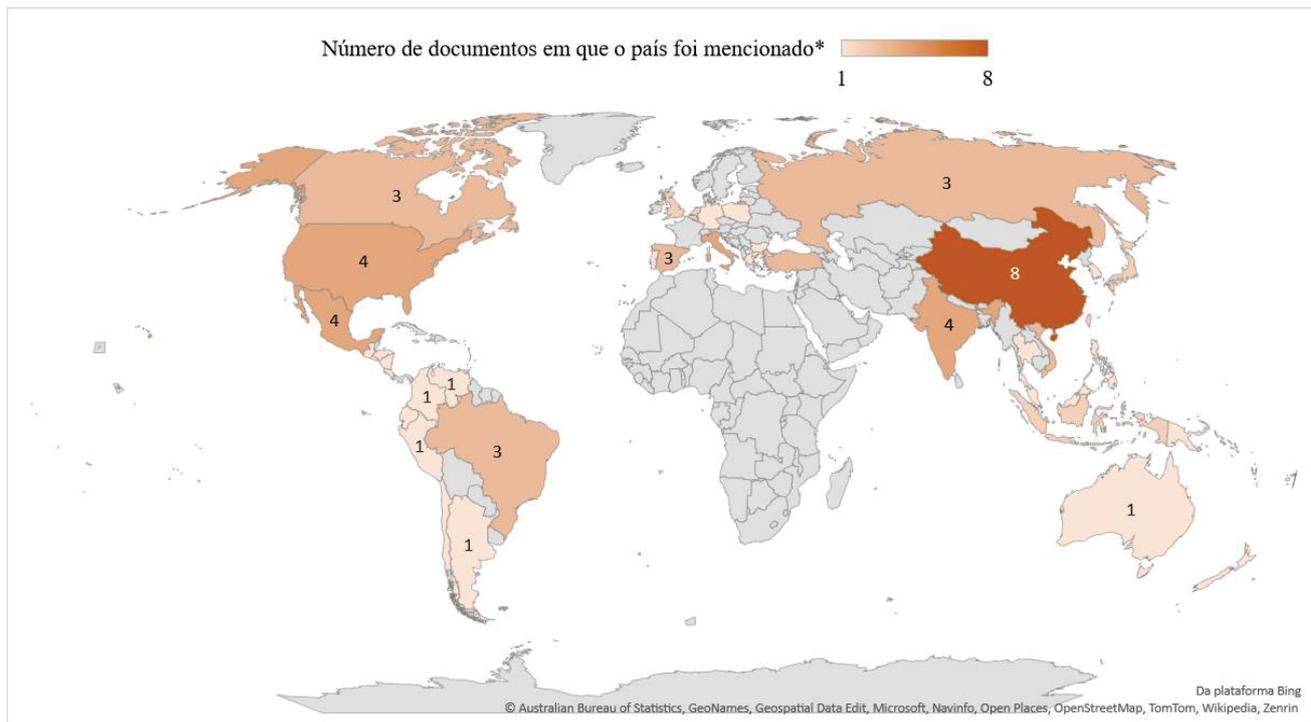
4.2.2 Materiais de embalagem de madeira contaminado e suas principais origens

Quando um organismo vivo é detectado em um WPM certificado pela ISPM 15, não necessariamente pode ser devido a uma não conformidade, mas pode ser resultado de vários fatores, incluindo tratamento inadequado, irregularidade, contaminação ou infestação após o tratamento (IPPC SECRETARIAT, 2023). A *International Plant Protection Convention* - IPPC ainda informa que dentre uma lista de medidas a serem tomadas pelo país importador, a depender do tipo de praga detectada e de seu status regulatório, cita-se o levantamento das seguintes informações:

- Presença e quantidade de casca;
- Tipo de WPM;
- Tipo de commodities associado ao WPM;
- Nome e informações de contato do exportador e o importador;
- Informações específicas de transporte (como navio, nome ou número do contêiner de remessa e datas e localização dos pontos de exportação e entrada);
- Qualquer outra informação que identifique a madeira utilizada na construção do WPM (como quaisquer logotipos, identificadores da empresa, notas ou marcas de qualidade que pode ter sido aplicado à madeira);
- Ações regulatórias tomadas, como recusa, tratamento ou destruição;
- País de origem do WPM.

A identificação dos países foi um tema de relevância em muitos artigos levantados durante a triagem para a revisão bibliométrica deste trabalho, pois ao saber o país de origem de um WPM contaminado, é possível que algumas medidas adequadas sejam tomadas para a correta proteção do meio ambiente. Dessa forma, a Figura 7 evidencia os principais países de origem de material contaminado.

Figura 7 - PRINCIPAIS PAÍSES DE ORIGEM DE MATERIAL CONTAMINADO, DE ACORDO COM OS DOCUMENTOS INDEXADOS NA SCOPUS ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023.



*O mesmo país pode ter sido abordado em mais de um documento

FONTE: A autora (2024).

Nessa classificação, a China lidera, com menção em oito documentos (ZAHID; GRGURINOVIC; WALSH, 2008; HAACK; PETRICE, 2009; SCHEEL, 2009; HAACK et al., 2014; EYRE et al., 2018; LAWSON et al., 2018; KRISHNANKUTTY et al., 2020; HAACK et al., 2022a), seguida por Índia (LAWSON et al., 2018; EYRE et al., 2018; BORIANI et al., 2019; HAACK et al., 2022a;) e EUA, México e Itália, ambos mencionados em quatro documentos (GU et al., 2006; EYRE et al., 2018; KRISHNANKUTTY et al., 2020; HAACK et al., 2022a), dentre outros países com menção igual ou menor que três documento.

O WPM é um importante caminho para o movimento internacional de agentes xilófagos que infestam a casca e a madeira (HAACK; PETRICE, 2009; HAACK et al., 2022a). Em um levantamento realizado pelos autores em 2022, sobre o período de 2003 a 2020, foram detectadas brocas da madeira em 180 das 87.571 remessas com WPM (0,21%) (HAACK et al., 2022a). Quando comparadas com 2003 - 2004 (taxa de detecção de 0,34%), as taxas de detecção caíram 61% durante 2005–2006, 47% durante 2007 - 2009 e 36% durante 2010–2020. Os autores enfatizaram que as taxas de infestação de WPM foram reduzidas significativamente durante vários períodos pós ISPM 15 para Itália e México, mas não para a China, pois de todas as inspeções classificadas como WPM, a maioria

teve origem na China (18,4%), sendo os próximos cinco países de origem mais mencionados (em ordem decrescente) Índia, Brasil, Alemanha, Itália e Turquia.

Em estudo sobre WPM interceptados nos portos de entrada dos EUA, os gêneros de madeira mais frequentemente infestados por insetos perfuradores foram *Pinus*, *Picea* e *Populus* (KRISHNANKUTTY et al., 2020), que foram fortemente representados como embalagens para proteção de mercadorias como pedra, metal, veículos e máquinas. Uma análise de 15 anos foi realizada para a compreensão de como o risco de pragas e doenças exóticas chegaram e se estabeleceram na Austrália (LAWSON et al., 2018). Os autores relataram que as pragas interceptadas se originaram de 52 países diferentes, dos quais 90% de todos os incidentes foram atribuíveis a 16 países, desses, mais de 60% originam-se da Nova Zelândia e China.

Pesquisas com WPM marcados também foram desenvolvidas pelo *Australian Quarantine and Inspection Service* – AQIS, durante 2005 e 2006 em vários locais da Austrália (ZAHID; GRGURINOVIC; WALSH, 2008). A análise detectou material com cascas, fungos, insetos vivos, excrementos e solos. Cerca de 78% dos insetos foram detectados em WPM com casca. Além disso, eles relataram que o país de origem estava ilegível em 25% das peças, e que os maiores percentuais de não conformidades eram da China, seguidos por Taiwan, Malásia e Vietnã, sendo Singapura o país com menor incidência. Os autores sugeriram maiores revisões na ISPM 15 e regimes de auditoria para prestadores de serviço de tratamento fitossanitário da madeira, com intuito de reduzir o risco de circulação de pragas por meio de WPM.

Embora as regulamentações internacionais tenham sido implementadas com sucesso para reduzir a introdução e propagação de pragas de produtos derivados de árvores, como o WPM, os insetos perfuradores de madeira continuam a ser interceptados em WPM nos portos de entrada dos EUA (KRISHNANKUTTY et al., 2020), estando frequentes em embalagens para mercadorias como pedra, metal, veículos e máquinas, onde a maioria das interceptações contendo brocas vivas vieram do México, China e Turquia.

Em 2008, alguns exemplares de *Anoplophora glabripennis* (Besouro Longhorn Asiático) foram encontrados pela primeira vez na Dinamarca (SCHEEL, 2009). A descoberta estava relacionada com importação de granito embalados em caixas de madeira oriundas da China, embora com a marca em conformidade com o recomendado pela ISPM 15.

Após várias intercepções de pragas em WPM associadas às importações de pedra da China, a União Europeia (UE) concordou em pesquisar certas categorias de importações com base nos códigos

da Nomenclatura Combinada da UE para importações, que se baseiam no Sistema Harmonizado internacional (EYRE et al., 2018). Os autores relataram que entre abril de 2013 e março de 2015, foram recebidas 72.263 remessas relevantes da China na UE e 26.008 foram inspecionadas. Foram detectados organismos nocivos em 0,9% das remessas e 1,1% das importações não tinham marcações em conformidade com a ISPM 15.

Sem conhecer o histórico de cada tábua marcada, não é possível determinar com certeza se os insetos foram colonizados antes ou depois do tratamento (HAACK; PETRICE, 2009). Os autores reforçam que devido a essa incerteza, a detecção de insetos vivos em WPM marcadas de acordo com a ISPM 15 não deve ser considerada como evidência de fraude. Sabe-se que o Norte e o Sudeste Asiático são os principais fornecedores de diversos produtos de madeira, sendo a China o maior (LAWSON et al., 2018).

Em 2021, a China contribuiu com US\$ 83,7 milhões ao importar do Brasil madeira bruta (FAZCOMEX, 2024), isso pode proporcionar maior circulação de pragas não apenas por meio dos WPM, mas até mesmo por meio dos produtos de madeira comercializados. Além disso, as pragas podem se alojar antes ou após o tratamento fitossanitário da madeira, quando não armazenadas de maneira correta, e dessa forma a contaminação podem ter origens diversas, até mesmo nos portos, durante a espera para o envio e contato com outras cargas.

Embora a China tenha sido o país que apareceu mais vezes nos documentos que abordam sobre países originário de WPM contaminados, não significa que seja o país que mais exporte WPM irregulares ou que não atenda as especificações fitossanitárias recomendadas pela ISPM 15. Isso pode ser reforçado por meio do levantamento realizado pela *Agriculture Quarantine Inspection Monitoring* (AQIM) relativo a porcentagem e origem dos insetos associados ao WPM com importância quarentenária (HAACK et al., 2014). Os autores relataram que as cinquenta intercepções (das 34.981 remessas), foram associadas a importações de dezesseis países que representavam quatro regiões do mundo, incluindo dezesseis registros de quatro países asiáticos, dezessete de sete países europeus, catorze de dois países da América Central e três registros de três países da América do Sul. Logo, assim como relatado por (HAACK; PETRICE, 2009), enfatiza-se que qualquer nação pode ser a fonte de agentes xilófagos.

A circulação de qualquer produto de origem vegetal pode introduzir patógenos em um novo ambiente de forma natural ou pelo meio antrópico, especialmente quando essa circulação ocorre de forma ilegal. O WPM pode ser um dos principais caminhos para a disseminação de patógenos, pois em

muitos casos este não é armazenado de maneira correta (HUGHES et al., 2022), mas não é o único meio. Equipamentos utilizados para auxiliar no processo de embalagem ou carregamento pode ser um caminho, além de contato do WPM com pragas já presentes no contêiner (GREENWOOD et al., 2023). Dessa forma, entende-se que todos os fatores podem estar entrelaçados e devem ser avaliados para a compreensão da propagação de uma espécie nociva ao mercado madeireiro.

4.2.3 Principais agentes xilófagos mencionados nos documentos

Os principais agentes xilófagos mencionados nos documentos relacionados com o tratamento fitossanitário da madeira estão apresentados na Tabela 1. Entre os documentos, foram mencionados também o bolor superficial (WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010; KITCHENS; DAHLEN; JOHNSON, 2014) e a mancha azul (WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010;), porém não foram inseridos na tabela por não estarem devidamente identificados.

Tabela 1 - NOMES CIENTÍFICOS DOS PRINCIPAIS AGENTES XILÓFAGOS DE RISCO PARA ESPÉCIES FLORESTAIS

Insetos 					
Nome Científico	Qt	Nome Científico	Qt	Nome Científico	Qt
<i>Anoplophora glabripennis</i>	17	<i>Pissodes nemorensis</i>	1	<i>Urocerus albicornis</i>	2
<i>Anoplophora chinensis</i> Forster	13	<i>Pissodes strobi</i>	1	<i>Agrius anxius</i> Gory	2
<i>Popillia japonica</i>	11	<i>Dendroctonus adjunctus</i>	1	<i>Apriona rugicollis</i>	2
<i>Megaplatypus mutatus</i>	9	<i>Dendroctonus brevicornis</i>	1	<i>Eurwallacea fornicatus</i> sensu lato	2
<i>Malacosoma americanum</i>	13	<i>Dendroctonus frontalis</i>	1	<i>Comstockaspis pernicioso</i>	2
<i>Oemona hirta</i>	8	<i>Tetropium castaneum</i>	1	<i>Triirachys sartus</i>	2
<i>Aeolesthes sarta</i>	9	<i>Ips calligraphus</i>	1	<i>Arhopalus alternatus</i> (Mulsant)	4
<i>Agriilus planipennis</i> Fairmaire	9	<i>Ips confusus</i>	1	<i>Hylurgus ligniperda</i> (Fabricius)	8
<i>Lycorma delicatula</i>	8	<i>Ips lecontei</i>	1	<i>Dendroctonus ponderosae</i>	2
<i>Malacosoma disstria</i>	11	<i>Ips paraconfusus</i>	1	<i>Dendroctonus valens</i>	2
<i>Choristoneura rosaceae</i>	6	<i>Ips pini</i>	1	<i>Apriona cinerea</i>	2
<i>Xylotrechus namanganensis</i>	8	<i>Ips plastographus</i>	1	<i>O. erosus</i>	2
<i>Sirex noctilio</i> F.	6	<i>Ips subelongatus</i>	2	<i>Sirex juvenecus</i> L.	2
<i>Apriona germari</i> (Hope)	5	<i>Monochamus carolinensis</i>	1	<i>Urocerus japonicus</i>	1
<i>Hylotrupes bajulus</i>	6	<i>Monochamus mutator</i>	1	<i>Agriilus bilineatus</i> (Weber)	1
<i>Trichoferus campestres</i>	6	<i>Monochamus nitens</i>	1	<i>Agriilus sulcicollis</i> Lacordaire	1
<i>Lymantria mathura</i>	5	<i>Monochamus notatus</i>	1	<i>Turanoclytus namanganensis</i>	1
<i>Quadraspidothus perniciosus</i>	4	<i>Acleris gloverana</i>	1	<i>Homalodisca vitripennis</i>	1
<i>Monochamus alternatus</i> (Hope)	5	<i>Dendroctonus pseudotsugae</i>	1	<i>Erschoviella musculana</i>	1
<i>Monochamus</i> spp.	5	<i>Anoplophora</i> sp.	1	<i>Pityophthorus juglandis</i>	5
<i>Dryocoetes autographus</i> (Ratzeburg)	1	<i>Aromia</i> sp.	1	<i>Sinoxylon indicum</i>	1
				<i>I. sexdentatus</i>	2

<i>Choristoneura conflitante</i>	4	<i>Batocera lineolata</i>	1	<i>Sinoxylon sudanicum</i>	1	<i>Monochamus galloprovincialis</i> (Oliv.)	1
<i>Lymantria sp</i>	1	<i>Batocera</i> sp.	1	<i>Choristoneura occidentalis</i>	1	<i>Lymantria dispar</i>	1
<i>Lopholeucaspis japonica</i>	3	<i>Hesperophanes</i> sp.	1	<i>Acleris variata</i>	1	<i>Sirex areolatus</i> (Cresson)	1
<i>Lepidosaphes ussuriensis</i>	3	<i>Phoracantha semipunctata</i>	1	<i>Choristoneura freemani</i>	1	<i>Sirex cyaneus</i> F.	1
<i>Sinoxylon anale</i>	3	<i>Purpuricenus temminickii</i>	1	<i>Choristoneura fumiferana</i>	1	<i>Siricidae</i> spp.	2
<i>Ips grandicollis</i>	3	<i>Saperda</i> sp.	1	<i>Dendrolimus superans</i>	1	<i>Sirex nigricornis</i> F.	1
<i>Dinoderus ocellaris</i>	1	<i>Xylotrechus</i> sp.	1	<i>Dendrolimus sibiricus</i>	1	<i>Tremex</i> sp.	1
<i>Lycetus africanus</i>	1	<i>Arhopalus syriacus</i>	1	<i>Dryocoetes confusus</i>	1	<i>Tremex columba</i> L.	1
<i>Tomiscus piniperda</i> L.	3	<i>A. rusticus</i>	1	<i>Gnathotricus sulcatus</i>	1	<i>Urocerus augur</i> (Klug)	1
<i>Choristoneura conflitante</i>	3	<i>Hylobius abietis</i>	1	<i>Ips hauseri</i>	1	<i>Xeris</i> sp.	1
<i>Xylotrechus rusticus</i>	1	<i>Ips typographus</i>	1	<i>Xyleborus eurygraphus</i>	1	<i>Xeris spectrum</i> L.	1
<i>Tetropium</i> sp.	1	<i>Ips</i> spp.	2	<i>Monochamus marmorator</i>	1	<i>Xeris tarsalis</i> (Cresson)	1
<i>Malacosoma parallela</i>	4	<i>Essigella californica</i>	1	<i>Monochamus obtusus</i>	1	<i>O. caelatus</i>	1
<i>Tetropium fuscum</i> F.	4	<i>Hylastes ater</i>	6	<i>Monochamus scutellatus</i>	2	<i>H. aequalis</i>	1
<i>Urocerus gigas</i> L.	3	<i>Coptotermes formosanus</i>	1	<i>Monochamus titillator</i>	1	<i>Tetropium cinnamopterum</i> (Kirby)	1
<i>Scolytus morawitzi</i>	1	<i>Ips typographus</i> L.	1	<i>Orgyia pseudotsugata</i>	1	<i>Pityophthorus</i> sp.	1
<i>Strobilomyia viaria</i>	1	<i>Orthotomicus erosus</i> (Wollaston)	1	<i>Sirex ermak</i>	1	<i>Arhopalus fesus</i>	3
<i>Xylotrechus altaicus</i>	1	<i>Pityogenes chalcographus</i> L.	1	<i>Polygraphus proximus</i>	2	<i>Hylurgops palliatus</i> (Gyllenhal)	1
<i>Dendroctonus frontalis</i>	1	<i>Polygraphus poligraphus</i> L.	1	<i>Tetropium gracilicorne</i>	1	<i>Ips acuminatus</i> (Gyllenhal)	1
<i>Dendroctonus rufipennis</i>	1	<i>Xenocnema spinipes</i>	1	<i>Prionoplus reticularis</i>	2	<i>Callidium</i> sp.	1
<i>Hesperophanes campestris</i>	1	<i>Monochamus titillator</i>	1	<i>Arhopalus</i> sp.	1	<i>Xylotrechus magnicollis</i>	1
<i>Anobiidae</i> sp	1	<i>Bostrichidae</i> sp	1	<i>Buprestidae</i> sp	1	<i>Cerambycidae</i> sp	1
<i>Platypodidae</i> sp	1	<i>Scolytidae</i> sp	1	<i>Cossidae</i> sp	1	<i>Sesiidae</i> sp	1



Fungos e organismos semelhantes a fungos



Nematóides

<i>Phytophthora ramorum</i>	7	<i>Phellinus weirii</i>	1	<i>Cronartium coleosporioides</i>	1	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	15
<i>Cronartium fusiforme</i>	4	<i>Gymnosporangium clavipes</i>	1	<i>Cronartium comandrae</i>	1	<i>Meloidogyne mali</i>	2
<i>Cronartium quercuum</i>	4	<i>Gymnosporangium globosum</i>	1	<i>Cronartium comptoniae</i>	1	<i>Bursaphelenchus</i> spp.	2
<i>Fusarium euwallaceae</i>	2	<i>G. juniperi-virginianae</i>	1	<i>Cronartium himalayense</i>	1	<i>Aphelenchus</i> spp..	1
<i>Melampsora medusae</i>	2	<i>Gymnosporangium yamadae</i>	1	<i>Endocronartium harknessii</i>	1	<i>B. mucronatus</i>	2
<i>Ceratocystis huliohia</i>	2	<i>C. lukuohia</i>	2	<i>Geosmithia morbida</i>	3	<i>B. fungivorus</i>	1
<i>Phytophthora</i> spp.	1	<i>Cladosporium herbarum</i>	1	<i>Cladosporium tenuissimum</i>	1	<i>B. hylobianum</i>	1
<i>Fusarium circinatum</i>	1	<i>Lastodiopodia theobromae</i>	1	<i>Neoneectria fockeliana</i>	1	<i>B. ranulfi</i>	1
<i>Ophiostoma novo-ulmi Brasier</i>	1	<i>Sphaeropsis sapinea</i>	1	<i>Armillaria novae zealandiae</i>	1	<i>B. thailandae</i>	1
<i>Lastodiopodia theobromae</i>	1	<i>Schizophyllum commune</i>	1	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	1	<i>B. aberrans</i>	1
<i>Phytophthora lateralis</i>	1	<i>Gibberella circinate</i>	1	<i>Cronartium kamischaticum</i>	1	<i>B. lini</i>	1
<i>Ceratocystis fagacearum</i>	2	<i>Gremmeniella abietina</i>	1	<i>Heterobasidion annosum,</i>	1	<i>B. singaporensis</i>	1
<i>Chondrostereum purpureum</i>	1	<i>Mycosphaerella populorum</i>	1	<i>Mycosphaerella dearnessii</i>	1	<i>B. doui</i>	1
<i>Phytophthora kernoviae</i>	2	<i>Heterobasidion irregulare</i>	1	<i>Mycosphaerella gibsonii</i>	1	<i>B. conicaudatus</i>	1
<i>Cryphonectria parasitica</i>	4	<i>Botryosphaeria laricina</i>	1	<i>Ophiostoma wageneri</i>	1	<i>B. vallesianus</i>	1
<i>Amylostereum areolatum</i>	2	<i>M. laricis-leptolepidis</i>	1	<i>Fusarium circinatum</i>	1	<i>B. pinasteri</i>	1
<i>Ceratocystis platani</i>	1	<i>Chrysomyxa arctostaphyli</i>	1	<i>Phytophthora lateralis</i>	1	<i>B. hofmanni</i>	1
<i>Geosmithia morbida</i>	1	<i>Atropellis pinicola</i>	1	<i>Melampsora farlowii</i>	1	<i>B. arthurii</i>	1
<i>O. clavignenti-juglandacearum</i>	1	<i>Atropellis piniphila</i>	1	<i>Phellinus weirii</i>	1	Bactérias	
<i>Phymatotric Zhopsis omnivora</i>	1	<i>Trichoderma ongibrachiatum</i>	1	<i>Mucor racemosus Bull</i>	1	<i>Xylella fastidiosa</i>	4
<i>Stegophora ulmea</i>	1	<i>Penicillium</i> sp.	1	<i>Trichoderma viridescens</i>	1	<i>Candidatus Phytoplasma ulmi</i>	1
<i>Trichoderma atroviride</i>	1	<i>Amylostereum</i> spp.	1	<i>Sphaerulina musiva</i>	1	Ácaros	
<i>Gibberella circinate</i>	1	<i>Bretziella fagacearum</i>	1	<i>Oligonychus perditus</i>	1		3

Qt = Número de documentos mencionados; Cor laranja = Alguns dos xilófagos mais comuns a *Gmmospermas* e Cor marrom = Alguns dos xilófagos mais comuns a espécies do gênero *Pinus*.

O Grupo Internacional de Pesquisa em Quarentena Florestal – IFQRF, citado por Ormsby, (2022), desenvolveu uma lista de grupos de pragas que considerou significativos na sua associação com WPM movimentados no comércio internacional. A lista inclui insetos (*Bostrychidae*, *Buprestidae*, *Cerambycidae*, *Scolytinae* e *Siricidae*), fungos (*Heterobasidion* spp., *Ceratocystis* spp.) e nematoides (*Bursaphelenchus xylophilus* ((Steiner & Buhrer) Nickle)).

Alguns dos táxons dessas famílias citadas acima podem infestar o WPM após o tratamento fitossanitário. Por essa razão a *National Plant Protection Organizations* - NPPO do país importador deve identificar a espécie do agente xilófago, considerar seu estágio de vida em relação à idade do WPM e avaliar se o mesmo poderia estar presente no momento do tratamento ou se é mais provável que ele infestou a madeira após o tratamento (IPPC SECRETARIAT, 2023). Ainda de acordo com a IPPC, organismos mortos na madeira ou vestígios de infestações antigas ou inativas não é um sinal de não conformidade.

Diante da triagem realizada na presente pesquisa, o inseto *Anoplophora glabripennis* esteve presente em 17 documentos, respectivamente. A maioria das publicações que cita o *Anoplophora glabripennis* são da *EPPO Bulletin*, responsável por publicações de documentos sobre todos os aspectos da proteção fitossanitária, em particular aqueles que são de especial interesse para as Organizações Nacionais de Proteção Fitossanitária.

Anoplophora glabripennis, o besouro de chifre longo asiático, é uma espécie de praga invasora de alto perfil, capaz de infligir danos graves aos seus hospedeiros, que incluem muitas espécies importantes de árvores de pomar, ornamentais e florestais (MCKENNA et al., 2016). Os autores explicam que esse inseto é amplamente polífago em angiospermas lenhosas e que são nativos do leste da Ásia, mas recentemente se estabeleceu em vários países da América do Norte e Europa, por exemplo, por meio de material de embalagem de madeira maciça.

As publicações da *EPPO Bulletin* são sobre espécies arbóreas hospedeiras, como as do gênero *Platanus*, *Tilia*, *Acer*, *Fraxinus*, *Ulmus*, *Fagus*, *Populus*, *Betula*, *Salix*, *Quercus* e *Castanea* (EPPO, 2010). Elas visam recomendar aos Governos Membros da EPPO as medidas fitossanitárias que devem ser usadas para que produtos de origem vegetal ao circular no comércio internacional, não seja caminho para a introdução e propagação de pragas quarentenárias. Dentre as medidas de proteção recomendadas nos documentos, cita-se que produtos de origem vegetal (exceto sementes) e madeira dos gêneros citados originários de países onde ocorrem *Anoplophora glabripennis* devem estar livres da praga e devem ser transportados fora do período de vôo correspondente ou não devem ser transportados por áreas infestadas ou apenas manter todo o transporte fechado. No caso da madeira roliça, recomenda-se também o descasque e tratamento fitossanitário.

As pragas quarentenárias se agrupam em duas categorias: A1, ou ausentes, quando são as pragas exóticas não presentes no país e A2, ou presentes, quando são pragas de importância econômica potencial, já presentes no país, porém apresentando disseminação localizada e submetidas a programa oficial de controle (BARBOSA; PARANHOS, 2021). No Brasil, *Anoplophora* spp. ainda é considerada uma praga quarentenária ausente (MAPA, 2022c). A praga já foi interceptada no país, porém a ação do Vigiagro impediu o ingresso dessa praga de alto risco, a qual foi detectada em WPM e logo submetido à fumigação e destruição (MAPA, 2018).

Os demais artigos levantados já demonstravam a preocupação com a crescente e ágil infestação por xilófagos entre diversos continentes (KEIRAN; ALLEN, 2004; HUMBLE, 2010). Mesmo produtos que não são sujeitos a inspeção fitossanitária, como automóveis, roupas, entre outros, podem ser embalados com WPM que podem estar infestados por pragas como *Anoplophora glabripennis*, *Agrilus planipennis* e *Tetropium fuscum*. Eles também relatam que a Ásia é a provável origem dos WPM contaminados com esses xilófagos (KEIRAN; ALLEN, 2004).

O uso da madeira para embalar, encaixotar, ou apoiar outras mercadorias comercializadas durante o transporte demonstrou fornecer um importante caminho para a introdução de pragas e patógenos florestais (HUMBLE, 2010). O autor acredita que, em partes, isso pode ser consequência de diferenças entre a qualidade da madeira comercializada como uma mercadoria e o que é aceitável como embalagens descartáveis (muitas vezes de uso único).

Visto que nos EUA existe o estabelecimento de *Anoplophora glabripennis*, *Tomicus piniperda*, *Agrilus planipennis* e outras pragas que tem sido associadas à importação de WPM, uma estimativa dos impactos econômicos e comerciais da ISPM 15, incluindo o uso de paletes de plástico, foi realizada para o comércio dos EUA (STRUTT et al., 2013). Os autores relataram, baseados em outras pesquisas, que a substituição dos paletes de madeira por paletes de plástico aumentou os custos em até mais de 3 vezes.

Paletes de plástico com capacidade de peso equivalente e adequados para reutilização em remessas internacionais, custam aproximadamente US\$ 14,00 por pallet a mais do que paletes de madeira novos (STRUTT et al., 2013). Assim, os autores enfatizam que o impacto no bem-estar da utilização de paletes de plástico em vez de paletes de madeira no transporte internacional é significativamente maior.

Entre os nematoides, o *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner e Buhner) Nickle apareceu em 15 documentos. Pesquisadores diversos tiveram como motivação a eliminação de pragas de grande risco econômico, como *Bursaphelenchus xylophilus* para o desenvolvimento de experimentos para tratamento térmico da madeira de forma a atender a ISPM 15 (ALÉON, 2004; HENIN et al., 2008;

UZUNOVIC et al., 2013; HENIN et al., 2014; ANANÍAS; SEPÚLVEDA-VILLARROEL; SALVO-SEPÚLVEDA, 2021).

Bursaphelenchus spp. foram detectados em 202 lotes de 25 países diferentes, durante inspeção no Departamento de Inspeção e Quarentena de Entrada-Saída de Ningbo, China (GU et al., 2006). Os autores relataram que *B. xylophilus* não foi apenas encontrado em embalagens de madeira importadas de áreas onde se sabe que ocorre (Estados Unidos da América, Japão, Coreia, Hong Kong e Taiwan), mas também de países considerados livres desta praga (ou seja, Brasil, Tailândia, Bélgica, Holanda, Itália e Espanha), o que pode muito provavelmente ser explicada pela circulação global de WPM entre países infestados e não infestados, evidenciando a necessidade de um reexame cuidadoso das atuais medidas de tratamento térmico.

Foi realizada análise em WPM em vários locais da Austrália pelo AQIS, durante 2005 e 2006 (ZAHID; GRGURINOVIC; WALSH, 2008). Cerca de 50% dos WPM analisados não estavam em conformidade com a ISPM 15. Dentre as pragas interceptadas, nematoides do gênero *Bursaphelenchus* estavam presentes. Os autores relataram que é possível que insetos, fungos e nematoides detectados no inquérito foram devidos a reinfestação após o tratamento ou durante o trânsito (aéreo, marítimo, carga fracionária), evidenciando a necessidade de correto tratamento fitossanitário, independente do meio pelo qual os WPM entram em um país.

O nematoide da madeira do pinheiro (NMP) *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner e Buhner) Nickle é o agente causal da doença da murcha do pinheiro (SOUSA et al., 2011). Os autores evidenciam que a compreensão do comportamento de voo do inseto vetor e aspectos da interação vetor-hospedeiro abrirá novas possibilidades de limitação da doença. Em contrapartida, os autores apontam que a indústria de paletes, por exemplo, tem sido severamente afetada pela obrigação de tratamento térmico de toda a madeira destinada à exportação, e muitas indústrias de pequeno porte fecharam devido a problemas financeiros originados pela presença de *B. xylophilus* em Portugal.

O processamento em alta pressão, um tratamento fitossanitário não térmico, foi realizado para avaliar a eficácia na eliminação de *Bursaphelenchus xylophilus* em madeira de *Pinus pinaster* (FONSECA et al., 2014). Os autores relataram que nematoides vivos foram observados em cortes e cavacos de madeira tratados a 5 e 15 MPa, mas a 30 MPa nenhum nematoide foi detectado, o que revela que o processamento de alta pressão foi bem-sucedido na eliminação de *B. xylophilus* dos materiais de madeira.

A eficácia de produtos de madeira atualmente permitidos pelo Regulamento Europeu de Biocidas para proteção de madeira verde e seca contra *B. xylophilus* foi avaliada (ARCOS et al., 2015). A maioria dos produtos de madeira comercial testados tem efeito sobre *B. xylophilus* em

madeira verde e seca, e os produtos que contêm o ingrediente ativo IPBC, um fungicida antimicrobiano, são mais eficazes contra o nematoide do pinheiro - NMP.

No entanto, os autores alertam que é preciso avaliar os preservativos de madeira que serão utilizados, pois nem todos funcionam com a mesma eficácia em madeiras pintadas e não pintadas (ARCOS et al., 2015). A madeira protegida com preservativos desde o abate até à utilização final, poderá ser a melhor forma de controle adequado para o NMP, reduzindo o risco de dispersão, sendo até mesmo uma alternativa válida à ISPM - 15 e em algumas situações impedindo a sua aplicação.

O risco associado à disseminação do nematoide do pinheiro com paletes de madeira seca em estufa foi avaliado por meio da amostragem de paletes comerciais de diferentes idades e da inoculação de *B. xylophilus* em madeira tratada para avaliar a sobrevivência do nematoide (NAVES et al., 2019). Não foram encontradas espécies de *Bursaphelenchus*, mas nematoides das famílias Aphelenchidae, Aphelenchoididae, Diplogasteridae, Rhabditidae e Tylenchidae foram encontrados em 45% das amostras, estando ausentes nas madeiras com menos de 6 meses de tratamento fitossanitário, mas presentes com frequência crescente em paletes com tratamentos mais antigos.

Ainda na mesma pesquisa, ao realizar inoculação de *Bursaphelenchus xylophilus*, os autores confirmaram que os tratamentos da ISPM 15 higienizam eficazmente a madeira e que a madeira mais velha e mais seca não suporta a reinfestação com *Bursaphelenchus xylophilus*, enquanto outros nematoides saprofíticos e fungos colonizam a madeira tratada (NAVES et al., 2019). Eles sugerem que investigações futuras deverão avaliar o risco associado à madeira seca em estufa sujeita a ganho de umidade, e a sua capacidade para sustentar populações viáveis do *Bursaphelenchus xylophilus*.

Entre os fungos e organismos semelhantes a fungos destacou-se *Phytophthora ramorum* com sete menções. Todos são da *Eppo Bulletin*, com ênfase nas espécies arbóreas dos gêneros *Acer*, *Fagus*, *Betula*, *Castanea*, *Quercus* e todos os gêneros do grupo das Coníferas (EPPO, 2009; EPPO, 2014; EPPO, 2017b; EPPO, 2017c; EPPO, 2018a; EPPO, 2022a; EPPO, 2022b).

Phytophthora ramorum está classificada como praga quarentenária A2 nos documentos para todos os gêneros arbóreos levantados que podem ser via de introdução significativo para disseminação do fungo. As medidas de proteção recomendadas nos documentos para os gêneros das plantas são: local de liberdade de produção e zona tampão adequada com pesquisas regulares para *Phytophthora ramorum* ou local de produção livre de pragas para *Phytophthora ramorum* e medidas de exclusão para água corrente. A madeira dos gêneros relatados nos documentos, que são originárias de países onde ocorre o fungo, devem estar livre dessa praga e receber os mesmos tratamentos recomendados para a madeira originada de países com *Anoplophora glabripennis*.

Entre as Bactérias, a *Xylella fastidiosa* é citada em 4 documentos, todos são normas da Eppo Buletin (EPPO, 2017b; EPPO, 2020a; EPPO, 2022a; EPPO, 2022b). Os documentos relatam que essa é uma praga quarentenária ausente nos países membros da Europa e que ao se transportar plantas oriundas de países onde a ocorre, deve-se haver a garantia que a planta está livre da bactéria.

Apenas o *Oligonychus perditus* foi mencionado em 3 documento entre os Ácaros. Os documentos são atualizações das normas *Eppo Bulletin*, sobre todas as plantas do sub-reino Coniferae (filó), ou seja, membros principalmente das famílias Cupressaceae e Pinaceae, mas também Araucariaceae, Cephalotaxaceae, Phyllocladaceae, Podocarpaceae, Taxaceae e Taxodiaceae (EPPO, 2009; EPPO, 2014; EPPO, 2018a).

As normas abrangem certos gêneros específicos, que são reconhecidos por terem espécies hospedeiras das pragas regulamentadas, como *Oligonychus perditus*, especificadas para a região EPPO: *Abies*, *Juniperus*, *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Tsuga*. As medidas de precaução contra a disseminação do ácaro são semelhantes ao recomendado nas citações anteriores para *Anoplophora glabripennis*, *Bursaphelenchus xylophilus*, *Phytophthora ramorum* e *Xylella fastidiosa*.

A introdução de pragas quarentenárias em uma região, sem as devidas medidas fitossanitárias para assegurar contenção e manejo, podem causar impactos sociais, ecológicos e econômicos (EMBRAPA, S/D). O portal relata ainda que entre os potenciais problemas decorrentes estão: perda de mercados ou aumento dos custos de exportação devido à imposição de barreiras fitossanitárias (domésticas e internacionais); aumento dos gastos com controle; perda de biodiversidade nacional; e gastos com programas de controle oficial ou medidas de contenção, entre outros. Uma investigação da gestão de mitigação de pragas, relacionadas à cadeia de suprimentos global de WPM foi realizada por Greenwood et al., (2023). Os autores trazem tópicos importantes, como o risco de contaminação de WPM pós-tratamento fitossanitário. Eles relatam que mesmo após a iniciativa global amplamente implementada, ainda ocorre movimentos de pragas devido a uma combinação de fatores, que pode incluir: fraude, uso de material não tratado, tratamento insuficiente ou incompleto e contaminação pós-tratamento.

Dessa forma, sabe-se que provavelmente existem centenas de espécies de organismos que habitam a madeira e que ainda não foram descritos em todo o mundo (HAACK et al., 2011). Porém, apenas uma pequena porcentagem desses organismos realmente causam a morte de árvores, como *Anoplophora glabripennis* (besouro asiático de chifre longo), *Agrilus planipennis* (broca do freixo esmeralda) e *Bursaphelenchus xylophilus* (nematóide do pinheiro) (HAACK, 2006; HAACK et al., 2010), que foram as pragas e patógenos mais recorrentes no levantamento. No entanto, a maioria dos trabalhos levantados não tinham enfoque nas pragas e patógenos em si, mas em métodos de

eliminá-los ou impedir sua infestação e posterior disseminação em diversos continentes por meio do caminho mais importante, os WPM.

4.2.4 Principais gêneros e espécies arbóreas relacionadas ao tratamento fitossanitário da madeira

Os principais gêneros arbóreos mais abordados nos documentos relacionados ao tratamento fitossanitário estão apresentadas na Tabela 2. O gênero mais recorrente foi o *Pinus*, com menção em 43 publicações.

Tabela 2 - MADEIRAS MAIS ABORDADAS NOS DOCUMENTOS INDEXADOS NA SCOPUS, ATÉ 22 DE DEZEMBRO DE 2023, RELACIONADOS AO TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA

		Espécies arbóreas 	
Gêneros*	Qt	Nome científico	Qt
<i>Pinus</i>	43	<i>Pinus radiata</i> D. Don	12
<i>Picea</i>	10	<i>Pinus</i> spp.	11
<i>Quercus</i>	9	<i>Pinus sylvestris</i>	5
<i>Populus</i>	7	<i>Juglas nigra</i> L.	5
<i>Fraxinus</i>	7	<i>Pinus pinaster</i> Ait	4
<i>Juglas</i>	7	<i>Abies</i> spp.	3
<i>Larix</i>	6	<i>Quercus rubra</i> L.	3
<i>Abies</i>	6	<i>Fraxinus</i> spp.	3
<i>Pseudotsuga</i>	6	<i>Larix</i> spp.	2
<i>Tsuga</i>	5	<i>Thuja plicata</i>	2
<i>Acer</i>	4	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2
<i>Thuja</i>	4	<i>Pinus resinosa</i> Sol. ex Aiton	3
<i>Betula</i>	4	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	3
<i>Chamaecyparis</i>	3	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	2
<i>Cryptomeria</i>	3	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	2
<i>Liriodendron</i>	3	<i>Fraxinus americana</i> L.	2
<i>Castanea</i>	2	Outros	14
<i>Liquidambar</i>	2		
<i>Salix</i>	2		
<i>Cedrus</i>	2		
Outros	18		

Qt = Número de documentos. *Alguns documentos citam mais de uma espécie ou gênero e alguns documentos citam apenas gênero.

Embora entre os gêneros citados, muitos sejam do grupo das Angiospermas, como *Quercus*, *Populus*, *Fraxinus*, *Acer*, *Betula*, *Salix*, *Liriodendron* e *Liquidambar*, observou-se que dentro dos parâmetros analisados, a utilização do gênero *Eucalyptus* como WPM ainda é inexistente em meio às publicações. Porém sabe-se que comercialmente a madeira de eucalipto é utilizada como WPM, mas em menor proporção que a madeira de *Pinus*.

O motivo da escassez de publicações indexadas sobre tratamento fitossanitário com madeira de *Eucalyptus*, pode ser por diversos fatores, dentre eles a dificuldade de secagem, pois é uma madeira mais susceptível ao surgimento de rachaduras (MARIA, et al. 2022) do que a madeira de pinus. A madeira de *Eucalyptus* não é tão acessível em algumas regiões como a madeira de *Pinus*, o que conseqüentemente torna sua aquisição mais cara nesses locais e por questões culturais, pois muitas empresas não tem familiaridade com as características dessa madeira. Por essas razões as publicações sobre a temática podem ter se concentrado espécies de maiores interesses comerciais globais, a depender da finalidade.

Os documentos levantados mais recentes que citaram o gênero *Pinus*, tinham interesses diversos, como relatar possíveis potenciais pragas para a UE (BRAGARD et al., 2023a, 2023b), que mesmo com toda a questão de infestações, os paletes de madeira são mais viáveis que paletes de plástico, em amplos aspectos (ANIL et al., 2020). Há ainda pesquisas que comprovam que a remoção rápida das toras após o abate nas florestas, principalmente em áreas de alto risco, reduz a chance de infestação de pragas (MEURISSE; PAWSON; SOMCHIT, 2021), entre outras.

Uma outra pesquisa importante foi realizada com amostras de árvores infestadas de *Fraxinus*, *Betula*, *Quercus* e *Pinus*, em Michigan (HAACK; PETRICE, 2022b). Elas foram usadas para avaliar a mortalidade da broca em temperaturas centrais de 50, 53, 56 e 60°C mantidas por 30 min., em câmaras ajustadas para 60, 65, 70 ou 75°C. Os autores relataram que para as espécies de *Buprestidae* testadas, houve mortalidade completa em madeira de *Betula* e em *Fraxinus*, porém, para o *Quercus*, alguns *A. bilineatus* e *A. sulcicollis* sobreviveram nas mesmas condições de aquecimento, e que algumas brocas infestantes de pinheiros sobreviveram ao aquecimento até 56°C em todas as temperaturas da câmara.

A partir do estudo anterior é possível perceber que há necessidade de pesquisas futuras para esclarecer como as propriedades de uma espécie da madeira, sejam elas químicas, físicas ou anatômicas, podem interferir na sobrevivência de uma praga florestal presente na madeira, após tratamento fitossanitário. Apontar qual melhor tipo de tratamento fitossanitário para uma determinada espécie usada no WPM também forneceria retornos positivos para o setor de exportação. A maioria dos trabalhos levantados não tinham enfoque nas espécies arbóreas em si,

mas em métodos de eliminá-los ou impedir sua infestação e posterior disseminação em diversos continentes por meio do caminho mais importante, os WPM.

4.2.5 Direcionamento científico sobre o tratamento fitossanitário da madeira conforme ISPM 15

Os tipos de tratamento mais abordados foram os tratamentos por HT, seguido pelos DH e posteriormente os tratamentos por fumigação. As publicações abordam tratamentos já aceitos pela ISPM 15 e os tratamentos com potencial aceitação futura também. Ressalta-se que em alguns casos, o mesmo documento mencionou mais de um tratamento fitossanitário.

Os documentos levantados sobre o **tratamento térmico (HT)** como medida fitossanitária para a madeira, de maneira geral visam aumentar a eficácia do tratamento fitossanitário de WPM com menor dispêndio de tempo. Dessa forma a primeira pesquisa indexada foi realizada logo após a implementação da ISPM 15, com intuito de estimar a temperatura do centro da madeira a partir da temperatura do ambiente (ALÉON, 2004). O estudo visou garantir o tratamento fitossanitário necessário para eliminar pragas de importância quarentenária, como *Bursaphelenchus xylophilus*.

Os estudos mais recentes envolvem o tratamento térmico como medida fitossanitária em abordagens diversas. Há investigações sobre a mortalidade de pragas na madeira a diferentes temperaturas (MACQUARRIE et al., 2019; HAACK et al., 2022a), outras trazem informações de que o HT é mais eficiente, em diversos aspectos, que a fumigação com brometo de metila (ANIL et al., 2020), porém há evidências de que a eficiência do HT pode ser comprometida caso o tratamento seja mal realizado, podendo acarretar em peças de madeira com pragas sobreviventes (KRISHNANKUTTY et al., 2020).

Há estudos inovadores, como o desenvolvimento de modelo numérico e de protótipos para secadores solares desumidificadores de madeira e células específicas para tratamento térmico fitossanitário de madeira (ZRIBA et al., 2022). Os resultados do modelo numérico foram então usados para simular o comportamento dinâmico de um sistema fitossanitário solar completo. Os autores relataram que os testes experimentais preliminares do protótipo confirmaram a viabilidade e o bom funcionamento da instalação para tratamento fitossanitário e que um protocolo experimental completo está sendo desenvolvido para estudar detalhadamente o desempenho da instalação em diferentes condições. Elucidaram ainda que os modelos numéricos desenvolvidos também serão utilizados para estudo e dimensionamento de instalações de secagem de madeira.

Pesquisas também foram desenvolvidas para demonstrar os impactos ambientais, envolvendo o processo de tratamento fitossanitário, por meio de avaliações do ciclo de vida (LCA)

de paletes de madeira e de plástico (ANIL et al., 2020). Nesse estudo, os resultados mostraram que, numa viagem única, os paletes de madeira que passaram por tratamento fitossanitário HT e DH (RF), incorrem numa emissão de carbono global de 71,8% e 80,3% inferior, respetivamente, aos paletes de plástico durante o seu ciclo de vida; e em comparação com paletes de madeira tratadas com fumigação com brometo de metilo, incorrem em 20% e 30% menos emissão de carbono global.

Experimentos com pragas e patógenos foram realizados para comprovar a eficiência do tratamento fitossanitário de paletes pelo HT de acordo com as normas ISPM 15 (PAWSON et al., 2019). Houve completa ausência de nematoides (de qualquer espécie) na madeira tratada há menos de 6 meses, o que sugeriu que o tratamento térmico é eficaz. Porém os autores observaram que os fungos continuaram abundantes nos paletes, o que sugere que o tratamento térmico não eliminou todos os fungos da madeira ou que os mesmos colonizaram rapidamente a madeira tratada.

Estudos futuros para verificar a relação entre o aumento da proliferação de fungos e as alterações nas atividades enzimáticas e de níveis de açúcares, na madeira tratada termicamente serão valiosos, conforme mencionado por (EYRE et al., 2018). Pesquisas nessa temática já estão sendo desenvolvidas (ILINE et al., 2014). Porém um fator limitante dos testes para inspeção sobre a realização do tratamento térmico, é que os testes podem demonstrar que a madeira foi tratada termicamente, porém não há como saber se o tratamento foi suficientemente quente e longo para ser eficaz contra organismos prejudiciais (EYRE et al., 2018).

Com mesmo interesse, Kim; Ryu e Eom, (2019) testaram um método de controle para avaliar a conformidade de WPM, entretanto por meio de análise das propriedades físico-químicas e abordagem quimiométrica. Os autores relataram que o processamento da madeira pela ISPM 15 não alterou suas características físico-químicas, mas o teor de umidade do centro da madeira ficou em torno de 6%, enquanto antes do tratamento térmico era de 10 a 12%. Dessa forma eles comprovaram que o teor de umidade pode ser facilmente alterado por tratamento térmico suave, podendo ser um método de diagnóstico. Além disso as alterações nas propriedades químicas ocorridas após o tratamento puderam ser distinguidas pelo uso de análise de componentes principais em união a análises de espectroscopia, o que também pode ser considerada futuramente uma forma de diagnóstico.

A determinação da eficácia do vapor a vácuo para o tratamento térmico de madeiras, foi testada para grandes seções transversais em pranchas e engradados de madeira, de acordo com os requisitos de tratamento térmico da ISPM 15 (CHEN et al., 2018). Os autores realizaram secagem prévia ao ar e posteriormente inseridos *Monochamus* spp. nas peças, como substitutos representativos de cerambicídeos invasivos. A pressão de vácuo inicial foi de 100 mm/Hg e a temperatura da câmara de teste foi ajustada para 90°C. Os resultados indicaram que o ciclo de

tratamento foi menor que o da fumigação com brometo de metila e que houve mortalidade completa (100%) das pragas avaliadas.

Muitas pesquisas envolvendo tratamento térmico da madeira conforme a ISPM 15, tem levantado informações positivas também sobre o uso de vapor e vácuo. Esse tratamento foi testado em estudo para a eliminação dos agentes causais da Doença do Cancro (DC), na qual foram usadas toras de árvores de *Juglans* sintomáticas de DC, no Oregon e no estado de Washington (JUZWIK et al., 2021). A eliminação completa de *P. juglandis* e *G. mórbida*, causadores de DC foi alcançada usando uma temperatura mínima de 56°C a uma profundidade alvo de 5 cm do fundo do sulco da casca até o alburno e mantida por 30 min.

O vapor a vácuo também foi avaliado quanto à sua capacidade de erradicar os agentes *Ceratocystis lukuohia* e *Ceratocystis huliohia*, em toras de árvores florestais afetadas pela morte rápida de Ohia (JUZWIK et al., 2022). Nenhum *Ceratocystis* viável foi detectado em locais de alburno para tratamento de 60°C/60 min ou locais internos para o tratamento de 56°C/30 min após o tratamento. O tempo necessário para o tratamento variou de 7,4 a 15 horas para o tratamento 56°C/30 min e de 8,6 a 19,2 horas para o tratamento 60°C/60 min, mostrando ser um tratamento fitossanitário viável para ser implementado também no Havaí. Diversas outras pesquisas avaliaram a eficiência do tratamento térmico por vapor a vácuo (FONSECA et al., 2014; CHEN; WHITE; MACK, 2017; ANANÍAS; SEPÚLVEDA-VILLARROEL; SALVO-SEPÚLVEDA, 2021; HUGHES et al., 2022).

Estudos com resultados satisfatórios foram realizados para verificar a combinação do tratamento térmico com biocidas (KITCHENS; DAHLEN; JOHNSON, 2014), ou outros conservantes (MEISSNER et al., 2013) para avaliar a suscetibilidade da madeira aos organismos. Há estudos que avaliam a influência da espessura das peças de madeira na eficiência do tratamento térmico (ANANÍAS et al., 2013; KIM; SHIN; KIM, 2016), o desenvolvimento de modelos empíricos, experimentais, para estimar os tempos de aquecimento sob várias condições de tratamento térmico (WANG; BERGMAN; MACE, 2010), detecção de alterações químicas na madeira após o tratamento térmico, sem secagem convencional da madeira (LAMBERTZ; WELLING, 2010), entre outros.

Ademais, todos os documentos da *Eppo Bulletin* referentes aos diferentes gêneros arbóreos, recomendam o tratamento térmico como medida fitossanitária. Os documentos recomendam esse tratamento para a madeira em tora e madeira serrada (com algumas exceções), entre outros (EPPO, 2009; EPPO, 2010; EPPO, 2014; EPPO, 2017a; EPPO, 2017c; EPPO, 2017d; EPPO, 2017e; EPPO, 2018a; EPPO, 2018b; EPPO, 2020a; EPPO, 2020b; EPPO, 2020c; EPPO, 2022a; EPPO, 2022b; EPPO, 2022c).

Dentre os documentos sobre o aquecimento dielétrico (DH), uma das pesquisas mais recentes aborda a redução do consumo de energia e tempo durante o tratamento fitossanitário de paletes de madeira usando radiofrequência (JANOWIAK et al., 2022). Essa redução foi alcançada por meio do uso de uma manta de lã como material de isolamento térmico. Além disso, houve uma redução da perda de umidade em comparação com controles não isolados para algumas espécies de madeira, mas não todas.

A quantificação numérica do tempo mínimo necessário para o tratamento fitossanitário de três espécies de madeira do leste do Canadá foi estimada por Erchiqui et al., (2020). As investigações foram realizadas na frequência de 2.466 MHz, temperaturas de -20 a 60 °C e teor de umidade de 131% em amostra de cubo de madeira com 22 mm de espessura e uma paleta (100 mm × 50 mm × 22 mm). A partir da modelagem os autores estimaram com precisão o tempo necessário para atingir a temperatura de 60 °C recomendada pela ISPM 15, isto permite otimizar o tempo e, portanto, a energia do tratamento térmico por micro-ondas.

Um outro modelo baseado em redes neurais artificiais (RNA), foi desenvolvido anteriormente por Bedeleian, (2018). O autor desenvolveu a modelagem com dados disponíveis na literatura. Os resultados indicaram que o modelo de RNA desenvolvido pode prever razoavelmente ($R^2 = 0,72$) a temperatura final das peças de madeira durante o aquecimento dielétrico em radiofrequências.

O tempo de tratamento, profundidade de penetração da onda eletromagnética e uniformidade de aquecimento foram testados para comparar o DH por RF e por MW, para tratamento fitossanitário de madeira verde, em conformidade com a ISPM 15 (DUBEY et al., 2016). Foram exploradas análises de imagens térmicas das amostras tratadas, bem como a profundidade teórica de penetração da energia dielétrica. Os autores relataram que as taxas de aquecimento para RF e MW foram relativamente semelhantes. No entanto, o aquecimento por RF foi 40% mais rápido e com maior uniformidade de aquecimento que o MW. A capacidade da irradiação de microondas para matar as larvas com parâmetros semelhantes às diretrizes IPPC foram alcançadas, embora as temperaturas letais para os fungos fossem muito altas.

A eficácia da irradiação por MW na fitossanidade de WPM foi testada por Payette et al., (2015), logo após a sua inclusão como tratamento fitossanitário aceito pela ISPM 15. Os autores testaram em larvas e fungos presentes na madeira de cinco espécies de importância econômica em Quebec, e usaram diferentes combinações de temperatura/tempo em cada espécie para acumular dados sobre o tratamento.

Pesquisas já estavam em desenvolvimento com o intuito de utilização do MW como tratamento fitossanitário da madeira, bem antes do MW ser submetido à consideração pelos países

signatários da IPPC (LEWIS; HAVERTY, 1996; FLEMING et al., 2003). Henin et al., (2008) já relatavam que se fosse demonstrado um controle bem sucedido do tratamento com MW, independente das características das peças (espessura, densidade básica, espécie, MC, entre outras), ela poderia ser integrada numa linha de montagem equipada com um forno túnel, podendo ser um passo significativo para o reconhecimento da irradiação de micro-ondas como um tratamento aceitável para a eliminação de pragas e agentes xilófagos em WPM.

Um novo estudo foi realizado pelos autores para estabelecer um programa de aquecimento em conformidade com a ISPM 15 por meio de MW (HENIN et al., 2014). O estudo foi conduzido visando analisar a temperatura da madeira e mortalidade de insetos. Para isso, foram utilizados paletes de *Populus* e *Pinus* e a temperatura foi medida por meio de uma câmera infravermelha VarioCAM®. Os autores relataram ainda que foi possível ultrapassar a temperatura mínima requisitada pela FAO para ambas as madeiras (63,2°C e 64,8°C, respectivamente), e que, nessas condições, o tratamento garantiu a letalidade dos indivíduos de *H. bajulus*, qualquer que fosse o estágio de desenvolvimento, com probabilidade superior ao nível de eficácia de mortalidade Probit 9. Os autores observaram ainda que a taxa de mortalidade das larvas foi influenciada pelo teor de umidade das tábuas.

Adicionalmente, mais pesquisas tem sido desenvolvidas em busca aceitação de diferentes metodologias para tratamento fitossanitário da madeira, em conformidade com a ISPM 15. A exemplo, cita-se o teste de irradiação ionizante como ferramentas para testar a eficácia na erradicação de pragas (Van Haandel et al., 2017), os autores observaram doses letais equivalentes ou inferiores às utilizadas em estudos anteriores. Eles recomendam a avaliação da relação custo-eficácia da irradiação como tratamento fitossanitário na gama de doses identificadas no estudo, antes da realização de mais testes de eficácia.

A radiação ionizante, é indicada para madeira serrada (com algumas exceções) e toras de madeira de vários gêneros das coníferas. Também é indicada para toras e madeira serrada de outros gêneros (EPPO, 2009; EPPO, 2010; EPPO, 2014; EPPO, 2017a; EPPO, 2017c; EPPO, 2017d; EPPO, 2017e; EPPO, 2018a; EPPO, 2018b; EPPO, 2020a; EPPO, 2020b; EPPO, 2020c).

Os documentos levantados sobre a fumigação como medida fitossanitária para a madeira, de maneira geral também visam aumentar a eficácia do tratamento fitossanitário de WPM com menor dispêndio de tempo. A emissão de brometo de metila na atmosfera tem potencial de destruição da camada de ozônio e o fluoreto de sulfúrio é um gás de efeito estufa reconhecido. Ressalta-se que a fumigação só deve ser realizada por agentes autorizados prestadores de tratamento ou pela organização nacional de proteção fitossanitária (IPPC SECRETARIAT, 2023).

Como visto anteriormente, ainda assim as fumigações reconhecidas pela ISPM 15 são por MB e SF, porém a depender da legislação específica de cada país, a fumigação com fosfina pode ser aceita, como é caso da Dinamarca (SCHEEL, 2009) e Camarões (PAPYRAKIS; TASCIOTTI, 2019), entre outros países. A fosfina foi aprovada pela China em 2001 como tratamento fitossanitário em trânsito para toras exportadas da Nova Zelândia (HALL et al., 2018). A Nova Zelândia conseguiu aceitação da fumigação com fosfina também para exportações de toras para o Japão, Coreia do Sul e Índia (SELF; TURNER, 2009).

Tendo em conta o movimento global para eliminar gradualmente o MB, há um foco em compostos químicos alternativos para o controle de pragas em WPM (RAJENDRAN; KUMAR, 2008). Entre as alternativas potenciais ao MB, estão a fosfina e o fluoreto de sulfúrio, que já são usados em outras *commodities* e são rotulados para uso em produtos de madeira (SEABRIGHT et al., 2020). O *Ethanedinitrile* também tem sido uma alternativa potencial (LEE et al., 2017; NAJAR-RODRIGUEZ et al., 2020).

O *Ethanedinitrile* está sendo utilizada para tratamento de toras na Austrália e seu registro para esse fim está sendo solicitado em outros países, dessa forma, esses compostos alternativos foram testados para erradicação do nematoide do pinheiro, numa série de amostras de madeira infestadas artificialmente com elevado teor de umidade e, em alguns casos, com a camada de casca (SEABRIGHT et al., 2020). Os resultados mostraram que a fosfina e o fluoreto de sulfúrio eliminaram com sucesso os nematoides do pinheiro em peças de madeira de pinheiro, mas nenhum deles foi completamente eficaz em blocos de pinheiro com casca intacta, já o *Ethanedinitrile* foi eficaz em lascas, blocos e toras de pinho em todas as doses testadas: 40–100 mgL⁻¹ por 24 horas a 20 °C.

Há pesquisas que analisaram a interferência da espessura da casca e da temperatura utilizada para a eficiência na penetração de fosfina durante o tratamento fitossanitário de fumigação (HALL et al., 2018), outras sobre argumentação econômica e ambiental para o desenvolvimento de tratamentos fitossanitários alternativos (SELF; TURNER, 2009). Ademais, vários estudos indicam que o SF e a fosfina podem ser usados como alternativas ao MB para o tratamento de WPM, pela concentração média de gás terminal para agentes xilófagos na madeira (RAJENDRAN; KUMAR, 2008).

Todos os documentos da *Eppo Bulletin* referentes aos diferentes gêneros arbóreos, recomendam a fumigação como medida fitossanitária. Os documentos recomendam esse tratamento para plantas, madeira em tora e madeira serrada (com algumas exceções) (EPPO, 2009; EPPO, 2010; EPPO, 2014; EPPO, 2017a; EPPO, 2017c; EPPO, 2017d; EPPO, 2017e; EPPO, 2018a; EPPO, 2018b; EPPO, 2020a; EPPO, 2020b; EPPO, 2020c; EPPO, 2022a; EPPO, 2022b;

EPPO, 2022c). Mais informações sobre os requisitos para o uso de fumigação como medida fitossanitária, podem ser encontradas na norma ISPM 43 (FAO, 2019).

4.2.6. Principais formas de controle e medida de suporte contra a disseminação de agentes xilófagos

As publicações abordaram não apenas as formas de controle e medidas de suporte aceitas e incentivadas pela ISPM 15, mas também inovações que servirão de apoio para evitar e controlar a disseminação de pragas e patógenos, e melhoria de inspeções. Dentre os documentos levantados, as normas e artigos da *EPPO Bulletin* foram os que mais trouxeram informações sobre sugestão de controle ou medida de suporte para madeira e outros produtos de origem vegetal.

As Principais sugestões de controle ou medida de suporte contra a disseminação de patógenos e pragas de madeira, estão dispostas na Tabela 3. Para melhor compreensão, as principais informações separadas em (1) Tratamentos fitossanitários alternativos para WPM; (2) Métodos para transporte e armazenamento de WPM; (3) Observações para inspeção para WPM e seus desafios e (4) Outras orientações acerca da circulação de pragas associadas a WPM.

Tabela 3 - SUGESTÕES DE CONTROLE OU MEDIDA DE SUPORTE CONTRA A DISSEMINAÇÃO DE AGENTES XILÓFAGOS DE MADEIRA MAIS ABORDADAS NOS DOCUMENTOS

Tratamentos fitossanitários alternativos para WPM (1)	Métodos para transporte e armazenamento de WPM (2)	Observações para inspeção de WPM e seus desafios (3)	Outras orientações acerca da circulação de pragas associadas a WPM (4)
Fumigação com Brometano (LANGFERMANN C. et al., 2007) e com Ethanedimítrile (NAJAR-RODRIGUEZ et al., 2015; LEE et al., 2017; HALL et al., 2018; NAJAR-RODRIGUEZ et al., 2020; SEABRIGHT et al., 2020).	Realizar colheita, importação e armazenamento fora do período de maior incidência da praga referente ao de madeira e/ou não transportar por áreas infestadas com as pragas referentes*.	Certificar-se que o WPM foi obtido a partir de madeira sem casca*.	Aumentar os sistemas de captura em torno da interceptação * e realizar controle biológico (CHEN et al., 2018).
Realizar uma combinação entre tratamentos térmicos e uso de biocidas (KITCHENS; DAHLEN; JOHNSON, 2014).	Transportar madeira cuja casca e 2,5 cm de alburno externo foram removidos em instalações autorizadas e/ou realizar a remoção de 3 cm de alburno externo *.	A madeira deve ser originada de local de produção livre de pragas e com uma zona tampão de 200 m (BRAGARD et al., 2023a, 2023b)*.	Realizar metodologias quantitativas para avaliação de risco de pragas (BRAGARD et al., 2023a, 2023b).
Uso de inseticida ecologicamente correto (ISMAYATI et al., 2011).	Realizar transporte em WPM fechado para evitar infestação*.	Todas as instalações que realizam tratamento fitossanitário da madeira para exportação, devem ser certificadas e aprovadas (BRAGARD et al., 2023a, 2023b).	Estudar estratégias para erradicar populações recém-estabelecidas (LAWSON et al., 2018).
Uso de soluções aquosas como tratamento temporário para WPM (WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010).	Realizar quarentena pós-entrada e inserção de outras restrições de movimento da madeira no país importador (BRAGARD et al., 2023a, 2023b).	Atentar-se ao uso correto da marca, bem como do tratamento adequado das peças colocadas posteriormente no WPM (BORIANI et al., 2019).	Atentar ao tipo de WPM, pois alguns podem ter mais facilidade de abrigar patógenos (MEISSNER et al., 2013).
Uso de biocidas em madeira verde ou seca (ARCOS et al., 2015).	Realizar vigilância pós fronteira (BRAGARD et al., 2023a, 2023b).	Realizar a verificação de umidade antes e após o tratamento fitossanitário (KIM; RYU; EOM, 2019).	Reduzir o uso de paletes antigos em circulação (NAVES et al., 2019).
Tratamento térmico por aquecimento a Joule (PAWSON et al., 2019) Avaliação por Probit 9 (HAACK et al., 2011).	Atentar ao padrão de qualidade para WPM armazenados (MEISSNER et al., 2013).	Analisar tempo entre a apreensão ou descarga e a destruição de material contaminado (GREENWOOD et al., 2023).	Realizar campanhas de conscientização e sensibilização, e elaboração de caderno de bordo (SCHEEL, 2009).

Outros tratamentos químicos ou físicos na madeira (Hughes et al., 2022; Bragard et al., 2023a).*

Verificar uso de certificado e passaporte fitossanitário (BRAGARD et al., 2023a, 2023b).

Investimento em Biossegurança na fronteira (LAWSON et al., 2018).

Adotar protocolos de amostragem estatisticamente válidos (randomizados) para a detecção de pragas não indígenas durante inspeções (HUMBLE, 2010).

* A referência pertence a pelo menos três das seguintes citações de boletins técnicos: (EPP0, 2009; EPP0, 2010; EPP0, 2014; EPP0, 2017a; EPP0, 2017c; EPP0, 2017d; EPP0, 2017e; EPP0, 2018a; EPP0, 2018b; EPP0, 2020a; EPP0, 2020b; EPP0, 2020c; EPP0, 2022a; EPP0, 2022b; EPP0, 2022c).

FONTE: A autora (2024).

(1) Tratamentos fitossanitários alternativos para WPM

As normas *Eppo Bulletin* e Bragard et al., (2023a, 2023b) indicam a realização de tratamentos físicos e/ou químicos em remessas ou durante o processamento da madeira outros produtos de origem vegetal, como ramos, folhas, entre outros. Recomendam também o tratamento com temperatura controlada (frio ou quente).

A combinação entre tratamento térmicos e uso de biocidas é recomendado por Kitchens; Dahlen; Johnson, (2014). Os autores relataram que a suscetibilidade da madeira tratada termicamente a organismos, pode ser mitigada combinando o tratamento térmico com biocidas. Eles informam que as formulações comerciais que consistem em Cloreto de Didecil-Dimetilamônio (DDAC) podem ser utilizadas separadamente ou em combinação com Octaborato Dissódico Tetra-hidratado (DOT).

O uso de inseticida ecologicamente correto é um método de preservação de madeira mais barato (ISMAYATI et al., 2011). Os autores explicam que o Organo-Complex, que consiste em cromo de cobre combinado com compostos orgânicos naturais, é uma alternativa de tratamento químico menos prejudicial ao meio ambiente. Eles ressaltam que o resultado do experimento mostrou que os materiais de madeira tratados com a fórmula deram bons resultados, que foram indicados pelo baixo consumo e pela rápida eliminação dos cupins. Além disso a análise de toxicidade da solução de composto orgânico CC foi classificada como não prejudicial.

Pesquisadores verificaram que o tratamento térmico afeta a eluição dos componentes lipídicos no alburno do pinheiro (WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010). Enquanto buscavam alternativas aos métodos de preservação convencionais, diferentes agentes ambientalmente compatíveis (particularmente soluções aquosas contendo carbonato de sódio e potássio) foram encontrados para inibir a germinação de esporos de fungos de mofo e manchas azuis em superfícies de WPM de maneira temporária. Dessa forma os autores relataram que além da eficácia, o uso desses agentes para alcançar a proteção temporária de WPM é economicamente viável e facilmente aplicável na prática industrial.

No entanto, a secagem (ao ar livre ou em estufa convencional) é indispensável para evitar o risco de fungos a longo prazo. Uma combinação de tratamento temporário imediatamente após o corte seguido de um processo de secagem (proteção de longa duração) parece ser o método mais eficaz para proteger o WPM tratado contra o mofo (WELLING; LAMBERTZ, 2008; LAMBERTZ; WELLING, 2010). Um novo sistema de tratamento fitossanitário, que consiste em um projeto de recuperação de calor para gases de exaustão de uma caldeira de destilaria foi testado a partir de modelagem 3D, demonstrando ser uma solução eficiente e econômica para garantir a desinfecção de paletes de madeira de acordo com a norma ISPM 15 (FONG CASAS et al., 2023).

A avaliação da eficácia de produtos de madeira atualmente permitidos pelo Regulamento Europeu de Biocidas para proteção de madeira verde e seca contra *B. xylophilus* foi realizada por (ARCOS et al., 2015). Eles relataram que a maioria dos produtos comerciais de madeira testados, tem efeito sobre *B. xylophilus* em madeira verde e seca (manchada e não manchada).

Uma sugestão de tratamento fitossanitário por meio de aquecimento Joule para toras de madeira, seguindo um modelo eletrotérmico computacional foi proposto por Pawson et al., (2019). O aquecimento Joule de 32 registros de teste (3,3 m de comprimento) demonstrou temperaturas superiores a 60 °C por pelo menos 60 min. Os autores relataram que dez toras infestadas com *H. ligniperda* foram aquecidas por Joule no mesmo perfil, resultando em 100% de mortalidade de adultos e larvas. Dessa forma eles enfatizam que os resultados foram consistentes com os atuais

parâmetros de tratamento da ISPM 15 mostrando ser uma alternativa eficaz e não química à fumigação para controle de pragas quarentenárias.

Houve abordagens sobre o desenvolvimento de pesquisas para outros tratamentos químicos, além da fumigação com brometo de metila, dentre as quais cita-se a fumigação com fluoreto de sulfurila (UZUNOVIC et al., 2017; KENDHL et al., 2020; GREENWOOD et al., 2023), que já é aceito pela ISPM 15, com Brometano (LANGFERMANN C. et al., 2007) e com etanodinitrila (NAJAR-RODRIGUEZ et al., 2015; LEE et al., 2017; HALL et al., 2018; NAJAR-RODRIGUEZ et al., 2020; SEABRIGHT et al., 2020), dentre outros.

A eficácia do Probit 9 foi analisada como um critério de avaliação para novos tratamentos de madeira, porém questiona-se a exigência da eficácia do método para pragas de madeira (insetos, nematoides e fungos) (HAACK et al., 2011). Após uma série de testes experimentais, os autores fizeram uma alerta contra a exigência da eficácia do Probit 9 para aprovação, porque representa um fardo para os desenvolvedores do tratamento, não é biologicamente justificável para a maioria das pragas da madeira e atualmente permite a pseudo-replicação em vez de focar na confiabilidade estatística. Além disso os autores enfocam que exigir tal metodologia para pragas da madeira poderia inibir o desenvolvimento de novos tratamentos, garantindo a dependência contínua de tratamentos menos bem testados, agora aprovados ao abrigo da ISPM 15.

(2) Métodos para transporte e armazenamento de WPM

As normas apresentadas na *Eppo Bulletin* abrangem diversas recomendações para um transporte e armazenamento seguro de madeira e demais produtos de origem vegetal dos gêneros arbóreos relatados. Dentre as recomendações, o armazenamento e transporte de produtos de origem vegetal deve ser em embalagem fechada, para evitar infestações.

As normas enfatizam ainda que o transporte de madeira, deve ser feito apenas com a mesma reduzida em menos de 2,5 cm em uma das dimensões ou até 1,5 cm em duas dimensões. Além disso a remoção de 3 cm de alburno externo deve ser realizada e deve-se transportar madeira cuja casca e 2,5 cm de alburno externo foram removidos em instalações autorizadas. Atualmente, pela ISPM 15, a madeira deve ser transportada sem casca.

É recomendado a realização de quarentena pós-entrada e outras restrições de movimento no país importador e cita-se a necessidade de vigilância pós-entrada de mercadoria. O uso de certificado de passaporte fitossanitário é de suma importância (BRAGARD et al, 2023a, 2023b).

Ainda segundo as normas disponíveis na *Eppo Bulletin*, a colheita, importação e armazenamento de produtos de origem vegetal devem ser feitos fora do período de maior

incidência da praga referente ao gênero de madeira. No caso de madeira, ela deve ser esquadrada para remover totalmente a superfície arredondada natural e o transporte não deve ser realizado por áreas infestadas com as pragas referentes. A madeira deve ser originada de local de produção livre de pragas e com uma zona tampão de 200 m (BRAGARD et al, 2023a).

Ao examinar um subconjunto de caixas de madeira macia armazenadas há mais de cinco anos, quanto a presença de *Bursaphelenchus xylophilus*, Meissner et al., (2013) verificam que elas haviam passado por um rígido padrão de qualidade. De acordo com os autores, a Defesa dos Estados Unidos estabelecem alguns critérios de qualidade, dentre eles cita-se que fendas ou orifícios e a quantidade de cascas nas caixas devem ser mínimas, e não deve haver sinal de deterioração. Além disso só aceitam a fabricação de caixas de madeira de alguns gêneros, exigem um teor de umidade entre 12 e 18% e para evitar infestação por fungos e cupins, tratam as caixas com alguns conservantes de madeira, como 8-quinolinolato de cobre, naftenato de zinco ou naftenato de cobre. Nenhuma *B. xylophilus* ou pragas de insetos foram encontradas nas caixas, e os autores comprovam que nem todos os tipos de WPM apresentam alto risco fitossanitário.

(3) Observações para inspeção de WPM e seus desafios

As normas apresentadas na *Eppo Bulletin* abrangem diversas recomendações que podem se enquadrar nas formas de inspecionar cargas de mercadoria com WPM. Dentre as recomendações, uma das mais importantes é certificar-se que o WPM foi obtido a partir de madeira sem casca. Outra recomendação é a realização de testes em laboratórios "ou" testes experimentais, para exame mais minucioso do material. Ainda recomendam observar se as instalações são certificadas e aprovadas (BRAGARD, et al., 2023a, 2023b).

É necessário atentar-se ao uso correto da marca, bem como do tratamento adequado das peças colocadas posteriormente no WPM (BORIANI et al., 2019). O tratamento deve ser obrigatório nos WPM (HUMBLE, 2010) e deve haver verificação de umidade antes e após o tratamento (KIM; RYU E EOM, 2019), pois segundo os autores, após o HT o teor de umidade diminui.

Outras medidas que podem ser ressaltadas são o aumento dos sistemas de captura em torno da interceptação, dentro da distância de dispersão de voo conhecida da praga, em uma tentativa de reduzir ainda mais as populações da praga interceptada (LAWSON et al., 2018). Os autores aconselham ainda que a vigilância pós-fronteira é também uma medida fundamental que pode ajudar a prevenir o estabelecimento de novas pragas.

O tempo entre a apreensão ou descarga e a destruição de material contaminado deve ser observado (GREENWOOD et al., 2023), pois pode ser suficiente para que algumas pragas escapem. É importante aumentar os sistemas de captura em torno da interceptação dentro a distância de dispersão de voo conhecida da praga em uma tentativa de reduzir ainda mais as populações da praga interceptada, além de estudar estratégias para erradicar populações recém-estabelecidas; investimento em biossegurança em fronteira, devido ao grande aumento no volume de importações e movimento humano (LAWSON, et al., 2018).

Finalmente, Papyrakis e Tasciotti, (2019) observaram algumas práticas ilícitas que representam sérios desafios para o sucesso da implementação da ISPM 15. De acordo com os autores, intervenções são necessárias, incluindo: reuniões de coordenações institucionalizadas das principais partes interessadas, manutenção rigorosa de registros de todos os WPM tratados, sanções por descumprimento, esclarecimentos sobre os tipos aprovados de componentes de tratamento e marcas, simplificações de processos burocráticos para licenças ISPM 15 e inspeções mais completas do WPM nos pontos de entrada. Eles sugerem pesquisas futuras no campo de impacto para avaliar como a adoção dessas recomendações de políticas específicas pode aumentar a conformidade com a ISPM 15, com uma análise de custo benefício.

(4) Outras orientações acerca da circulação de pragas associadas a WPM

De maneira geral, simplesmente impedir o estabelecimento de espécies exóticas invasoras em novas áreas é considerado a forma mais eficaz em termos de custos de mitigar os seus riscos ambientais e econômicos (ORMSBY, 2022). Existem outras recomendações que merecem atenção, dentre elas, aumentar os sistemas de captura em torno da interceptação; realizar controle biológico (CHEN et al., 2018) e a realização de metodologias quantitativas para avaliação de risco de pragas (BRAGARD et al., 2023a, 2023b) e estudar estratégias para erradicar populações recém-estabelecidas (LAWSON et al., 2018) são práticas que reduzem a introdução de pragas florestais.

A reparação de paletes com peças contaminadas ocasiona novas infestações, podendo ser uma das causas do grande número de interceptação em muitos países (KRISHNANKUTTY et al., 2020). É necessário a redução do uso de paletes antigos em circulação, pois eles são menos resistentes a incidência de nematoides e fungos (NAVES et al., 2019).

Além disso é urgente considerar uma alteração à ISPM 15 para diferenciar níveis de risco entre as várias categorias de WPM, a fim de minimizar os custos e os impactos ambientais associados aos tratamentos atualmente prescritos na ISPM 15 (MEISSNER et al., 2013). Para isso, os autores indicam avaliar o teor de umidade entre os diferentes tipos de WPM, o armazenamento

interno ininterrupto de WPM por períodos superiores a 5 anos e os efeitos de preservação da madeira sobre pragas também podem ser considerados. Os autores enfatizam que mais pesquisas serão bem vindas para determinar quais características ou combinações de características do WPM justificariam designações de baixo risco. Essas sugestões servem também para aprimorar inspeções por parte das organizações de proteção fitossanitária de cada país e para as empresas que possuem WPM armazenados e querem se aumentar a sua vida útil.

Em 2008, alguns exemplares de *Anoplophora glabripennis* (Besouro Longhorn Asiático) foram encontrados pela primeira vez na Dinamarca (SCHEEL, 2009). A solução adotada para controlar o risco de infestação foi a destruição imediata de todas as caixas de madeira ou a fumigação das mesmas com fosfina, além da realização de campanhas de conscientização e sensibilização junto com imprensa para os funcionários e a população de Holstebro. A criação de um diário de bordo foi de suma importância para manter todos os dados sobre *Anoplophora glabripennis* em uma versão atualizada, acessível a todo o pessoal envolvido.

Em geral, mesmo diante da relevância da temática abordada, observou-se poucas publicações indexadas. Como mencionou Minini (2024), a indexação de publicações em diversas plataformas, como a *Scopus*, é baseada em diversos critérios, assim, os dados que não atendem a todos os parâmetros exigidos, ficam de fora durante a pesquisa sistemática. O número de publicações foi ainda mais reduzido no que diz respeito ao desenvolvimento de protocolos para tratamento fitossanitário da madeira, envolvendo modelagem, especialmente aqueles com o objetivo de predição da temperatura interna da madeira com base na temperatura do ambiente.

4.2.7 Modelagens para tratamento fitossanitário na madeira

Apesar da ISPM 15 ter sido implementada há décadas, observa-se que há poucas pesquisas publicadas em revistas internacionalmente reconhecidas. Ao realizar uma busca científica, observa-se carência de publicações com objetivo de predição da temperatura interna da madeira a partir de modelagem. Publicações sobre a predição da temperatura interna da madeira com uso de modelos para tratamento fitossanitário, também são escassas.

No Brasil somente trabalhos de teses, dissertações, monografias e trabalhos de congressos, abordam modelagem para explicar a transferência de calor na madeira, porém artigos que abordem tratamento fitossanitário da madeira por HT, com base em modelos matemáticos, não foram publicados. Observou-se ainda que sobre esse tema, publicações de autores brasileiros em revistas científicas indexadas em plataformas de busca reconhecidas, como a *Scopus*, não foram encontradas.

Dentre os trabalhos indexados na *Scopus* sobre estimativa de temperatura interna da madeira, um dos que possuem maior relevância foi realizado há 20 anos, logo após a implementação da ISPM 15 (ALÉON, 2004). O estudo teve como intuito estimar a temperatura do centro da madeira a partir da temperatura do ambiente, visou também garantir o tratamento fitossanitário necessário para eliminar pragas de importância quarentenária, como o nematoide *Bursaphelenchus xylophilus*. O autor recomendou o tratamento térmico de madeira serrada e de paletes, com base nas observações experimentais de secagem convencional, mas não houve desenvolvimento de modelos matemáticos.

A estimativa dos tempos de aquecimento sob várias condições de tratamento térmico foi desenvolvido por Wang; Bergman e Mace, (2010) por meio de experimentos e desenvolvimento de modelos empíricos. Esse estudo visou atender as regulamentações dos EUA, que exigiam uma temperatura central de 71°C por 75 minutos, ou seja, superior ao especificado pela ISPM 15. Os autores avaliaram a influência do termômetro de bulbo seco (TBS), termômetro de bulbo úmido (TBU), umidade inicial da madeira e a circulação de ar nos fornos e observaram que a temperatura do ambiente e a umidade do meio de aquecimento afetam significativamente aquecimento da madeira.

O desenvolvimento de protótipos e modelos numéricos foi realizado para secadores solares desumidificadores de madeira e câmaras de tratamento térmico fitossanitário por Zriba et al., (2022). Os resultados numéricos permitiram simular o comportamento tanto das peças de madeira, como do sistema completo de secagem solar. Os autores ainda estão desenvolvendo um protocolo experimental para analisar o desempenho da secagem em diversas condições, mas já conseguiram alcançar o tratamento fitossanitário da madeira de acordo com o especificado na ISPM 15. Para isso eles utilizaram um sistema solar composto por coletores solares, tanque de armazenamento, trocador de calor e bombas, que reciclam e ajustam o ar de saída para condições ideais (temperatura do ambiente interno a 70°C).

Pelo levantamento bibliométrico, poucos trabalhos utilizaram modelo estatístico com uso de análise de regressão como forma de atender a ISPM 15. Um deles utilizou um modelo matemático para avaliar a influência do TBS e da espessura de peças de madeira de *Pinus radiata* na eficiência do tratamento fitossanitário por HT foi realizado por Ananías et al., (2013). Esse estudo estabeleceu que tempos de secagem superiores a 1,2 vezes o valor previsto pelo modelo garantiam a eficácia do tratamento fitossanitário em quase 99% dos casos. A equação de regressão linear múltipla desenvolvida pelos autores ajudou diversas serrarias a cumprir as exigências da ISPM 15.

Outro estudo investigou os efeitos do TBS e da espessura das peças no tempo necessário para aquecer o centro de peças de madeira de várias espécies, usando equações lineares (Kim, Shin, Kim, 2016). Os autores seguiram as recomendações de temperatura e tempo da ISPM 15. Eles

observaram diferenças estatisticamente significativas nos tempos de aquecimento, a depender da espécie de madeira. Constatou-se que o tempo necessário para a temperatura alcançar o centro das peças diminuiu à medida que a temperatura de aquecimento aumentava. Além disso, os tempos de aquecimento aumentaram linearmente com o aumento da espessura das peças.

Dessa forma observa-se carência de trabalhos que envolvam modelagem estatística para tratamento fitossanitário da madeira por HT. Um dos desafios para desenvolver modelos que auxiliem nos tratamentos fitossanitários da madeira é justamente o material de pesquisa: a madeira. Ela é um material orgânico, anisotrópico, heterogêneo, higroscópico e de composição química e anatômica complexa. Por essa razão, prever o seu comportamento é desafiador. Porém a depender da qualidade do modelo estatístico ajustado, este pode ser uma ótima ferramenta na tomada de decisões em diversas áreas, como por exemplo, no comércio madeireiro. Acredita-se que a utilização de modelagem como ferramenta para predição da temperatura interna da madeira pode ser uma grande contribuição para o setor.

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa, ao delinear a evolução das publicações científicas concernentes ao tratamento fitossanitário conforme a Norma Internacional de Medidas Fitossanitárias número 15 (ISPM 15), evidencia a trajetória dos estudos ao longo de quase duas décadas. Este incremento se manifesta, particularmente, a partir de 2010, concomitantemente à adoção generalizada da norma por diversos países, refletindo uma preocupação crescente com a segurança fitossanitária global.

As palavras-chave predominantes nos artigos analisados, tais como "*phytosanitary treatment*", "*heat treatment*", "*ISPM 15*", "*invasive species*" e "*wood packaging material*", norteiam os principais eixos temáticos das pesquisas na área, demonstrando a importância desses termos no contexto das ciências agrárias. Além disso, a análise bibliométrica evidencia que o *Wood Packaging Material* (WPM) é o material mais discutido nas publicações, seguido por toras e por madeira serrada, sendo que o gênero *Pinus*, especialmente a espécie *Pinus radiata* D. Don, destaca-se como foco das pesquisas, enquanto espécies do gênero *Eucalyptus* são notavelmente lacunas sobre tratamento fitossanitário da madeira, embora comercialmente o gênero já seja utilizado.

Outro fator importante diz respeito aos agentes xilófagos abordados, pois a discussão nos artigos sobre *Anaplophora glabripennis*, *Bursaphelenchus xylophilus* e *Phytophthora ramorum*, por exemplo, demonstra que esses ainda são os agentes de importância quarentenária mais preocupantes para o comércio internacional de madeira. Dessa forma o presente levantamento demonstra as sugestões de dezenas de trabalhos para a melhoria do tratamento fitossanitário da madeira, como a necessidade de desenvolver e implementar tratamentos combinados, trazer soluções ecológicas e novos métodos, como fumigações com substâncias menos prejudiciais ao meio ambiente.

Finalmente, observou-se que a utilização da modelagem estatística como ferramenta para predição de dados em tratamentos térmicos por estufa de secagem convencional, estava presente em menos de 5% das publicações. Isso demonstra uma lacuna que requer atenção nas próximas pesquisas do setor industrial madeireiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMCI. Estudo setorial 2022. 2022. Disponível em: <https://abimci.com.br/publicacoes/estudo-setorial/>

ALÉON, D. Phytosanitary heat treatment of wood. **EPPO Bulletin**, v. 34, n. 1, p. 133–138, 2004.

ALLEN, E. A.; HUMBLE, L. M. Nonindigenous species introductions: a threat to Canada's forests and forest economy¹. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 24, n. 2, p. 103–110, jun. 2002.

ANANÍAS, R. A. et al., Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. **Wood and Fiber Science**, v. 45, n. 1, p. 98–104, 2013.

ANANÍAS, R. A.; SEPÚLVEDA-VILLARROEL, V.; SALVO-SEPÚLVEDA, L. Tiempo de esterilización mediante vapor de la madera aserrada de Pino radiata. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 23, fev. 2021.

ANIL, S. K. et al., Life cycle assessment comparison of wooden and plastic pallets in the grocery industry. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 4, p. 871–886, 2020.

ANIL, S. K.; RAY, C. D.; KREMER, G. E. O. **Pallet life cycle comparison using LCA and multiobjective dynamic programming**. . Em: 31ST ANNUAL NATIONAL CONFERENCE OF THE AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING MANAGEMENT 2010, ASEM 2010. 2010.

ARCOS, S. C. et al., Efficacy of commercial wood preservatives against *Bursaphelenchus xylophilus*, a quarantine organism in Europe. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 5, p. 643–649, 2015.

BARBOSA, F. R.; PARANHOS, B. A. J. **Quarentenárias - Portal Embrapa**. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/producao/doencas-e-pragas/pragas/quarentenarias>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

BEDELEAN, B. Application of artificial neural networks and Monte Carlo method for predicting the reliability of RF phytosanitary treatment of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 4, p. 1113–1120, 1 jul. 2018.

BORIANI, M. et al., Detection and molecular analysis of three exotic auger beetles of the genus *Sinoxylon* Duftschmid, 1825 (Coleoptera: Bostrichidae) intercepted in Italy. **Polish Journal of Entomology**, v. 88, n. 1, p. 1–13, 2019.

BRAGARD, C. et al., Pest categorisation of *Urocerus albicornis*. **EFSA Journal**, v. 21, n. 3, 2023a.

BRAGARD, C. et al., Pest categorisation of *Urocerus japonicus*. **EFSA Journal**, v. 21, n. 1, 2023b.

BURNIP, G. M.; VOICE, D.; BROCKERHOFF, E. G. Interceptions and incursions of exotic *Sirex* species and other siricids (Hymenoptera: Siricidae). **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 40, p. 133–140, 2010.

CHEN, Z. et al., Steam and Vacuum Treatment of Large Timber in Solid Wood Skids. **BioResources**, v. 13, n. 4, p. 9132–9142, 2018.

CHEN, Z.; WHITE, M. S.; MACK, R. Evaluating vacuum and steam process on hardwood veneer logs for export. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 6, p. 911–918, 2017.

DUBEY, M. K. et al., Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 4, p. 491–500, 2016.

EMBRAPA. **Perguntas e respostas - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-pragas-quarentenarias/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2018a). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/2 (3) *Coniferae*. EPPO Bulletin, 48(3), 463–494.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2009). Commodity-specific phytosanitary measures. PM *Coniferae*. EPPO Bulletin, 39(3), 420–449.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2014). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/2 (2) *Coniferae*. EPPO Bulletin, 44(3), 403–440.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2017a). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/4 (1) *Castanea*. EPPO Bulletin, 47(3), 445–451.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2017b). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/5 (1) *Quercus*. EPPO Bulletin, 47(3), 452–460.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2017c). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/6 (1) *Betula*. EPPO Bulletin, 47(3), 461–469.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2017d). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/8 (1) *Salix*. EPPO Bulletin, 47(3), 479–486.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2017e). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/7 (1) *Populus*. EPPO Bulletin, 47(3), 470–478.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2018b). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/9 (1) *Fagus*. EPPO Bulletin, 48(3), 495–500.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2020a). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/10 (1) *Ulmus*. EPPO Bulletin, 50(1), 88–98.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2020b). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/11 (1) *Fraxinus*. EPPO Bulletin, 50(1), 99–106.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2020c). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/12 (1) *Juglans*. EPPO Bulletin, 50(1), 107–119.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2022a). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/13 (1) *Acer*. EPPO Bulletin, 52(1), 100–110.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2022b). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/14 (1) *Platanus*. EPPO Bulletin, 52(1), 111–120.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2022c). Commodity-specific phytosanitary measures. PM 8/15 (1) *Tilia*. EPPO Bulletin, 52(1), 121–129.

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2010a). Commodity-specific phytosanitary measures. PM *Quercus and castanea*. EPPO Bulletin, 40(3), 376–386.

ERCHIQUI, F. et al., 3D finite element enthalpy method for analysis of phytosanitary treatment of wood by microwave. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 3, p. 577–591, 2020.

EYRE, D. et al., Variation in Inspection Efficacy by Member States of Wood Packaging Material Entering the European Union. **Journal of Economic Entomology**, v. 111, n. 2, p. 707–715, 2018.

FAO. **Espécies invasoras: impactos nas florestas e na silvicultura**. 2008. Disponível em: <<https://www.fao.org/forestry/aliens/52520/en/>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

FAO. **ISPM 43. Requirements for the use of fumigation as a phytosanitary measure: Adopted 2019**. Rome, Italy: FAO, 2019.

FAZCOMEX. **Exportações de Madeira em Bruto**. 2024. Disponível em: <<https://www.fazcomex.com.br/comex/exportacoes-de-madeira-em-bruto/>>. Acesso em: 8 fev. 2024.

FLEMING, M. R. et al., Microwave irradiation of wood packing material to destroy the Asian longhorned beetle. **Forest Products Journal**, v. 53, n. 1, p. 46–52, jan. 2003.

FONG CASAS, F. et al., 3D finite heat transfer method to optimize a hot air convective system for phytosanitary treatment of wood pallets. **Energy, Ecology and Environment**, v. 8, n. 3, p. 273–287, 2023.

FONSECA, L. et al., **Laboratory tests on the elimination of the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) in *Pinus pinaster* wood by high pressure**. Eur. J. Wood Prod. 2014.

GASPARYAN, A. Y.; KITAS, G. D. Editorial Strategy to Get a Scholarly Journal Indexed by *Scopus*. **Mediterranean Journal of Rheumatology**, v. 31, n. 4, p. 1, 2021.

GREENWOOD, L. F. et al., Exploring pest mitigation research and management associated with the global wood packaging supply chain: What and where are the weak links? **Biological Invasions**, v. 25, n. 8, p. 2395–2421, 2023.

GÓES, M. B. Environmental aspects and impacts of the wood pallet reuse process in furniture manufacturing. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, 6(2), 130-140. 2019.

GU, J. et al., Records of *Bursaphelenchus* spp. intercepted in imported packaging wood at Ningbo, China. **Forest Pathology**, v. 36, n. 5, p. 323–333, 2006.

HAACK, R. A. Exotic bark- and wood-boring Coleoptera in the United States: recent establishments and interceptions. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, n. 2, p. 269–288, 1 fev. 2006.

HAACK, R. A. et al., Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: a worldwide perspective. **Annual Review of Entomology**, v. 55, p. 521–546, 2010.

HAACK, R. A. et al., Seeking alternatives to probit 9 when developing treatments for wood packaging materials under ISPM No. 15. **EPPO Bulletin**, v. 41, n. 1, p. 39–45, 2011.

HAACK, R. A. et al., Effectiveness of the international phytosanitary standard ISPM No. 15 on reducing wood borer infestation rates in wood packaging material entering the United States. **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, 2014.

HAACK, R. A. et al., Wood borer detection rates on wood packaging materials entering the United States during different phases of ISPM 15 implementation and regulatory changes. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, 2022a.

HAACK, R. A.; PETRICE, T. R. Bark- and Wood-Borer Colonization of Logs and Lumber After Heat Treatment to ISPM 15 Specifications: The Role of Residual Bark. **Journal of Economic Entomology**, v. 102, n. 3, p. 1075–1084, 1 jun. 2009.

HAACK, R. A.; PETRICE, T. R. Mortality of Bark- and Wood-boring Beetles (Coleoptera: Buprestidae, Cerambycidae, and Curculionidae) in Naturally Infested Heat-treated Ash, Birch, Oak, and Pine Bolts. **Journal of Economic Entomology**, v. 115, n. 6, p. 1964–1975, 2022b.

HALL, M. et al., Quantification of hydrogen cyanide as a potential decomposition product of ethanedinitrile during pine log fumigation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 48, n. 1, 2018.

HASSLER, C. C. et al., An Assessment of the Impacts of a Domestic Phytosanitary Treatment Regulation for Wood Packaging Material Manufacturers. **Forest products journal** Vol. 60, No. 4. 2010.

HENIN, J.-M. et al., Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15. **Forest Products Journal**, v. 58, n. 12, p. 75–81, 2008.

HENIN, J.-M. et al., Phytosanitary treatment of European pallets by microwave: Developing a program to ensure compliance with ISPM 15 and monitoring its efficacy on the house

longhorn beetle (*Hylotrupes bajulus* L.). **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 5, p. 623–633, 2014.

HUGHES, K. A. et al., Importation of psychrotolerant fungi to Antarctica associated with wooden cargo packaging. **Antarctic Science**, v. 30, n. 5, p. 298–305, out. 2018.

HUGHES, M. A. et al., Evaluation of Kiln Heating as a Phytosanitary Treatment for Ceratocystis-Infested 'O hi'a (*Metrosideros polymorpha*) Wood. **Forest Products Journal**, v. 72, n. 3, p. 207–215, 2022.

HUMBLE, L. Pest risk analysis and invasion pathways - insects and wood packing revisited: What have we learned? **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 40, n. SUPPL., p. 57–72, 2010.

ILINE, I. I. et al., Towards a test to verify that wood has been heat-treated to the ISPM 15 standard. **New Zealand Plant Protection**, v. 67, p. 86–95, 8 jan. 2014.

IPPC SECRETARIAT. **Guide to regulating wood packaging materials: Understanding phytosanitary requirements for the movement of wood packaging materials in international trade**. Rome, Italy: FAO, 2023.

ISMAYATI, M. et al., The efficacy of organo-complex-based wood preservative formula against dry-wood termite *Cryptotermes cynocephalus* light. **Insects**, v. 2, n. 4, p. 491–498, 2011.

ISPM 15. Regulation of wood packaging material in international trade. **ISPM 15 Regulation of wood packaging material in international trade**, 2019.

JANOWIAK, J. J. et al., Improved Radio-Frequency Heating through Application of Wool Insulation during Phytosanitary Treatment of Wood Packaging Material of Low Moisture Content. **Forest Products Journal**, v. 72, n. 2, p. 98–104, 2022.

JUZWIK, J. et al., Vacuum Steam Treatment Effectiveness for Eradication of the Thousand Cankers Disease Vector and Pathogen in Logs From Diseased Walnut Trees. **Journal of Economic Entomology**, v. 114, n. 1, p. 100–111, 2021.

JUZWIK, J. et al., Vacuum Steam Treatment of *Metrosideros polymorpha* Logs for Eradication of *Ceratocystis huliohia* and *C. lukuohia*. **Plant Disease**, v. 106, n. 4, p. 1114–1121, 2022.

KEIRAN, M.; ALLEN, E. Keeping forest pests from moving around the world. **Unasylva**, v. 55, n. 217, p. 29–30, 2004.

KENDHL, S. et al., Efficacy of methyl bromide and alternative fumigants against pinewood nematode in pine wood samples. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 127, n. 3, p. 393–400, 2020.

KIM, M.-J.; SHIN, H.-K.; KIM, G.-H. Estimation of Heat Sterilization Time of Chinese Laminae Species Used in The Production of Glue-laminated Board. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 760–766, 2016.

KIM, K.-J.; RYU, J.-A.; EOM, T.-J. Characteristics of the heat-treated wood packaging materials according to international standards for phytosanitary measures and verifiability of heat treatment. **Wood Research**, v. 64, n. 4, p. 647–658, 2019.

KITCHENS, S. C.; DAHLEN, J.; JOHNSON, T. E. Reducing susceptibility of heat-treated sweetgum and pine to mold colonization by incorporating traditional biocides. **Wood and Fiber Science**, v. 46, n. 4, p. 539–546, 2014.

KRISHNANKUTTY, S. et al., Identification of tree genera used in the construction of solid wood-packaging materials that arrived at U.S. Ports infested with live wood-boring insects. **Journal of Economic Entomology**, v. 113, n. 3, p. 1183–1194, 2020.

LAMBERTZ, G.; WELLING, J. Changes in extractives of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) after ISPM 15 heat treatment and their effect on fungal discolouration. **Wood Material Science and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 67–72, 2010.

LANGFERMANN C. et al., **Study on the potential impact of bromomethane on medicinal products following simulated container fumigation | Signed in**. 2007.

LAWSON, S. A. et al., Risk of exotic pests to the Australian forest industry. **Australian Forestry**, v. 81, n. 1, p. 3–13, 2018.

LEE, B.-H. et al., Preliminary trials of the ethanedinitrile fumigation of logs for eradication of *Bursaphelenchus xylophilus* and its vector insect *Monochamus alternatus*. **Pest Management Science**, v. 73, n. 7, p. 1446–1452, jul. 2017.

LEE, S. H. et al., Engineering Wood Products from *Eucalyptus* spp.: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, p. 8000780, 2 fev. 2022.

LEWIS, V. R.; HAVERTY, M. I. Evaluation of Six Techniques for Control of the Western Drywood Termite (Isoptera: Kalotermitidae) in Structures. **Journal of Economic Entomology**, v. 89, n. 4, p. 922–934, 1 ago. 1996.

MACQUARRIE, C. J. K. et al., Assessment of the Systems Approach for the Phytosanitary Treatment of Wood Infested With Wood-Boring Insects. **Journal of Economic Entomology**, v. 113, n. 2, p. 679–694, dez. 2019.

MAPA. **Instrução Normativa Mapa nº 32/2015**. Disponível em: <<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/aduana-e-comercio-exterior/manuais/despacho-de-importacao/legislacao/outras-normas/instrucao-normativa-mapa-no-32-2015>>. Acesso em: 5 fev. 2024.

MAPA. **Ação do Vigiagro impediu ingresso de praga de alto risco**. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/acao-do-vigiagro-impediu-ingresso-de-praga-de-alto-risco>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

MAPA. **Lista PQA_10.5.2022 — Ministério da Agricultura e Pecuária**. 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sanidade-animal-e-vegetal/sanidade-vegetal/PRAGASQUARENTENRIASAUSENTES_SITEMAPA_2022.5.10.pdf/view>. Acesso em: 9 fev. 2024.

Martins, M. M. V.; Nonnenberg, M. J. B. O comércio de madeiras e as restrições impostas pelos mercados Europeus e Norte-Americanos: Qual a sua efetividade? IPEA. 2022.

MCKENNA, D. D. et al., Genome of the Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*), a globally significant invasive species, reveals key functional and evolutionary innovations at the beetle–plant interface. **Genome Biology**, v. 17, n. 1, p. 1–18, dez. 2016.

MD KHUDZARI, J. et al., Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using *Scopus* database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51–60, 15 ago. 2018.

MEISSNER, H. et al., Pest survey of softwood boxes, with special emphasis on pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Parasitaphelenchidae). **EPP0 Bulletin**, v. 44, n. 1, p. 37–43, 2013.

MEURISSE, N.; PAWSON, S. M.; SOMCHIT, C. Bark beetles on pine logs: forecasting winter colonisation dynamics based on trap catches and temperature records. **Journal of Pest Science**, v. 94, n. 4, p. 1357–1373, 1 set. 2021.

MININI, D. et al., A review on the quality of wood from agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, 19 jan. 2024.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Produção científica: Brasil sobe no ranking**. 2024. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/conselho-nacional-de-educacao/180-estudantes-108009469/pos-graduacao-500454045/8576-sp-342271386>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

MORAIS, G. A. T. DE; PALHA, R. P. Gestão da operação e manutenção integrada ao building information modeling: análise cientométrica. **Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção**, v. 12, p. 1–8, 18 out. 2021.

NAJAR-RODRIGUEZ, A. J. et al., Developing new fumigation schedules for the phytosanitary treatment of New Zealand export logs: Comparative toxicity of two fumigants to the burnt pine longhorn beetle, *Arhopalus fesus*. **New Zealand Plant Protection**, v. 68, p. 19–25, 2015.

NAJAR-RODRIGUEZ, A. J. et al., Laboratory toxicity and large-scale commercial validation of the efficacy of ethanedinitrile, a potential alternative fumigant to methyl bromide, to disinfest New Zealand *Pinus radiata* export logs. **Journal of Stored Products Research**, v. 88, p. 101671, 1 set. 2020.

NASCIMENTO, R. et al., Potencial de otimização da operação de inspeção federal agropecuária em embalagens e suportes de madeira no Aeroporto Internacional de Goiânia. **Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)**, v. 14, p. 3257–3280, 13 mar. 2023.

NAVES, P. et al., Pinewood nematode presence and survival in commercial pallets of different ages. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 2, p. 301–309, 2019.

ORMSBY, M. Elucidating the efficacy of phytosanitary measures for invasive alien species moving in wood packaging material. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 129, 29 jan. 2022.

PAPYRAKIS, E.; TASCIOTTI, L. A Policy Study on the Implementation Challenges of Phytosanitary Standards: The Case of ISPM 15 in Botswana, Cameroon, Kenya, and Mozambique. **Journal of Environment and Development**, v. 28, n. 2, p. 142–172, 2019.

PATRO, P.; MISRA, D. P. REGISTERING AND REPORTING SYSTEMATIC REVIEWS. **Central Asian Journal of Medical Hypotheses and Ethics**, v. 1, n. 2, p. 122–126, 2020.

PAWSON, S. M. et al., Quantifying the thermal tolerance of wood borers and bark beetles for the development of Joule heating as a novel phytosanitary treatment of pine logs. **Journal of Pest Science**, v. 92, n. 1, p. 157–171, 2019.

PAYETTE, M. et al., Efficacy of microwave irradiation for phytosanitation of wood packing materials. **Industrial Crops and Products**, v. 69, p. 187–196, 2015.

RAJENDRAN, S.; KUMAR, V. L. Sulfuryl fluoride and phosphine as methyl bromide alternatives for fumigation of solid wood packaging. **International Pest Control**. 2008.

RAMSFIELD, T. D. et al., Temperature and time combinations required to cause mortality of a range of fungi colonizing wood. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 32, n. 3, p. 368–375, 2010.

SCHEEL, C. Anoplophora glabripennis first finding in wood packaging material in Denmark1. **EPPO Bulletin**, v. 39, n. 2, p. 153–154, ago. 2009.

SEABRIGHT, K. et al., Efficacy of methyl bromide and alternative fumigants against pinewood nematode in pine wood samples. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 127, n. 3, p. 393–400, 2020.

SELF, N. M.; TURNER, J. A. Market access for New Zealand forest products: An economic and environmental case for development of alternative phytosanitary treatments. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 39, n. 1, p. 15–27, 2009.

SILVA, T. C. et al., Non-Timber Forest Products in Brazil: A Bibliometric and a State of the Art Review. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7151, jan. 2020.

SOBEK, S. et al., High temperature tolerance and thermal plasticity in emerald ash borer *Agrilus planipennis*. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 13, n. 3, p. 333–340, 2011.

SOUSA, E. et al., Management and control of the Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Portugal. Em: **Nematodes: Morphology, Functions and Management Strategies**. p.157–178. 2011.

STRUTT, A. et al., Evaluating the impacts of an international phytosanitary standard for wood packaging material: Global and United States trade implications. **Forest Policy and Economics**, v. 27, p. 54–64, 2013.

THE BUSINESS RESEARCH COMPANY. Global wood packaging Market Size, Forecast To 2023. Disponível em: < <https://www.thebusinessresearchcompany.com/market-insights/wood-packaging-market-2024>>. Acesso em: 10 set. 2024

UCELLA-FILHO, J. G. M. et al., Tannin-rich bark extract of plants as a source of antimicrobial bioactive compounds: A bibliometric analysis. **South African Journal of Botany**, v. 150, p. 1038–1050, 1 nov. 2022.

USDA. **APHIS do USDA | Material de embalagem de madeira**. 2023. Disponível em: <<https://www.aphis.usda.gov/aphis/ourfocus/planthealth/import-information/wood-packaging-material>>. Acesso em: 5 fev. 2024.

UZUNOVIC, A. et al., Lethal temperature for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using radio frequency (RF) energy. **Journal of Wood Science**, v. 59, n. 2, p. 160–170, 2013.

UZUNOVIC, A. et al., Rapid Screening of Sulfuryl Fluoride as a Potential Phytosanitary Treatment for a Broad Selection of Fungi Relevant to Forestry. **Forest Products Journal**, v. 67, n. 1–2, p. 4–12, abr. 2017.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping**. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-009-0146-3>>. Acesso em: 30 jan. 2024.

VAN HAANDEL, A. et al., Tolerance of *Hylurgus ligniperda* (F.) (Coleoptera: Scolytinae) and *Arhopalus fesus* (Mulsant) (Coleoptera: Cerambycidae) to ionising radiation: a comparison with existing generic radiation phytosanitary treatments. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 47, n. 1, 2017.

VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/>>. Acesso em: 11 dez. 2023.

WANG, X.; BERGMAN, R. D.; MACE, T. Heat sterilization of ash (*Fraxinus* spp.) firewood: Heat-treating options, temperature monitoring and thermal verification. **Wood Material Science and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 104–109, 2010.

WELLING, J.; LAMBERTZ, G. Environmentally friendly temporary anti-mould treatment of packaging material before drying. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 25–33, 2008.

YANG, A. et al., Oak Wilt Fungus (*Bretziella fagacearum*) Survival in Logs Following Fumigation with Ethanedinitrile. **Forest Products Journal**, v. 73, n. 3, p. 260–265, 2023.

ZAHID, M. I.; GRGURINOVIC, C. A.; WALSH, D. J. Quarantine risks associated with solid wood packaging materials receiving ISPM 15 treatments. **Australian Forestry**, v. 71, n. 4, p. 287–293, jan. 2008.

ZRIBA, A. et al., Design, optimization and implementation of a solar cell for wood phytosanitary treatment. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 4, p. 9272–9292, 21 dez. 2022.

CAPÍTULO 3: PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP. DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO FITOSSANITÁRIO

1. INTRODUÇÃO

Visto os problemas relacionados à exigência de sensores de temperatura na madeira, a Instrução Normativa 32/2015 publicada pelo MAPA já direcionava a possibilidade de desenvolvimento de um novo protocolo no qual o monitoramento do tratamento fitossanitário da madeira pode ocorrer com base apenas na temperatura do ambiente interno da câmara, ou seja, com dispensa dos sensores na madeira.

Para isso, a IN 32/2015 (MAPA, 2015) esclarece que para esse protocolo ser avaliado e aceito pelo MAPA, há a necessidade de um experimento-teste, no qual a temperatura do centro da madeira é medida e correlacionada com a temperatura do ar no interior da câmara. A espécie, a espessura e a umidade das peças de madeira também devem ser consideradas.

No final do ano de 2022, o MAPA revogou essa IN por meio da nova portaria nº 514 (MAPA, 2022a). Dentre outras mudanças, há a permissão da dispensa do uso de sensores de temperatura na madeira durante o tratamento fitossanitário por ar quente forçado, porém até o momento desta pesquisa, apenas para madeiras de coníferas. Essa nova prerrogativa só é permitida com adequação comprovada das recomendações exigidas pela portaria, na qual incluem: espessura da madeira, temperatura no interior da câmara de tratamento e tempos mínimos exigidos. As madeiras de folhosas ainda não foram implementadas na portaria pois possuem uma estrutura celular mais complexa e necessitam de estudos mais aprofundados.

Apesar disso, a nova portaria manteve a possibilidade de desenvolvimento do protocolo antes divulgado na IN 32/2015, visando disponibilizar outros meios para dispensa de sensores de temperatura da madeira durante o HT por ar quente forçado. Porém, quase uma década após a publicação da Instrução Normativa 32/2015 (MAPA, 2015), ainda não foram publicadas pesquisas que atendam as especificações solicitadas.

Visto a necessidade de comprovação científica para eliminação de sensores de temperatura da madeira durante o HT, e pela carência mundial de publicações relevantes sobre essa temática, experimentos laboratoriais são necessários. Além disso, gráficos sobre a curva de aquecimento da madeira e modelagem matemática são essenciais para atender ao protocolo de tratamento a ser avaliado pelo MAPA, justificando assim, o desenvolvimento desta pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um protocolo de monitoramento da temperatura do ambiente que estime a temperatura interna da madeira de *Pinus* sp. visando atender os requisitos fitossanitários exigidos pelo MAPA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver programas de secagem para madeira de *Pinus* sp. em diferentes dimensões e teores de umidades iniciais;
- Avaliar a qualidade da madeira de *Pinus* sp. após a secagem em estufa convencional;
- Correlacionar a temperatura da madeira de *Pinus* sp. com as variáveis do ambiente de secagem (tempo, temperatura e umidade relativa do ar);
- Correlacionar a temperatura da madeira de *Pinus* sp. com as variáveis da madeira (umidade de equilíbrio, teor de umidade, largura e espessura);
- Analisar o tempo de aquecimento interno da madeira, em função das variáveis temperatura, umidade, largura e espessura.
- Preconizar modelos estatísticos que estimem aquecimento interno e tempo de aquecimento da madeira de *Pinus* sp. durante tratamento fitossanitário térmico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO

Foram utilizadas madeiras de *Pinus* sp. recém desdobradas (com alto teor de um, fornecidas por uma empresa situada na cidade de Rio Negrinho – Santa Catarina, com idade de corte de 15 anos. A empresa forneceu 84 peças de madeira serrada nas dimensões de 22 x 105 x 720 mm e 80 peças nas dimensões de 40 x 105 x 720 mm, totalizando 164 peças, conforme Figura 8.

Figura 8 - PEÇAS DE MADEIRA SERRADA DE *Pinus* SP. FORNECIDAS POR UMA EMPRESA SITUADA NA CIDADE RIO NEGRINHO - SANTA CATARINA

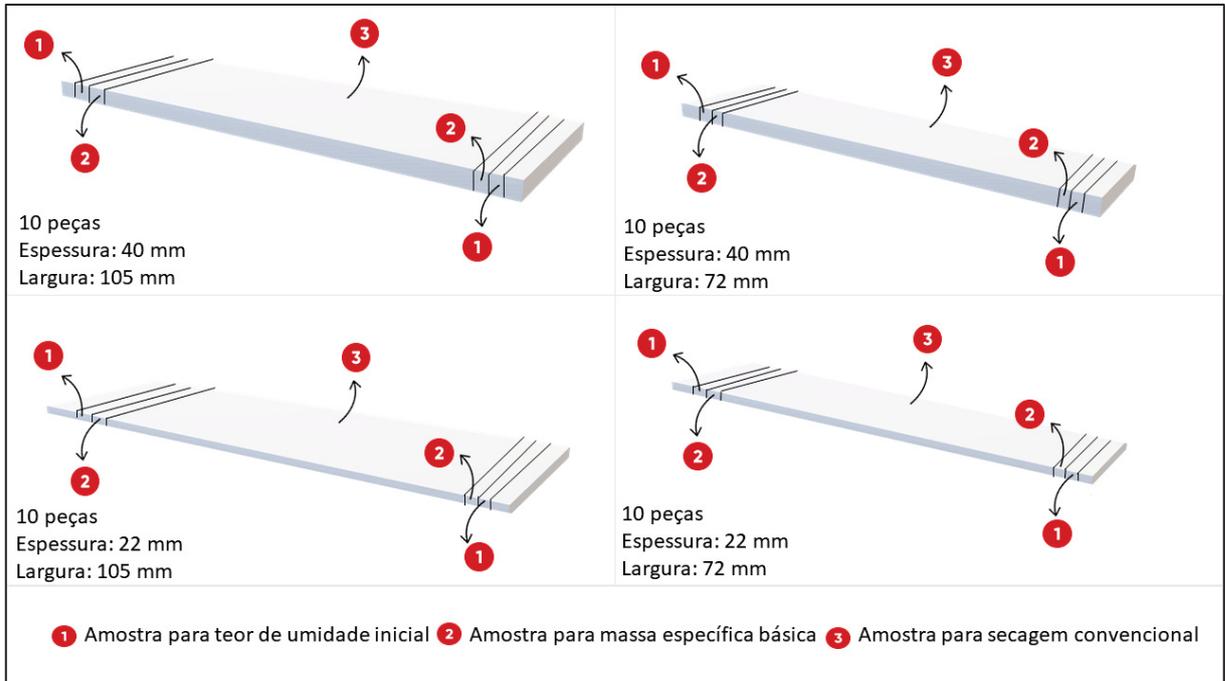


Fonte: A autora (2024).

Algumas peças foram redimensionadas para confecção de corpos-de-prova destinados à determinação do teor de umidade, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e massa específica básica de acordo com a NBR 11941-02 (ABNT, 2003), totalizando oitenta peças para cada análise. Para os experimentos de secagem da madeira, foram redimensionadas quarenta peças, mantendo variações nas larguras e espessuras. Dez peças possuíam dimensões de 22 x 72 x 600 mm; dez possuíam 40 x 72 x 600 mm; dez possuíam dimensões de 22 x 105 x 600 mm

e dez possuíam dimensões de 40 x 105 x 600 mm, para espessura, largura e comprimento, respectivamente, conforme esquema representado na Figura 9.

Figura 9 - QUANTIDADE E DIMENSIONAMENTO DAS AMOSTRAS PARA AS ANÁLISES EXPERIMENTAIS*



*As bordas das peças foram descartadas

Fonte: A autora (2024).

Com vista ao posterior acompanhamento do perfil da temperatura interna da madeira, após o dimensionamento das amostras de secagem, elas foram perfuradas ao centro. A profundidade alcançada foi de 36 mm para as peças com largura de 72 mm, e 52,5 mm para as peças com largura de 105 mm. Esse procedimento foi realizado com o auxílio de uma broca de aço de 3 mm de espessura, acoplada a uma furadeira de bancada profissional, situada no Laboratório de Usinagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná – UFPR (Figura 10).

Figura 10 - PERFURAÇÃO DE PEÇAS PARA ACOMPANHAMENTO DO PERFIL DA TEMPERATURA INTERNA DE MADEIRA DE *Pinus sp.*



Fonte: A autora (2024).

3.2 ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE SECAGEM DA MADEIRA

Após divisão das peças como mencionado na Figura 11, as amostras de secagem foram separadas para dar início aos experimentos de secagem da madeira em estufa convencional. Além das diferentes espessuras e larguras, as amostras foram separadas também conforme os diferentes teores de umidade inicial das peças (acima de 80% e abaixo de 30%), para isso as peças utilizadas para os tratamentos com madeira verde, após atingirem aproximadamente 25% de umidade final, foram reutilizadas para os tratamentos com madeira seca, até

aproximadamente 10% de umidade final, por essa razão foram necessárias apenas quarenta peças e não oitenta peças. As temperaturas finais escolhidas para o processo de secagem foram 75°C e 90°C. A espécie, potencial do ventilador e localização das peças na estufa foram iguais para todos os tratamentos. Todo o esquema usado para todos os tratamentos pode ser melhor visualizado na Figura 11.

Figura 11 - VARIÁVEIS INICIAIS CONSIDERADAS PARA ELABORAÇÃO DOS PROGRAMAS DE SECAGEM DA MADEIRA

Espécie	Espessura (mm)	Largura (mm)	Teor de umidade (%)	Temperatura (°C)	Potência do ventilador (%)	Localização das peças na pilha
<i>Pinus spp</i>	40	105	Verde	75	90 %	Final da pilha (próximo à porta)
				90		
			Seca	75		
				90		
		72	Verde	75		
				90		
			Seca	75		
				90		
	22	105	Verde	75		
				90		
			Seca	75		
				90		
		72	Verde	75		
				90		
			Seca	75		
				90		

Fonte: A autora (2024).

O intuito de conduzir várias secagens (16 tratamentos) com peças em diferentes condições, foi verificar a sua influência na correlação entre a temperatura do ambiente de secagem com a temperatura no centro das peças de madeira. Os programas de secagem foram elaborados de forma a variar o mínimo possível as condições de secagem durante a realização dos dezesseis tratamentos. A primeira secagem foi com madeira verde, denominado

“tratamento 1”, a segunda secagem com madeira seca, denominado “tratamento 2”, e assim sucessivamente de forma que todos os tratamentos ímpares foram realizados com madeira verde e todos os tratamentos pares foram realizados com madeira seca. Logo, foram oito tratamentos com madeira verde e oito tratamentos com madeira seca, totalizando dezesseis tratamentos.

O programa de secagem tem grande importância na qualidade do produto final, visa melhor controle e redução de defeitos intrínsecos à madeira, melhorar a estabilidade dimensional, reduzir a massa, além de reduzir a proliferação de agentes xilófagos (OLIVEIRA; RECH, 2021). Visto que a madeira de pinus é amplamente utilizada no mercado, na indústria de móveis, de ESM, esquadrias, entre outros, que requerem maior ou menor valor agregado, foram elaborados quatro programas de secagem da madeira que serviram de base para a condução dos experimentos.

As faixas de temperaturas iniciais e finais e o potencial de secagem para o programa foram escolhidos em função da análise da madeira (Tabela 4). Os parâmetros foram: espécie utilizada, destinação final do produto e grau de dificuldade de secagem. Como os programas visam atender o mercado de maneira geral, foram elaborados com duas temperaturas finais, como relatado anteriormente, 75°C e 90° e em diferentes umidades das peças: maior que 80% e menor que 30% de umidade. Atribuiu-se tempo somente na fase de aquecimento, acondicionamento e resfriamento, pois para as demais fases da secagem a variável é a própria umidade das peças. Tabelas psicométricas (Ponce e Watai, 1985) foram utilizadas para auxiliar na escolha da depressão de bulbo úmido.

Tabela 4 – PROGRAMAS DE SECAGEM DESENVOLVIDOS PARA TODOS OS TRATAMENTOS DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Programas de secagem para madeira de <i>Pinus</i> sp.						
90 °C - Madeira Verde						
Fase	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UEM (%)	PS	Tempo (h)
Aquecimento	90	90	100	*	1	4h
Verde até 45 %	90	79	64	8	6	*
45 até 40 %	90	77	59	7	6	*
40 até 35%	90	74	51	6	6	*
35 até 30%	90	71	45	5	6	*
30 até 25%	90	66	35	4	6	*
Uniformização e Acondicionamento	87	80	72	12	1	4h
Resfriamento	60	53	47	8	1	2h
75 °C - Madeira Verde						
Aquecimento	75	75	100	*	1	4h

Verde até 45 %	75	63	57	8	6	*
45 até 40 %	75	61	52	7	6	*
40 até 35%	75	58	44	6	6	*
35 até 30%	75	55	37	5	6	*
30 até 25%	75	51	29	4	6	*
Uniformização e Acondicionamento	72	64	67	9	1	4h
Resfriamento	45	39	68	11	1	2h
90 °C - Madeira Seca						
Fase	TBS (°C)	TBU (°C)	UR (%)	UEM (%)	PS	Tempo (h)
Aquecimento	90	90	100	*	1	4h
Verde até 25%	90	66	35	4	6	*
25 até 20%	90	61	27	3	6	*
20 até 15%	90	53	19	3	6	*
15 até 10%	90	45	11	2	6	*
Uniformização e Acondicionamento	87	80	74	10	1	4h
Resfriamento	60	53	67	10	1	2h
75 °C - Madeira Seca						
Aquecimento	75	75	100	*	1	4h
Verde até 25%	75	51	29,9	4	6	
25 até 20%	75	48	23,9	4	6	*
20 até 15%	75	41	15,5	3	6	*
15 até 10%	75	32	6,5	2	6	*
Uniformização e Acondicionamento	72	64	67,3	9	1	4h
Resfriamento	45	37	58,4	10	1	2h

Legenda: TBS=Termômetro de Bulbo Seco, TBU=Termômetro de Bulbo Umido, UR=Umidade Relativa, UEM=Umidade de Equilíbrio da Madeira, e PS=Potencial de Secagem.

Fonte: A autora (2024).

3.3 GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE SECAGEM DA MADEIRA

Para o gerenciamento do processo de secagem da madeira, foi utilizada uma estufa de secagem convencional (semi-industrial) da marca Kiefer. A estufa possui dimensões de 0,80 x 0,80 x 4,00 m (largura x altura x comprimento), totalizando uma capacidade de aproximadamente 1 m³ de madeira serrada intercalada por sarrafos separadores de até 25 mm de espessura.

O aquecimento da estufa é realizado por um sistema elétrico composto por três resistências blindadas (trocadores de calor) e possui circulação forçada de ar com um ventilador acoplado à sua parte frontal. A umidade relativa na câmara é controlada por um sistema de vaporização, gerado por uma caldeira elétrica com capacidade de produção de vapor de até 40

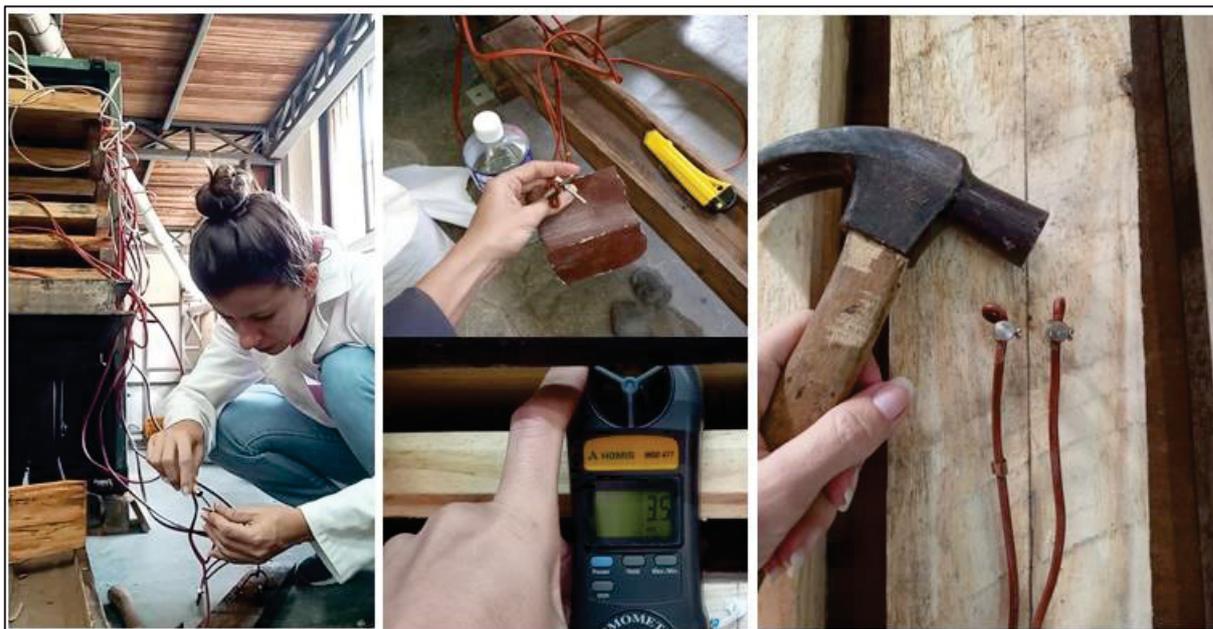
kg.h⁻¹, juntamente com um conjunto de *dumpers* localizados nas extremidades da câmara (um de entrada e outro de saída de ar).

Para monitorar o processo de secagem, a estufa está equipada com um sistema de gerenciamento automatizado que permite o monitoramento, controle e modificação das variáveis do processo de secagem. Esse sistema funciona por meio do controlador *New Easy*, onde é possível inserir o programa de secagem tanto pelo próprio controlador lógico programável (CLP, acoplado à estufa) quanto pelo *software SV- 520 Power View*. Neste trabalho optou-se pelo uso do *software* pela praticidade em acompanhar a secagem e extrair os dados a ela referentes. A estufa e os *softwares* utilizados passaram por revisões para garantir a confiabilidade da coleta de dados.

A análise de cada uma das dezesseis secagens ocorreu por meio de cinco amostras de madeira (situadas próximo à porta da estufa) por tratamento. Foram distribuídos estrategicamente em cada amostra, aos pares, pinos sensores. Eles funcionam por meio do princípio resistivo e disponibilizam o teor de umidade presente no centro das peças durante todo o processo de secagem. Os pinos sensores passaram por manutenção antes da utilização (Figura 12).

A carga foi complementada com madeira seca nas mesmas espessuras e organizadas por sarrafos separadores de 25 mm de espessura, com o intuito de proporcionar a circulação correta do ar dentro da estufa. A velocidade do ar foi verificada em pontos específicos da carga por meio de um anemômetro digital modelo 477 da marca HOMIS. Em todas as secagens a velocidade foi de aproximadamente 3 m/s, uma vez que a potência do ventilador se manteve constante em 90% (Figura 12).

Figura 12 - REVISÃO DOS PINOS SENSORES, INSERÇÃO NAS PEÇAS E VERIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR ENTRE AS PEÇAS DE MADEIRA NA ESTUFA



Fonte: A autora (2024).

3.4 Acompanhamento das temperaturas no centro das peças

As peças destinadas à secagem foram impermeabilizadas com silicone para não ocorrer o risco de interferências externas (Figura 13). Após impermeabilização, aguardou-se aproximadamente 24 h, que representa o tempo de cura do silicone, para das início de cada secagem.

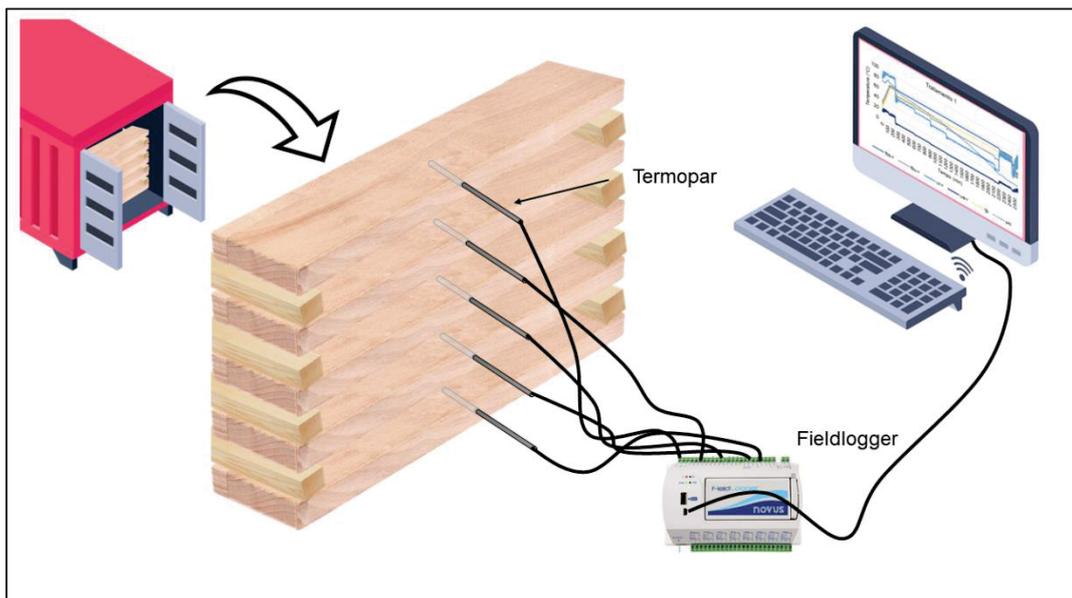
As medições da temperatura interna na madeira foram coletadas por meio de um registrador de dados, o *Fieldlogger*, da marca *Novus*, modelo 8812120000, o qual fez a medição da temperatura a cada minuto de secagem por meio de termopares de alta precisão do tipo “PT100” (Figura 14). Esse é um dos sensores de temperatura mais precisos e não só proporciona uma precisão de qualidade, como também fornece excelentes estabilidade e repetibilidade. Todos os sensores, devidamente calibrados, foram inseridos nas perfurações realizadas nas cinco peças de madeira e ali permaneceram por todo o período de secagem em cada um dos tratamentos.

Figura 13 - IMPERMEABILIZAÇÃO DOS TOPOS DE PEÇAS DE *Pinus* SP. PARA SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL



Fonte: A autora (2024)

Figura 14 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ACOMPANHAMENTO DAS TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP. EM TODOS OS TRATAMENTOS



FONTE: A autora (2024).

3.5 AVALIAÇÃO DOS DEFEITOS DE SECAGEM

A avaliação dos defeitos foi feita com base no tempo de secagem e qualidade da madeira ao término de cada ciclo, mediante a análise dos defeitos encontrados nas amostras, com auxílio de paquímetro e régua. Os defeitos foram classificados tomando-se como base as normas de classificação de madeira serrada de coníferas NBR 12297 (1991) e NBR 11700 (1991). Os parâmetros que foram utilizados para avaliação da qualidade da secagem da madeira conforme a norma foram empenamentos (encurvamento, arqueamento e encanoamento) e rachaduras de topo.

O encurvamento, arqueamento e encanoamento foram quantificados percentualmente em relação ao comprimento das peças, por meio das Equação 1, 2 e 3, respectivamente (Tabela 5). As rachaduras de topo foram medidas percentualmente considerando a soma de seus comprimentos em relação ao topo das peças (Equação 4, Tabela 5).

Além dessas, também foram avaliadas visualmente as rachaduras de superfície presentes nas tábuas antes e após a secagem em estufa convencional, quanto à presença ou ausência. Foi quantificado o número de peças em que tal defeito foi verificado, e os resultados foram apresentados na forma de percentagem do número de peças que apresentaram o defeito em relação ao total, conforme mencionado por Zen (2016).

Tabela 5 - EQUAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SECAGEM

Equação	Número da equação
$\text{Encurvamento (\%)} = (x / L1) \times 100$	(1)
$\text{Arqueamento (\%)} = (y / L1) \times 100$	(2)
$\text{Encanoamento (\%)} = \left(\frac{e - ea}{e} \right) \times 100$	(3)
$\text{Rachaduras de topo (\%)} = ((L2 + L3) / L1) \times 100$	(4)

Em que: x = maior flecha, em mm; L1 = comprimento real da peça, em mm; y = maior flecha, em mm; ea = espessura aplainada, em mm; e = espessura nominal, em mm; L2 + L3 = comprimento das rachaduras.

Fonte: Adaptado de NBR 12297 (1991) e NBR 11700 (1991).

3.6 TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA *Pinus* SP.

Existem algumas equações disponíveis para cálculo da taxa de secagem da madeira, como as sugeridas por Terazawa (1965) e aprimorada por Brandão (1985), Ciniglio (1998), e Maria, et al., (2022). Porém, essas equações baseiam-se na remoção de umidade por intervalo de tempo para pequenas amostras de madeira, o que não é o caso da presente pesquisa.

Diante disso, o cálculo da taxa de secagem foi realizado conforme Zen et al., (2019). A equação utilizada está apresentada na equação 5.

$$Tx_{sec} = \frac{(TU_{inicial} - TU_{final})}{t} \quad (5)$$

Em que: Tx = taxa de secagem (U%.h⁻¹); Tu inicial = teor de umidade inicial (%); Tu final = teor de umidade final (%); t = tempo (dias).

3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foi realizada a análise descritiva a partir de ANOVA e teste de *Tukey* entre os dados de cada tratamento, bem como a análise de correlação de Pearson a 95% de confiança entre todas as variáveis analisadas. Posteriormente, a construção do modelo estatístico ocorreu por meio de análises experimentais e técnica de regressão linear múltipla.

O experimento para a predição da variável “temperatura interna da madeira”, apresentou a seguinte estrutura: dezesseis tratamentos e cinco repetições para cada tratamento, conforme apresentado na Figura 11. Para o modelo, em cada tratamento e repetição (peça de madeira analisada) foram registrados durante cada tratamento: temperatura interna da madeira (Ti) como variável dependente, e tempo, TBS, TBU, UR, UEM, umidade da madeira, espessura, largura e comprimento da madeira como variáveis independentes, ou seja, os coeficientes necessários para o modelo genérico apresentado na Equação 6.

$$Ti \text{ (}^\circ\text{C)} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \dots\beta_nx_n + \epsilon \quad (6)$$

Visto a quantidade considerável de variáveis, foi realizada uma análise de regressão por *stepwise*, pois permite selecionar as variáveis independentes discriminadas a fim de melhor explicar o comportamento da variável dependente (ALVES; LOTUFO; LOPES, 2013). A partir do *stepwise*, todas as variáveis (tempo, TBS, TBU, UR, UEM, umidade da madeira, espessura,

largura e comprimento da madeira) foram selecionadas para o modelo. Porém, embora a análise de regressão por *stepwise* tenha indicado que todas eram variáveis de interesse, alguns erros ocorreram durante o ajuste, o que impossibilitou o desenvolvimento do modelo.

Uma nova análise foi realizada para verificar quais variáveis tinham mais correlação com a transferência de calor e surgimento de defeitos na madeira ao longo do tempo de secagem. As variáveis ambientais escolhidas foram: temperatura (TBS) e tempo, e as variáveis da madeira escolhidas foram: teor de umidade, espessura, largura e comprimento. Observou-se que os erros durante o ajuste do modelo continuaram a ocorrer, pois não foram obtidos por meio da análise de regressão por *stepwise* os valores de coeficientes para algumas das classes de largura e comprimento. Possivelmente, isso ocorreu porque algumas variáveis independentes mostraram uma alta correlação entre si, ou seja, multicolinearidade. Então essas foram removidas e foi possível a realização do ajuste.

A análise dos valores estimados em relação aos valores observados da temperatura interna da madeira, foi realizada a partir da divisão dos dados experimentais, em que 70% foram utilizados para desenvolver o modelo, e 30% para validação, ou seja, para verificar sua eficiência na previsão dos dados, conforme recomendado na literatura (JORDAN, 2017; MARTINS et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2019; ESCOVEDO, 2021; UFF, 2024).

Desta forma, após a obtenção do modelo, sua acuracidade foi testada a partir das seguintes estatísticas já consolidadas cientificamente: erro absoluto médio – MAE (7), média do erro percentual – MPE (8), raiz relativa do erro quadrático médio - RMSE (9) e gráfico de dispersão dos valores residuais. As equações de validação estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – EQUAÇÕES PARA ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Estatística	Equação	Número da equação
MAE (°C)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y - \hat{y} $	(7)
MPE (%)	$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right \right)}{n} \cdot 100$	(8)
RMSE (%)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$	(9)

Em que: MAE = mean absolute error (erro absoluto médio); MPE = Mean percentagem error (média do erro percentual); RMSE = Root mean square of error (Raiz quadrada do erro quadrático médio).

Devido a estrutura dos dados possuírem medidas repetidas de uma mesma peça igualmente espaçadas no tempo, foi utilizado uma estrutura autorregressiva de 1º ordem - (AR(1)) para minimizar problemas associados à autocorrelação entre as observações. Para verificar o comportamento da autocorrelação do modelo com e sem a utilização do AR(1), utilizou-se da análise gráfica função de autocorrelação - ACF e função de autocorrelação parcial - partial ACF. O lag é comumente utilizado em análises observações igualmente espaçadas no tempo, importante para esta análise, já que os dados foram coletados a cada minuto por amostra (repetição). Para isso, o lag foi aplicado em uma função de autocorrelação sem correção e com correção.

Foram realizadas análises gráficas para examinar o padrão residual e a concordância entre os valores observados e valores previstos. Todas as análises estatísticas e plotagens gráficas, foram realizadas por meio dos softwares *Microsoft Excel* (Version 2104), *Sisvar* (Version 5.6) e o *R studio* (Version 23.06.2).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Os resultados desta pesquisa englobam diversas propriedades da madeira, incluindo Teor de Umidade, Massa Específica Básica e Massa Específica Aparente (saturada e anidra). A Tabela 7 detalha os valores médios, coeficientes de variação e erros padrão para cada uma dessas variáveis em relação aos diferentes tratamentos analisados.

Tabela 7 – MÉDIAS, COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E ERRO PADRÃO PARA AS VARIÁVEIS* DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Classe I – madeira verde (médias por tratamento)				
Tratamento	Massa inicial	TU (%)	MEB (g.cm ⁻³)	MEapv (g.cm ⁻³)
1	1537,45	161,942	0,336	0,879
3	2570,9	151,238	0,409	1,029
5	2457,32	153,396	0,389	0,986
7	1672,79	177,509	0,354	0,983
9	1308,26	172,600	0,356	0,971
11	784,09	153,147	0,354	0,897
13	1309,39	165,299	0,358	0,951
15	808,00	133,388	0,385	0,899
Média geral	1556,02	161,014	0,367	0,949
CV (%)	43,00	17,81	11,60	3,53
Erro padrão	236,56	12,82	0,01	0,01
Classe II – Madeira seca (Médias por tratamento)				
Tratamento	Massa inicial	TU (%)	MEB g.cm ⁻³	MEaps g.cm ⁻³
2	701,99	19,602	0,336	0,365
4	1239,06	21,086	0,409	0,462
6	1121,71	15,669	0,389	0,437
8	775,80	28,702	0,354	0,402
10	589,54	22,842	0,356	0,387
12	374,57	20,932	0,354	0,376
14	609,34	23,460	0,358	0,401
16	427,97	23,618	0,385	0,425
Média geral	729,99	22,680	0,367	0,408
CV	42,29	60,52	11,60	12,06
Erro padrão	109,16	6,13	0,01	0,02

Em que: TU (%): Teor de umidade; MEB: Massa específica básica; MEapv: Massa específica aparente verde; MEaps: Massa específica aparente seca.

Fonte: A autora (2024).

Ao realizar a análise laboratorial para determinar os teores de umidade das madeiras verdes, observou-se uma média aproximada de 161%. Em contrapartida, a madeira seca apresentou, em média, cerca de 23% de umidade.

Os resultados desta pesquisa revelaram uma baixa massa específica básica da madeira, de $0,367 \text{ g.cm}^{-3}$ e uma massa específica verde de $0,949 \text{ g.cm}^{-3}$. Esses valores são baixos, mas próximos ao encontrado em estudos anteriores. Em particular, o resultado da massa específica básica é ligeiramente inferior ao obtido por Bonazza et al., (2022), os quais em seu estudo sobre madeira de *Pinus taeda* L. com 21 anos de idade, reportaram uma média de $0,388 \text{ g.cm}^{-3}$ para massa específica básica e $1,002 \text{ g.cm}^{-3}$ para massa específica verde. Em estudos mais antigos, como o realizado por Higa, Kageyama e Ferreira, (1973) que investigaram a massa específica básica de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, uma média de $0,366 \text{ g.cm}^{-3}$ foi encontrada, assemelhando-se aos valores encontrados na presente pesquisa.

Os valores inferiores de massa específica observados neste estudo podem ser atribuídos às variações entre as tábuas e comprovados pelo coeficiente de variação, o qual foi de 11,6% para massa específica básica e de 3,53% para massa específica aparente verde. Observou-se que muitas tábuas provinham de pranchas centrais, as quais foram identificadas pela presença de medula.

Embora não foi realizada análise, isso pode ter refletido em uma menor massa específica em comparação com as peças costaneiras, ou seja, oriundas de pranchas retiradas em proximidade com a casca, pois de acordo com a literatura essa variação na massa específica básica ao longo do raio da tora é uma característica conhecida em estudos de madeira, observando-se aumento da densidade do centro para a periferia (Tomazello Filho, 1985; Moura e Santiago, 1991).

4.2 PROGRAMA DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Foram elaborados dois programas de secagem para cada classe de teor de umidade da madeira de *Pinus* sp. que foram separadas em verdes e secas (Tabela 4). Os programas foram elaborados com base na perda de umidade das peças. Todos os programas de secagem tiveram duração de quatro horas na fase de aquecimento, pois essa fase visa o aquecimento de todo sistema, desde as paredes da estufa até a própria madeira. Além disso essa fase visa diminuir a variação da taxa de secagem inicial entre as tábuas, o que minimiza o gradiente de umidade e, portanto, as tensões de secagem (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975; SIAU, 1984; SIMPSON, 1991; PERRÉ, 2007; BATISTA et al., 2017).

A evaporação da água superficial ocorre pelo gradiente de umidade no sentido da espessura da peça, ou seja, pela movimentação da água do interior até a sua superfície (KEINE, 1997). Portanto a escolha o tempo de aquecimento neste trabalho foi de no mínimo uma hora a cada centímetro de espessura da madeira, visando qualidade do produto final.

Como na fase de aquecimento a umidade dentro da estufa é muito superior à umidade da madeira, impossibilitando-a de perder umidade, o potencial de secagem foi mantido em 1. Já fase de secagem propriamente dita, o potencial de secagem para todos os programas foi elevado para 6, uma vez que quanto menor o potencial de secagem, mais lenta será a secagem (MARIA et al., 2022) e o objetivo era o inverso.

Potenciais de secagem elevados só podem ser utilizados em madeira com alto grau de facilidade de secagem, como as do gênero *Pinus* (OLIVEIRA; RECH, 2021), que foi a espécie utilizada neste trabalho. Caso contrário irá contribuir para o surgimento de diversos problemas de secagem da madeira (SIAU, 1984; SIMPSON, 1991; PERRÉ, 2007).

Ainda nessa fase de secagem a passagem das etapas (subfases) foram comandadas pela umidade das peças e não pelo tempo, como ocorreu no aquecimento. Em todos os programas as etapas prosseguiram a cada redução média de 5% de umidade das peças.

A fase de uniformização e acondicionamento para todos os tratamentos foi determinada para ocorrer quando a média da umidade detectada nos pinos sensores atingisse a umidade desejada para os tratamentos (quando as madeiras verdes atingissem média em torno de 30 a 25% e as madeiras secas atingissem em torno de 15 a 10% de umidade). O tempo foi de 4h para todos os programas visando redução de tensões de secagem ou gradientes de umidade. Na fase de resfriamento o potencial de secagem escolhido foi 1 e o tempo foi de 2h para todos os tratamentos.

4.3 TEMPO DE AQUECIMENTO

O tempo mínimo necessário para tratamento fitossanitário conforme NIMF 15 em todos os tratamentos analisados está apresentado na Tabela 8. Para tal levantamento considerou-se três temperaturas iniciais para a madeira, sendo elas 37°C, 25°C e 18°C, para ter uma melhor representação das temperaturas do país. Observa-se que o menor tempo de aquecimento interno da madeira ocorreu no tratamento 8.

Tabela 8 - TEMPO MÍNIMO NECESSÁRIO PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO CONFORME NIMF 15 EM TODOS OS TRATAMENTOS ANALISADOS

tratamento	Identificação	classe de umidade	Temperatura inicial da madeira de 37°C		Temperatura inicial da madeira de 25°C		Temperatura inicial da madeira de 18°C	
			tempo até atingir 56°C (min)	HT conforme NIMF 15 (min)	tempo até atingir 56°C (min)	HT conforme NIMF 15 (min)	tempo até atingir 56°C (min)	HT conforme NIMF 15 (min)
1	40 x 72 (75°C)	verde	60c	90c	98c	128c	120c	150c
3	40 x 105 (75°C)	verde	55d	85d	90d	120d	110d	140d
5	40 x 105 (90°C)	verde	41e	71e	66e	96e	81e	111e
7	40 x 72 (90°C)	verde	43e	73e	70e	100e	85e	115e
9	22 x 105 (75°C)	verde	54d	84d	89d	119d	109d	139d
11	22 x 72 (75°C)	verde	53d	83d	87d	117d	107d	137d
13	22 x 105 (90°C)	verde	44e	74e	72e	102e	88e	118e
15	22 x 72 (90°C)	verde	42e	72e	68e	98e	84e	114e
	Média		49	79	80	110	98	128
2	40 x 72 (75°C)	seca	80a	110a	131a	161a	160a	190a
4	40 x 105 (75°C)	seca	65b	95b	106b	136b	130b	160b
6	40 x 105 (90°C)	seca	44e	74e	72e	102e	88e	118e
8	40 x 72 (90°C)	seca	36f	66f	59f	89f	72f	102f
10	22 x 105 (75°C)	seca	64bc	94bc	104cb	134cb	128bc	158bc
12	22 x 72 (75°C)	seca	68b	98b	111b	141b	136b	166b
14	22 x 105 (90°C)	seca	43e	73e	71e	101e	87e	117e
16	22 x 72 (90°C)	seca	43e	73e	70e	100e	85e	115e
	Média		55	85	90	120	111	141
	Média geral		52,2	82,2	85,1	115,1	104,4	134,4
	CV (%)		3,57	2,27	3,58	2,64	3,57	2,77
	Erro padrão		0,83	0,83	1,36	1,36	1,66	1,66

As identificações seguem a ordem número do tratamento, espessura e largura das peças e temperatura do tratamento. Ex.: 34 – 40 x 105 (75°C) significa tratamentos 3 (madeira verde) e 4 (madeira seca), que são os tratamentos que possuem dimensões de 40 mm espessura e 105 mm de largura e temperatura de 75°C. Médias seguidas de pelo menos uma letra em comum não difere entre si pelo teste de *Tukey*, ao nível de significância de 5%.

FONTE: A autora (2024).

Em média para todos os tratamentos com madeira verde, considerando uma temperatura inicial das peças de 25°C, o tempo para atingir 56°C foi de aproximadamente 80 minutos e para todos os tratamentos com madeira seca, o tempo para atingir 56°C foi de aproximadamente 90 minutos. Considerando-se os 30 minutos com a temperatura mínima de 56°C exigida pela NIMF 15, o tempo de tratamento fitossanitário da madeira ocorreu em aproximadamente 110 e 120 minutos, respectivamente. Estatisticamente, o que mais influenciou para o menor tempo de

aquecimento interno das peças de madeira, foi a temperatura mais elevada de aquecimento do ambiente de secagem, TBS final de 90°C.

Pesquisadores coreanos realizaram um estudo para entender o impacto da temperatura e da espessura no tempo de aquecimento interno da madeira de *Pinus* sp. até atingir 56°C (KIM; SHIN; KIM, 2016). Eles relataram que o tempo de aquecimento interno da madeira diminuiu à medida que a temperatura de aquecimento aumentou e que os tempos de aquecimento aumentaram linearmente com o aumento da espessura das peças. Em outro estudo sobre a transferência de calor na madeira de *Pinus* sp. realizado por França et al., (2012), também foi constatado que o tempo de aquecimento aumenta com o aumento da espessura das tábuas, do teor de umidade e da densidade básica da madeira.

Neste trabalho isso não ocorreu em aproximadamente 12% dos tratamentos analisados. Essa pequena variação pode ser explicada pela maior área superficial em relação ao volume das peças de menor espessura, uma vez que o calor aplicado pela estufa na superfície externa dessas peças pode se dissipar mais rapidamente antes de alcançar o seu centro.

Ressalta-se que a temperatura inicial da madeira tem forte influência no tempo de aquecimento interno da madeira. Como observado na Tabela 8, os tratamentos com maior temperatura inicial da madeira (37°C) foram mais rápidos, isso explica a variação no tempo de tratamento térmico fitossanitário em diferentes locais do Brasil. Estudos que indiquem sobre tempo de aclimação da madeira antes do tratamento térmico fitossanitário serão importantes para agilizar e tornar ainda mais metódico o processo de tratamento fitossanitário da madeira.

4.4 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem para cada tratamento com a madeira de *Pinus* sp. foi realizado e separado em classes de umidades. O resultado está disponível na Tabela 9.

Tabela 9 - TAXA DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

tratamento	Identificação	Taxa de secagem madeira de <i>Pinus</i> sp.				
		classe de umidade	Tui (%)	Tuf (%)	Tempo (dias)	Tx sec (U%.h ⁻¹)
1	40 x 72 (75°C)	verde	76,89	19,81	1,78	32,095c
3	40 x 105 (75°C)	verde	79,95	23,95	2,12	26,413e
5	40 x 105 (90°C)	verde	77,54	21,30	1,71	32,908c
7	40 x 72 (90°C)	verde	79,78	31,00	1,84	26,497e
9	22 x 105 (75°C)	verde	76,76	20,72	1,29	43,433d
11	22 x 72 (75°C)	verde	70,90	19,94	1,03	49,549a

13	22 x 105 (90°C)	verde	74,85	20,71	1,07	50,690a
15	22 x 72 (90°C)	verde	74,74	26,25	1,11	43,532b
Média		verde	76,43	22,96	1,49	38,140
tratamento	Identificação	classe de umidade	Tui (%)	Tuf (%)	Tempo (dias)	Tx sec (U%.h ⁻¹)
2	40 x 72 (75°C)	seca	20,55	8,54	0,80	14,974g
4	40 x 105 (75°C)	seca	17,64	11,31	0,94	6,722j
6	40 x 105 (90°C)	seca	15,53	10,77	0,64	7,459i
8	40 x 72 (90°C)	seca	26,91	10,65	0,84	19,383g
10	22 x 105 (75°C)	seca	19,54	8,39	0,55	20,298g
12	22 x 72 (75°C)	seca	19,19	8,20	0,55	19,982g
14	22 x 105 (90°C)	seca	26,10	11,89	0,58	24,683f
16	22 x 72 (90°C)	seca	28,50	10,33	0,79	23,134h
Média		seca	21,75	10,01	0,71	17,079
Média geral			48,69	17,72	1,1	26
CV (%)			11,28	57,74	45,84	33,17
Erro padrão			2,47	4,61	2,59	3,88

Em que Tui (%): Teor de umidade inicial (%); Tuf (%): Teor de umidade final (%) e Tx sec(U%.h⁻¹): Taxa de secagem (U%.h⁻¹). Médias seguidas de pelo menos uma letra em comum não difere entre si pelo teste de *Tukey*, ao nível de significância de 5%.

FONTE: A autora (2024).

Os programas de secagem elaborados permitiram secagem rápidas, com altas taxas de secagem, especialmente para as madeiras com elevado teor de umidade inicial. A taxa de secagem média para os tratamentos com madeira verde foi de 38,140 U%.h⁻¹. Estatisticamente as taxas de secagem mais rápidas ocorreram para as madeiras nos tratamentos 11 e 13, que são os tratamentos com peças verdes e de menores espessuras.

Esse comportamento pode ser explicado porque peças de menores espessuras permitem que a água se locomova mais rapidamente da parte central para a superfície da madeira, ao passo em que o maior teor de umidade inicial proporciona mais água livre para evaporação no início do processo. O uso de ar quente forçado fornecido pela secagem em estufa convencional também ajuda na rápida perda de umidade, especialmente nas peças de menor espessura, que aquecem mais rapidamente por possuírem uma área superficial relativa maior.

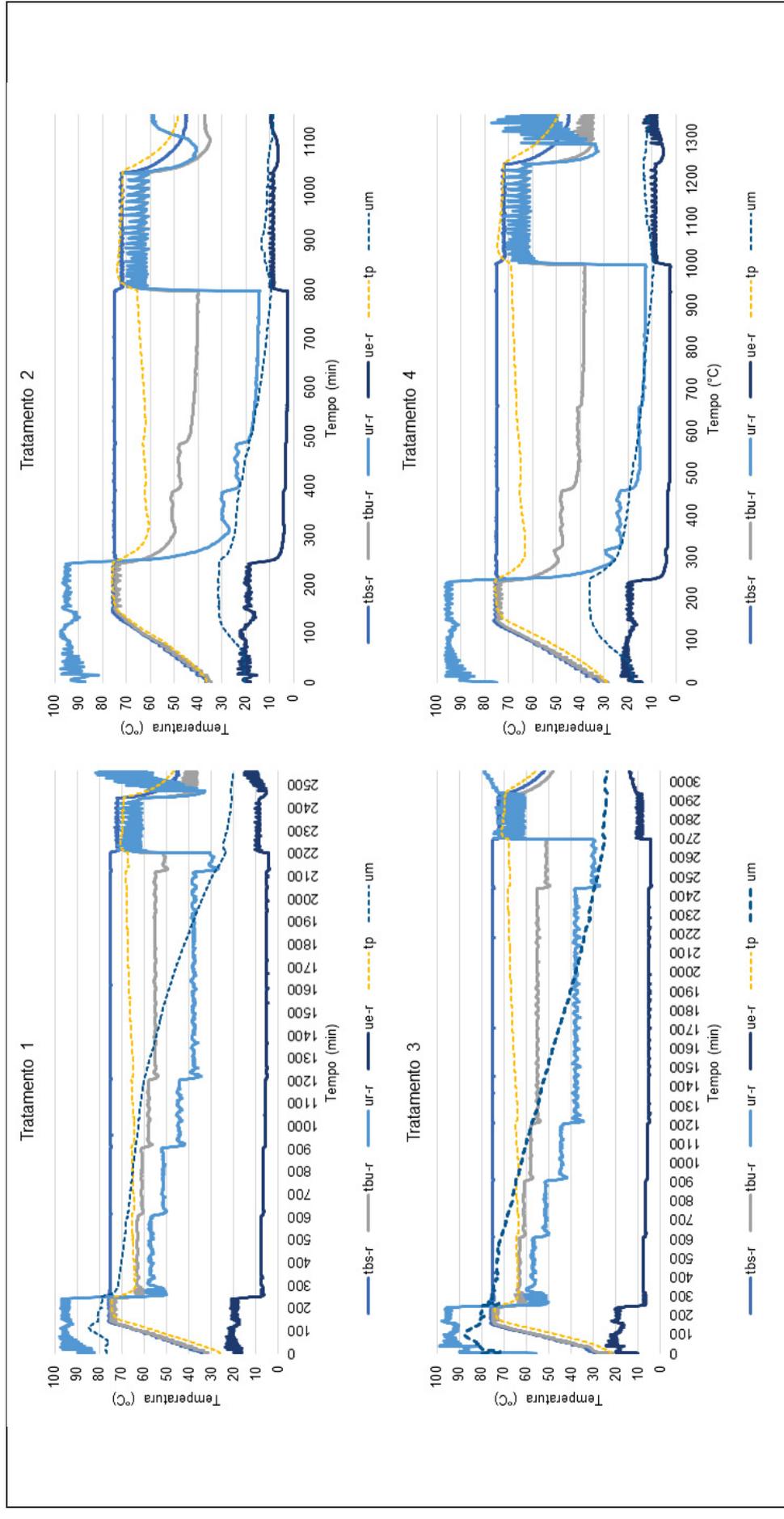
Segundo Siau (1984), a eficiência da difusão da umidade é maior em peças de menor espessura, e conforme Simpson (1991), o controle da temperatura e umidade na estufa otimiza a taxa de secagem ao adaptar as condições do ambiente às propriedades da madeira. A taxa de secagem média para os tratamentos com madeira seca foi de 17,079 U%.h⁻¹. As menores taxas de secagem foram para os tratamentos 4 e 6, que possuem peças secas e de maiores espessuras e larguras.

O aumento da espessura de uma peça de madeira acima de aproximadamente 25 mm, resulta na diminuição exponencial da taxa de secagem em estufa convencional (SMITH, 2023). A taxa de secagem é definida como a quantidade de água extraída em um determinado intervalo de tempo, em relação à área de evaporação da madeira (SANTINI, 1992). Ela tende a ser heterogênea devido às diferentes relações entre água e madeira, o que dificulta seu controle (ZANUNCIO et al., 2017).

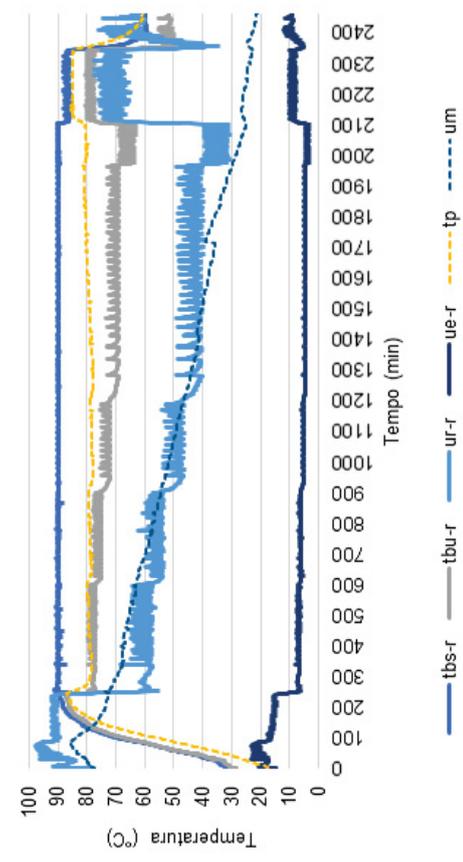
4.5 CURVAS DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

As curvas de secagem da madeira de *Pinus* sp. conforme representado na Figura 15, proporcionam uma visão dos resultados obtidos a partir dos diferentes programas de secagem para os tratamentos aplicados.

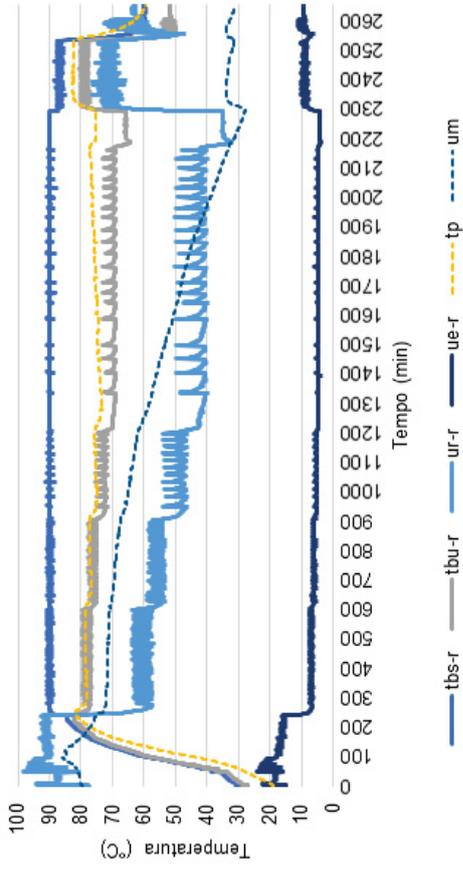
Figura 15 - CURVAS DE SECAGEM DE TODOS OS TRATAMENTOS DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Pinus* SP.



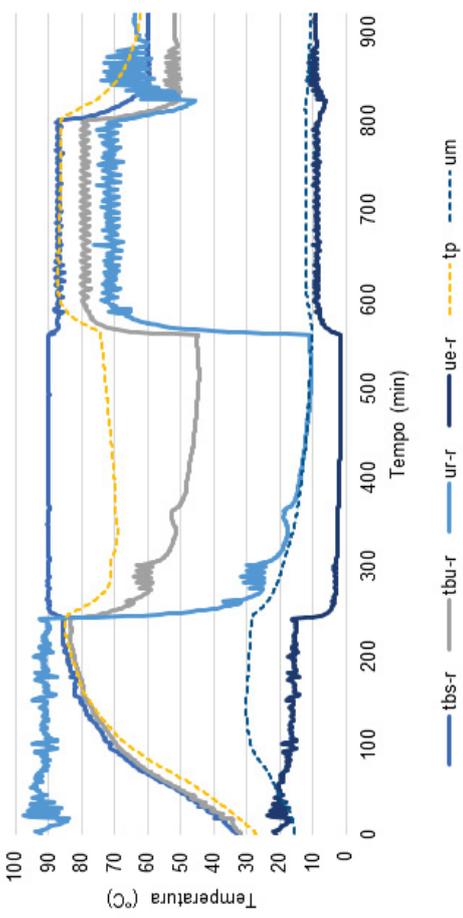
Tratamento 5



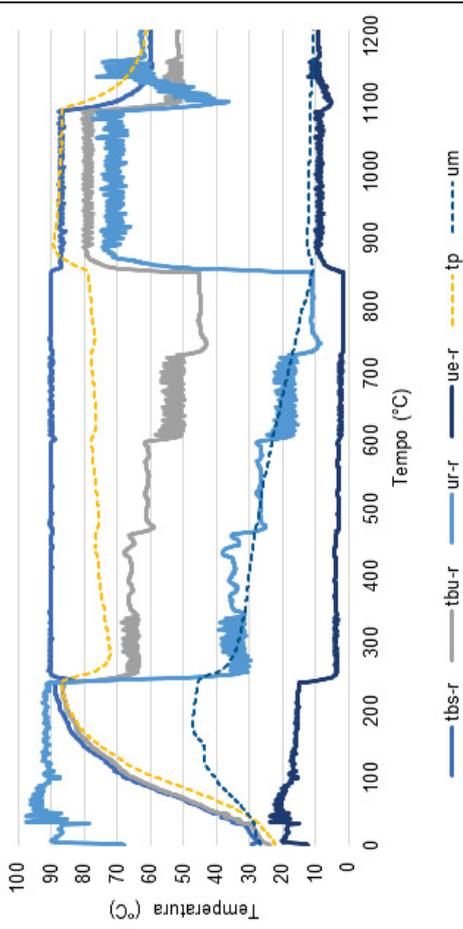
Tratamento 7



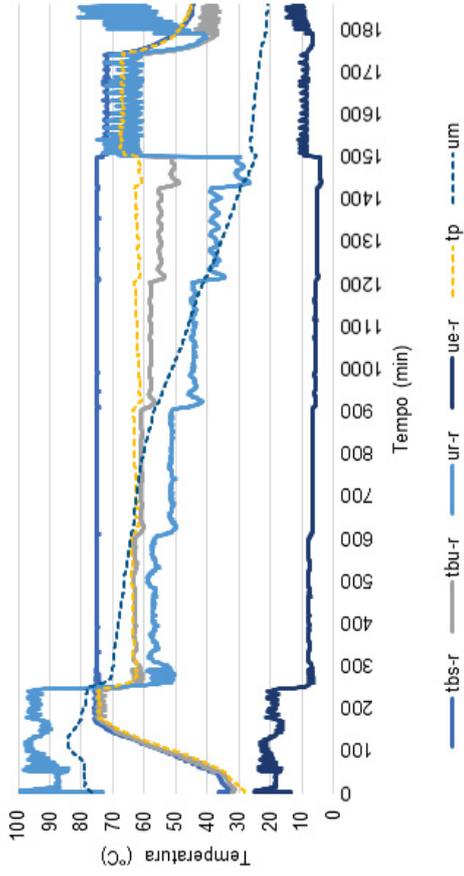
Tratamento 6



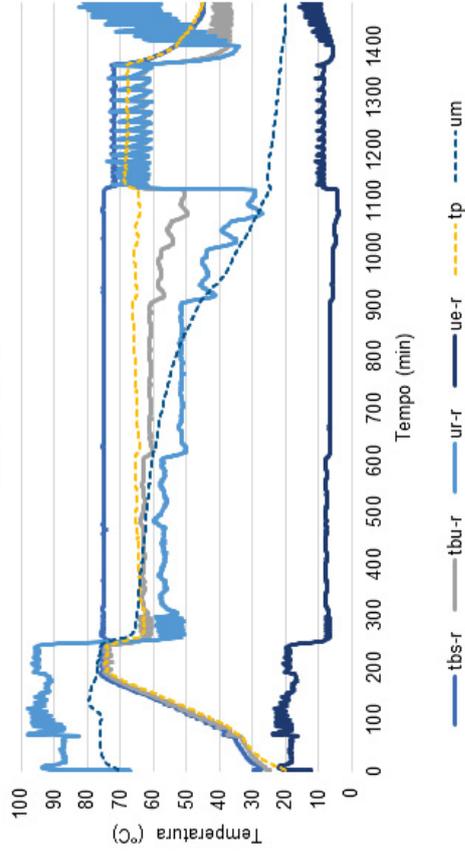
Tratamento 8



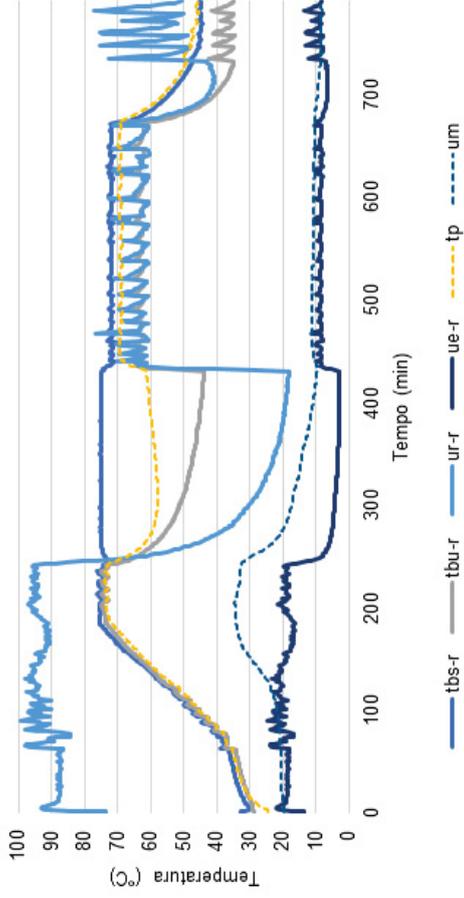
Tratamento 9



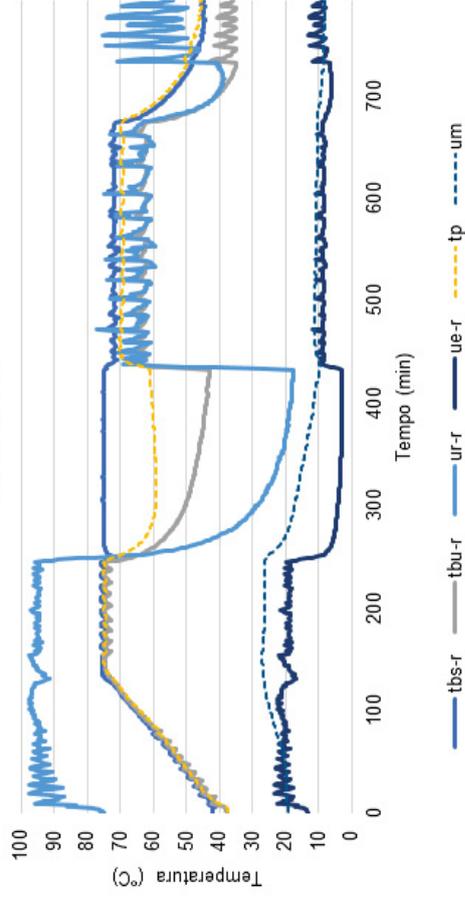
Tratamento 11

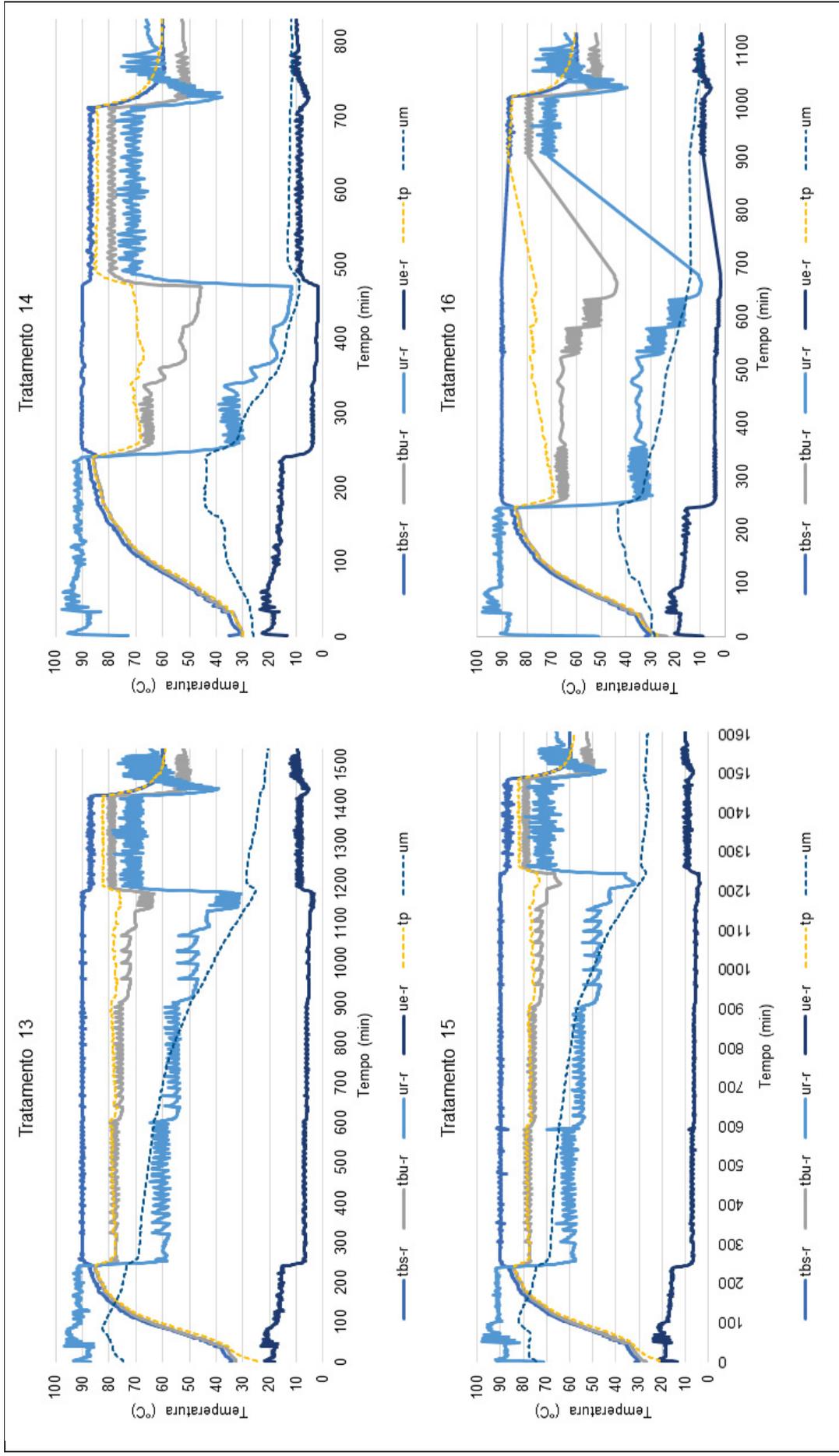


Tratamento 10



Tratamento 12





FONTE: A autora (2024).

Como visto na metodologia, a perda de umidade ao longo do tempo foi calculada com base na média dos pares de pinos sensores, enquanto a temperatura interna foi determinada pela média dos termopares PT100. A partir disso observa-se que as curvas apresentadas refletiram as condições de temperaturas desejadas (TBS e TBU), conforme estabelecido nos programas de secagem.

A análise da curva de perda de umidade para os tratamentos com madeira verde (tratamentos 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15) revelou um tempo médio de aproximadamente 30 horas para atingir o Ponto de Saturação de Fibra (PSF). Tal resultado mostrou-se inferior ao estudo conduzido por Klitzke (2002) em condições de temperatura semelhantes. No estudo mencionado, o autor observou um tempo médio de cerca de 56h para que a umidade das peças atingisse o PSF durante o processo de secagem da madeira de *Pinus* sp. em estufa convencional, variando as velocidades de circulação do ar.

Resultados semelhantes foram observados por Martins, et al., (2009), que relataram um tempo de aproximadamente 40h para a madeira de *Pinus elliottii* atingir o PSF durante o processo de secagem. Em outro estudo, Tamme, et al., (2022) abordaram a secagem de madeira de *Pinus* spp. com uma espessura de 36 mm, observando uma curva de secagem ainda mais prolongada. Os autores destacaram a necessidade de mais de 100h para a remoção da água livre da madeira. A diferença nos resultados obtidos no presente estudo pode ser explicada pelo uso de um potencial de secagem mais elevado, que resultou em boa adaptação do programa de secagem empregado, evidenciado pela agilidade do processo.

4.6 DEFEITOS DE SECAGEM EM MADEIRA DE *Pinus* SP.

4.6.1 Rachaduras de superfície

A Tabela 10 apresenta os percentuais de rachaduras de superfície nas peças, correlacionados com a perda de umidade decorrente dos processos de secagem. A classificação adotada foi essencialmente visual, seguindo critérios de presença ou ausência de rachaduras, sem considerar seu tamanho, em conformidade com as diretrizes propostas por Zen, (2016).

Tabela 10 - CLASSIFICAÇÃO VISUAL DOS ÍNDICES DE RACHADURAS SUPERFICIAIS (%) NA MADEIRA DE *Pinus* SP. APÓS SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

Identificação	RS 25 (%)	Identificação	RS 10 (%)
3 - 40 x 105 (75°C)	60	4 - 40 x 105 (75°C)	20
5 - 40 x 105 (90°C)	80	6 - 40 x 105 (90°C)	80

1 - 40 x 72 (75°C)	60	2 - 40 x 72 (75°C)	40
7 - 40 x 72 (90°C)	20	8 - 40 x 72 (90°C)	40
9 - 22 x 105 (75°C)	20	10 - 22 x 105 (75°C)	60
13 - 22 x 105 (90°C)	20	14 - 22 x 105 (90°C)	0
11 - 22 x 72 (75°C)	0	12 - 22 x 72 (75°C)	0
15 - 22 x 72 (90°C)	0	16 - 22 x 72 (90°C)	20

Em que: RS 25 (%) = Rachaduras de superfície em amostras a 25 % de umidade; RS 10 (%) = Rachaduras de superfície em amostras a 10 % de umidade e RS 0 (%) = Rachaduras de superfície em amostras a 0 % de umidade.

FONTE: A autora (2024).

Ao considerar todas as peças, aproximadamente 30% apresentaram alguma incidência de rachaduras superficiais. Dessas, aproximadamente 16% surgiram quando as peças atingiram o PSF e aproximadamente 14% quando a umidade das peças chegou a 10%. Ao final das 16 secagens, cada amostra foi seca até 0% de umidade para avaliar se haveria aumento de rachaduras de superfície.

As amostras referentes aos tratamentos 1 e 2 reduziram as rachaduras para 20%, as amostras referentes aos tratamentos 3 e 4 tiveram aumento para 80%, nos tratamentos 5 e 6 houve redução para 60%, nos tratamentos 7 e 8 continuou 40% e nos tratamentos 9 e 10 continuou em 60% de rachaduras. Para os tratamentos 11-12, 13-14 e 15-16 não houve rachaduras nas amostras secas até 0% de umidade. Os percentuais de rachadura referem-se ao tratamento.

As rachaduras superficiais são um fenômeno comum durante a secagem da madeira e são influenciadas por vários fatores. Conforme discutido por Souza et al., (2018), essas rachaduras tendem a surgir quando há discrepância nos teores de umidade entre a superfície e o interior das peças de madeira durante o processo de secagem. Além disso, condições de secagem severas, com baixas umidades relativas, podem acelerar a secagem das camadas superficiais a valores inferiores ao ponto de saturação das fibras (PSF), enquanto as camadas internas ainda retêm mais de 30% de umidade, como destacado por Galvao e Jankowsky (1985).

Os autores relatam ainda que como as camadas internas impedem as superficiais de se retraírem, aparecem tensões que, excedendo a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras, provocam o rompimento dos tecidos lenhosos. A saída da água de impregnação, que ocorre a partir do PSF, desencadeia modificações estruturais na madeira, aproximando as células lenhosas e conferindo maior rigidez, como discutido por Kollmann e Côté (1968).

Nesta pesquisa, observou-se que poucas amostras exibiam rachaduras de superfície mais profundas, e quando ocorriam, elas apresentavam maior intensidade próximo às perfurações dos pinos sensores ou dos nós, mas ainda assim bem pequenas, conforme ilustrado na Figura 16. As amostras mais largas foram as que apresentaram maior presença de rachaduras de superfície para todas as classes de umidade, o que pode ser explicado pela maior área superficial. Essa observação está em consonância com os resultados de um estudo sobre o surgimento de rachaduras superficiais em madeira de *Pinus taeda* durante o processo de secagem convencional, conforme investigado por Garbe (2006), destacando que peças mais largas são mais suscetíveis ao desenvolvimento desse defeito.

Figura 16 - RACHADURAS DE SUPERFÍCIE NA MADEIRA DE *Pinus* SP. APÓS SECAGEM ATÉ A 0% DE UMIDADE.



FONTE: A autora (2024).

Em pesquisa realizada com secagem de madeira de *Pinus taeda* a diferentes temperaturas (40°C, 60°C e 80°C), foi constatado que peças de corte radial são as menos propensas a rachaduras superficiais (SOUZA et al., 2021). Porém, como foi discutido anteriormente, as peças utilizadas nesta pesquisa em sua maioria não seguiam um padrão de corte exclusivamente radial ou tangencial, pois se tratava de peças utilizadas no comércio de madeira destinadas à fabricação de paletes e outros produtos com menor valor agregado. Porém as rachaduras superficiais quando rasas não são consideradas um forte problema, uma vez que podem ser removidas com aplainamento.

As rachaduras de superfície entre os tratamentos apresentaram variações a depender do teor de umidade alcançado. De maneira geral houve uma tendência à redução desse defeito quando a umidade estava inferior a 25%.

Uma série de fatores podem contribuir para a redução das rachaduras à medida que ocorre a redução da umidade da madeira, pois a remoção da água livre durante a secagem ocorre mais rapidamente que a remoção da água de impregnação, devido à menor força de adesão com

a parede celular (SKAAR, 1972; SOARES, et al., 2016). Essa velocidade pode acabar aumentando as tensões de secagem e contribuindo para o surgimento desse tipo de defeito.

4.6.2 Rachaduras de topo

Na Tabela 11 são apresentados os índices de rachaduras de topo das peças de acordo com a perda de umidade em decorrência das secagens. O índice de rachadura de topo foi baixo considerando todos os tratamentos, o que mostra que os programas de secagem atenderam bem ao proposto.

Tabela 11 - ÍNDICES DE RACHADURAS DE TOPO (%) NA MADEIRA DE *Pinus* SP. APÓS SECAGEM EM ESTUFA CONVENCIONAL

Identificação	IRT 25%	Identificação	IRT 10%
3 - 40 x 105 (75°C)	5,846	4 - 40 x 105 (75°C)	4,212
5 - 40 x 105 (90°C)	0,000	6 - 40 x 105 (90°C)	4,339
1- 40 x 72 (75°C)	0,000	2 - 40 x 72 (75°C)	0,000
7 - 40 x 72 (90°C)	3,502	8 - 40 x 72 (90°C)	0,000
9 - 22 x 105 (75°C)	0,000	10 - 22 x 105 (75°C)	0,000
13 - 22 x 105 (90°C)	0,000	14 - 22 x 105 (90°C)	0,000
11 - 22 x 72 (75°C)	0,000	12 - 22 x 72 (75°C)	0,000
15 - 22 x 72 (90°C)	0,000	16 - 22 x 72 (90°C)	0,000

Onde: IRT 25 (%) = Índice de rachaduras de topo em amostras a 25 % de umidade; IRT 10 (%) = Índice de rachaduras de topo em amostras a 10 % de umidade e IRT 0 (%) = Índice de rachaduras de topo em amostras a 0 % de umidade.

FONTE: A autora (2024).

Apenas as amostras com espessura de 40 mm apresentaram rachaduras de topo quando secas até 25% e 10% de umidade, independente da temperatura de secagem. Assim como observado nas rachaduras superficiais, as rachaduras de topo reduziram à medida que também houve a redução de umidade das peças.

Ao final das 16 secagens, cada amostra foi seca até 0% de umidade para avaliar se haveria aumento de rachaduras. Apenas os tratamentos 3-4, 5-6 e 9-10 apresentaram rachaduras de topo, inferiores a 2,5%.

Um comportamento semelhante foi observado durante secagem ao ar livre da madeira de genótipos de *Tectona grandis* por Albuês et al (2024). Os autores relataram redução das rachaduras em todos os genótipos quando a madeira apresentou umidade inferior ao ponto de saturação das fibras. As rachaduras podem ser causadas pelas diferenças nas contrações radiais e tangenciais, resultando em tensões de magnitude suficiente para causar a ruptura da madeira

ao longo dos planos mais fracos, geralmente nas junções do tecido longitudinal (fibras, vasos, entre outros) (DUCATTI, 2000).

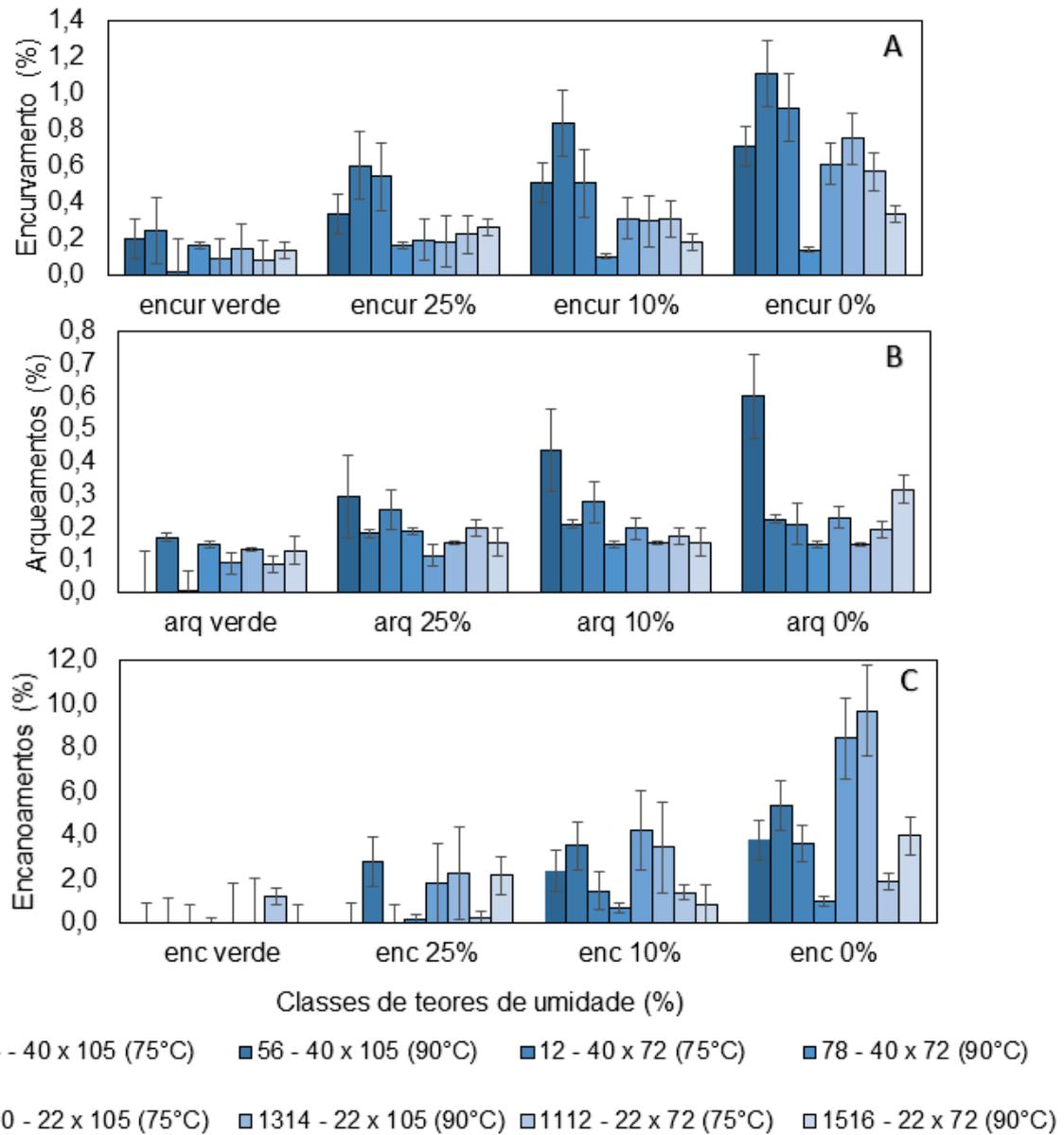
Os baixos índices de rachaduras de topo se devem a boa adequação do programa de secagem, em união com o alinhamento correto dos sarrafos separadores utilizados nas cargas de secagem. Essa prática minimiza a velocidade de secagem dos topos e conseqüente formação de rachaduras, fato testado e comprovado em pesquisa realizada por (LIEBL et al., 2017). Além disso as peças utilizadas possuem comprimento de 600 mm, conseqüentemente, com menor propensão de defeitos.

A avaliação da classificação de qualidade foi realizada conforme orientação apresentada por Aquino-González et al., (2010). Assim, todos os tratamentos e todas as classes de umidade foram considerados com ausência de rachaduras de topo.

4.6.3 Empenamentos

Os empenamentos (encurvamentos, arqueamento e encanoamento) das amostras de *Pinus* SP. para diferentes teores de umidade estão apresentados na Figura 17. Foi possível observar que todos os defeitos se tornaram mais elevados quando o teor de umidade estava em 0%. É importante ressaltar que as amostras já apresentavam problemas de arqueamento e encurvamento oriundas do desdobro e transporte, porém baixos.

Figura 17 - ENCURVAMENTO, ARQUEAMENTO E ENCANOAMENTO DAS AMOSTRAS DA MADEIRA DE *Pinus* SP. A DIFERENTES TEORES DE UMIDADE



Nota: As legendas seguem a ordem número do tratamento, espessura e largura das peças e temperatura do tratamento. Ex.: 34 - 40 x 105 (75°C) significa tratamentos 3 (madeira verde) e 4 (madeira seca), que são os tratamentos que possuem dimensões de 40 mm espessura e 105 mm de largura e temperatura de 75°C.

Fonte: A autora (2024).

Os defeitos foram considerados desprezíveis na qualidade da secagem da madeira, exceto quando a umidade da madeira ficou em torno de 0%. As amostras com maiores espessuras foram as que apresentaram maior média de encurvamento (tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6), sendo esse o defeito mais incidente entre os analisados. Os valores máximos e mínimos

dentro das médias de encurvamento foram de 0,01% e 1,11%, entre as classes de teores de umidade.

Tal resultado foi superior ao observado por Cademartori et al., (2012), que relataram valores entre 0% e 0,7% para encurvamento da madeira de *Pinus elliottii* Engelm com espessura entre 12 e 25 mm, após secagem convencional. Essa diferença entre os resultados corroboram com o exposto por Ponce e Watai (1985) e Talgatti et al., (2019), que afirmam que a ocorrência dos empenamentos está ligada também a fatores como dimensões das peças, tipo de corte, grã da madeira e forma de empilhamento.

O encurvamento é um dos defeitos mais ligados às tensões de crescimento, e uma das formas de contornar esse problema é por meio de procedimentos operacionais apropriados de desdobro (TAVARES, 2013), bem como correto armazenamento das peças em locais planos, organizadas por meio de sarrafos separadores com dimensões uniformes e bem alinhados na carga de madeira (PLYWOOD, 2020; NIGGL, 2024). Além disso, antes e durante a secagem, o uso de sobrecargas adequadas pode reduzir a incidência de defeitos (Salinas-Lira, et al., 2018).

Houve o aumento do arqueamento ao longo do processo de secagem para todos os tratamentos, mas de forma tênue, pois as peças eram de apenas 600mm de comprimento. Apenas nos tratamentos 3 e 4 foram mais evidentes, com uma média do índice de 0,33% entre todas as classes de umidade.

Em análise sobre o surgimento de defeitos com madeira de *Pinus* spp. com diferentes densidades, Shelly, Arganbright e Birnbach (1979) alcançaram empenamentos com flexa que variavam de 1,1 cm até 5 cm, em peças de aproximadamente 2,4m de comprimento e Cademartori et al., (2012) obtiveram índice de arqueamento máximo de 1,58% para a madeira de *Pinus elliottii* Engelm com espessura entre 12 e 25 mm, após secagem convencional.

Neste estudo o máximo observado foi apenas para os tratamentos 11 e 12, pois o arqueamento de uma peça com umidade a 0% alcançou uma flexa de 1,7 cm. Porém, considerando o índice de arqueamento máximo médio, o valor foi de 0,6%. Essa variação entre os estudos anteriores e este pode ser explicado devido a diferenças entre as dimensões das peças em cada estudo.

A média do índice de encanoamento foi de 2,07%. Para todos os tratamentos esse defeito se tornou mais intenso a partir de 10% de umidade, elevando-se ainda mais quando as amostras atingiram 0% de umidade. As amostras com maiores larguras e menores espessuras foram as mais incidentes (tratamento 9, 10, 13 e 14), independente da temperatura de tratamento.

De modo geral, houve o aumento dos defeitos ao longo do processo de secagem para todos os tratamentos, porém, com exceção do encanoamento das peças a 0% de umidade, todos os tratamentos apresentaram magnitude considerada leve, de acordo com as normas e por classificação apresentada em alguns trabalhos, como Salinas-Lira, et al., (2018) e Souza et al., (2021).

Ainda, conforme avaliação de qualidade da madeira apresentado por Aquino-González et al., (2010), pode-se considerar a classificação de arqueamento e encurvamento das peças em todas as classes de umidade como ausentes. Porém a intensidade do encanoamento foi classificada como intensa.

A média geral dos empenamentos foi de 0,90% considerando todos os tratamentos e todas as classes de umidade. Ainda assim, esse resultado foi inferior ao observado por Batista et al., (2017), os quais em análise da secagem convencional da madeira de *Pinus* spp. obtiveram índice de 4,01% de empenamentos. De acordo com a classificação de qualidade da secagem, proposta por Kauman e Mittak (1966) citados por Aquino-González et al., (2010), o índice pode ser classificado como bom e com condições de secagem adequadas.

Ao considerar os defeitos isoladamente, a soma dos comprimentos das rachaduras de topo foi inferior a 10%, o que classifica esse defeito como de qualidade extra. O mesmo ocorreu com o defeito de encurvamento da madeira, alcançando valor inferior a 1%. Já para o defeito de encanoamento, a classificação foi de terceira classe, pois a média foi superior a 2,5%. Os defeitos foram considerados com as peças secas até 25% e 10% de umidade.

4.7 CORRELAÇÕES ENTRE DEFEITOS DE SECAGEM E VARIÁVEIS DA MADEIRA

A correlação entre os defeitos de secagem e as variáveis temperatura, teor de umidade, massas específicas, e retrações da madeira de *Pinus* sp. estão apresentadas na Tabela 12. Observa-se que as rachaduras de superfície na madeira foram diretamente proporcionais a outro defeito, o encurvamento. Logo, à medida que se aumenta o encurvamento, há uma forte tendência ao surgimento desse defeito, com correlação de 0,688.

Tabela 12 - CORRELAÇÃO ENTRE OS DEFEITOS DE SECAGEM (RACHADURA DE SUPERFÍCIE, RACHADURA DE TOPO, ENCURVAMENTO, ARQUEAMENTO, ENCANOAMENTO) E O TEOR DE UMIDADE, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA, MASSA ESPECÍFICA APARENTE (VERDE E SECA) DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

<i>rs</i> (%)	<i>rt</i> (%)	<i>encu.</i> (%)	<i>arq.</i> (%)	<i>enca.</i> (%)	<i>t</i> (min)	<i>temp</i> (°C)	<i>TU</i> (%)	<i>MEB</i> (g.cm ⁻³)	<i>MEAv</i> (g.cm ⁻³)	<i>MEAs</i> (g.cm ⁻³)
---------------	---------------	------------------	-----------------	------------------	----------------	------------------	---------------	----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

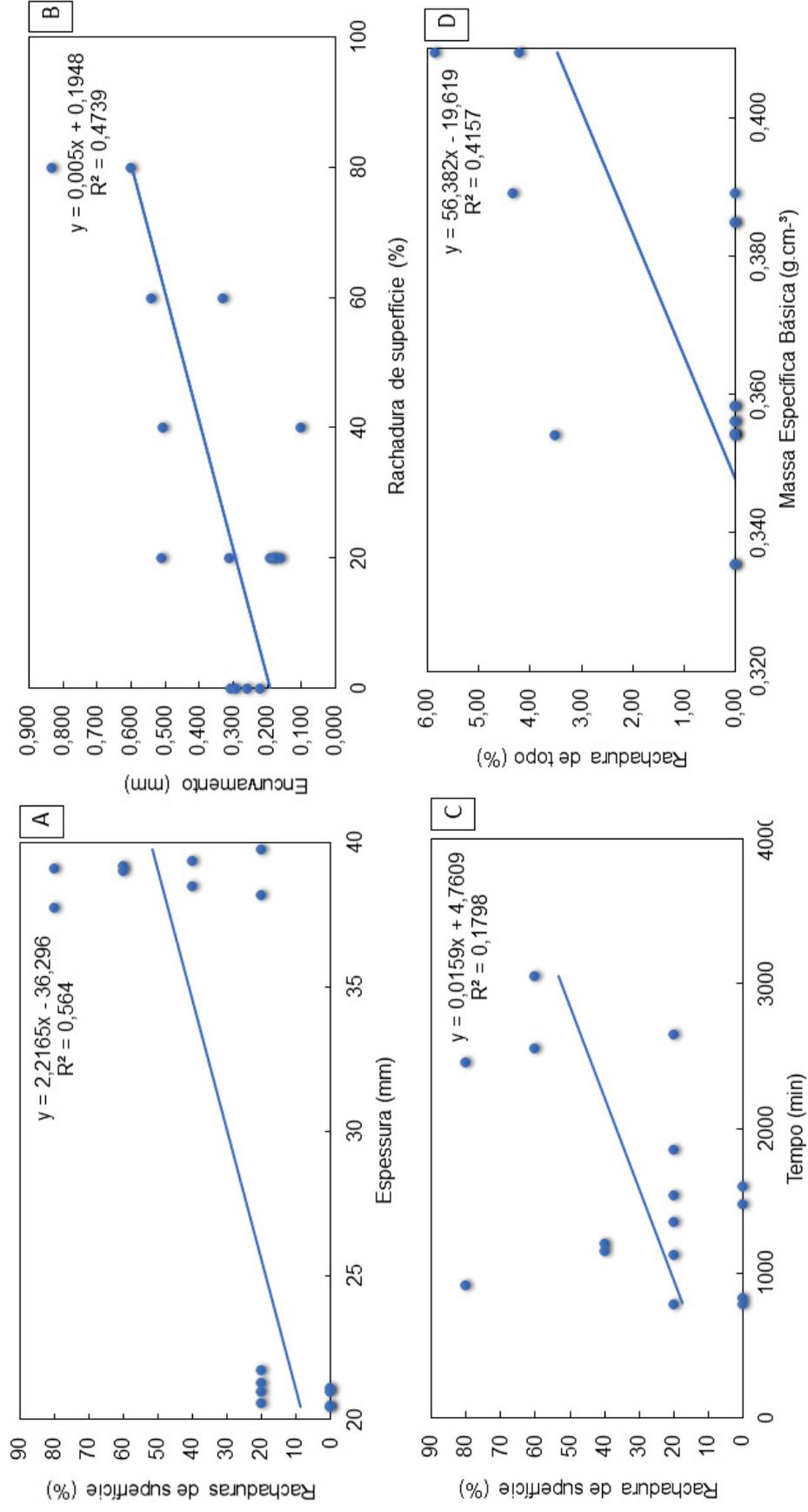
<i>rs (%)</i>	1											
<i>rt (%)</i>	0,375	1										
<i>encu. (%)</i>	0,688	0,340	1									
<i>arq. (%)</i>	0,228	0,600	0,472	1								
<i>enca. (%)</i>	0,004	-0,115	0,365	-0,090	1							
<i>t (min)</i>	0,424	0,376	0,004	0,174	-0,562	1						
<i>temp (°C)</i>	0,094	-0,070	-0,097	-0,498	0,211	-0,062	1					
<i>TU (%)</i>	0,088	0,021	-0,224	-0,190	-0,436	0,809	-0,002	1				
<i>MEB (g.cm⁻³)</i>	0,251	0,645	0,266	0,397	0,173	0,185	0,171	-0,061	1			
<i>MEAv (g.cm⁻³)</i>	0,135	0,123	-0,186	-0,135	-0,403	0,842	0,026	0,984	0,107	1		
<i>MEAs (g.cm⁻³)</i>	0,325	0,692	0,248	0,384	0,169	0,242	0,304	-0,046	0,971	0,117	1	

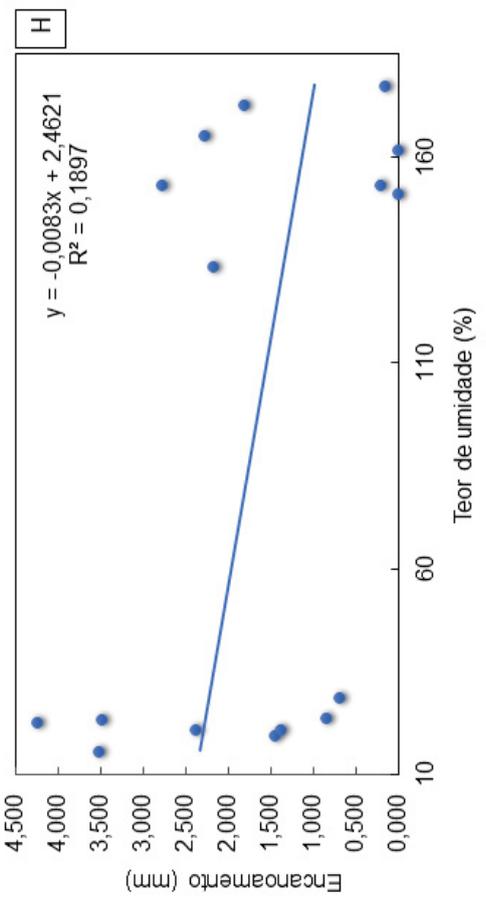
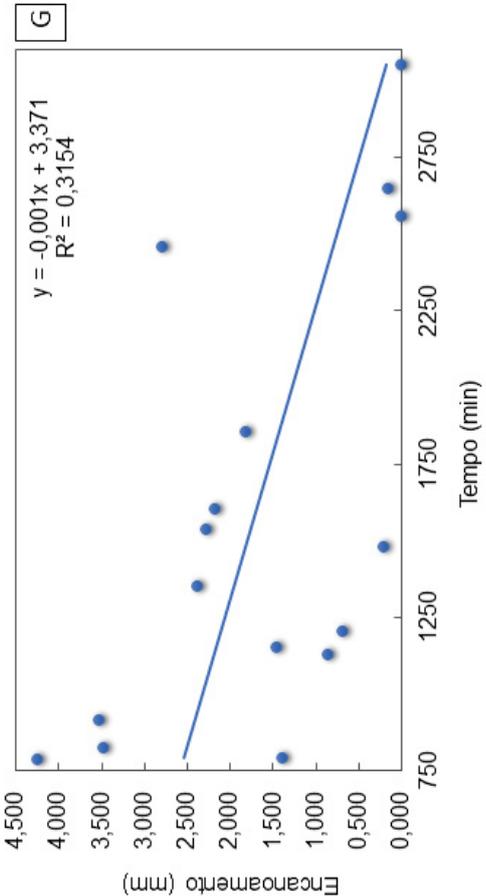
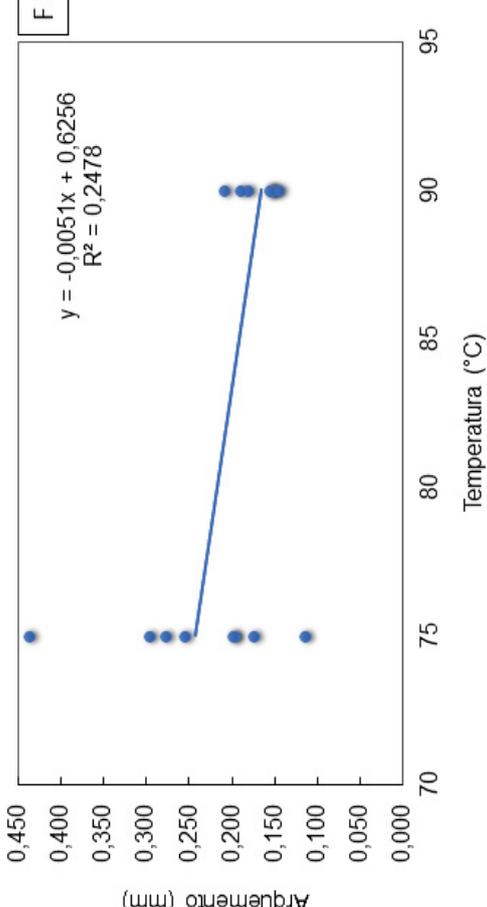
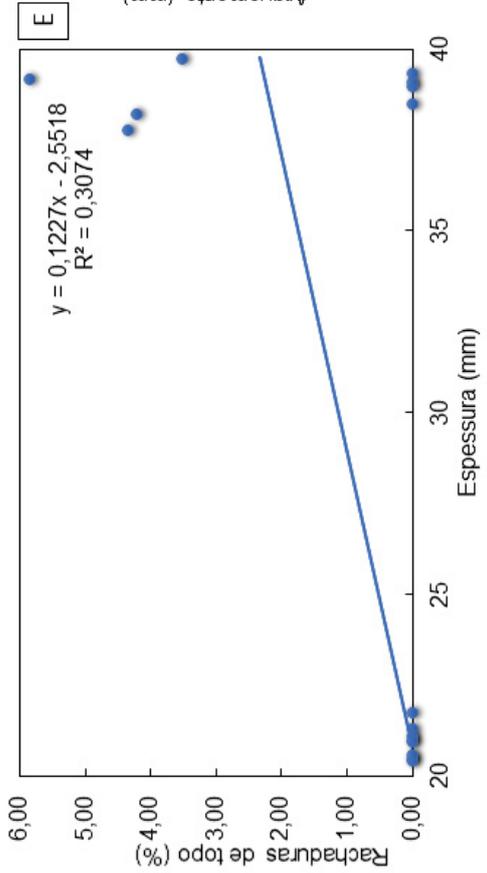
Legenda: cor azul: defeitos de secagem; rs: rachadura de superfície; rt: rachadura de topo; encu.: encurvamento; arq.: arqueamento; enca.: encanoamento; t (min): tempo; temp (°C): temperatura; TU%: teor de umidade da madeira; MEB (g.cm⁻³): massa específica básica; MEAv (g.cm⁻³): massa específica aparente verde e MEAs (g.cm⁻³): massa específica aparente seca.

Fonte: A autora (2024).

Isso pode ser explicado porque durante a secagem a superfície de uma peça de maior espessura seca mais rapidamente do que o seu interior, isso causa um gradiente de umidade que provoca tensões internas, pois a superfície se contrai mais rapidamente do que o centro. O desenvolvimento de modelo linear simples foi capaz de explicar 56% da variância das rachaduras de superfície (Figura 18a). As rachaduras de superfície também foram diretamente proporcionais ao surgimento de outro defeito de secagem, o encurvamento, com correlação de 0,688 e o modelo resultou em R² de 0,47 (Tabela 12 e Figura 18b).

Figura 18 - LINHAS DE TENDÊNCIA ENTRE OS DEFEITOS DE SECAGEM DA MADEIRA DE *Pinus* SP. E AS VARIÁVEIS ESPESSURAS, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA, TEORES DE UMIDADE, TEMPO E TEMPERATURAS





Uma vez que o encurvamento é um dos defeitos que pode ser causados pela retração volumétrica da madeira durante a secagem, sabe-se que esse defeito afeta fortemente no surgimento de rachaduras na madeira durante o processo de secagem (LARSEN; ORMARSSON; OLESEN, 2011), o que justifica a correlação positiva entre esses defeitos, de 0,688.

Observou-se também a partir da análise de correlação que as peças com maiores tempos de secagem foram moderadamente propensas ao surgimento das rachaduras superficiais, com valor de correlação de 0,424. Em uma revisão realizada sobre o surgimento de rachaduras superficiais na madeira de diversas espécies de coníferas, foi relatado que secagens mais rápidas reduzem a incidência desse defeito (OLTEAN; TEISCHINGER; HANSMANN, 2007).

Os maiores tempos de secagem foram provocados pelos maiores TU% e as maiores espessuras das peças, com valores de correlação forte e moderada, de 0,809 e 0,504, respectivamente. Isso vai de acordo com um estudo que mostrou que a redução do teor de umidade influenciou no surgimento de rachaduras em diversas espécies de madeira, o que demonstra a necessidade de mais pesquisas capazes de explicar os mecanismos de deformação e rachaduras da madeira em resposta à perda de umidade (FU et al., 2023). Estudos com mais variações de umidade e espessuras da madeira poderiam ser mais responsivos à tal questionamento.

Uma pequena diferença na MEB e MEAs entre os tratamentos pode favorecer o surgimento de rachaduras de topo, havendo uma correlação de 0,645 e 0,692. Em contrapartida a essa pesquisa, em estudo realizado com secagem convencional da madeira de *Pinus radiata*, não foi encontrada correlação da massa específica da madeira com outros parâmetros (HERRERA-DÍAZ et al., 2017).

As rachaduras de topo também tiveram correlação positiva com as espessuras das peças, mas moderada de 0,554. O mesmo foi observado em relação às peças com arqueamento, sendo mais propensas ao surgimento das rachaduras de topo, ou vice-versa.

Os defeitos de encurvamento e arqueamento tiveram correlação positiva e moderada com a espessura das peças. Já o defeito de encanoamento teve correlação positiva e moderada com a largura das peças. O arqueamento sofreu uma moderada influência da temperatura, sendo inversamente proporcional, com correlação de -0,498. O encanoamento foi inversamente proporcional ao tempo de secagem e ao teor de umidade das peças, com correlação moderada de -0,562 e -0,436. Os resultados da análise de correlação estão de acordo com o esperado na literatura.

Avaliando as demais variáveis entre si, notou-se que o teor de umidade diminuiu à medida que a temperatura aumenta, com muito fraca correlação negativa de apenas -0,002, ou seja, não significativa. Embora neste trabalho a correlação não tenha sido significativa entre teor de umidade e temperatura, em estudo realizado por Herrera-Díaz et al., (2017) observou-se que a correlação entre a temperatura e a umidade da madeira de *Pinus radiata* diminuiu proporcionalmente à intensidade da secagem. Isso pode ser explicado pela elevação da energia cinética na água fornecida pela alta temperatura durante a secagem da madeira, que conseqüentemente, faz com que as moléculas de água se agitem de forma mais intensa e evaporem.

Em um outro estudo realizado com secagem ao ar livre da madeira de *Tectona grandis*, foi observado que o teor de umidade apresentou correlação negativa com arqueamento e encurvamento, ou seja, quanto menor o teor de umidade alcançado, maior a propensão a esses defeitos (ALBUÊS et al., 2024). Isso vai de acordo ao observado nesta pesquisa, pois o teor de umidade também influenciou nas contrações e nos empenamentos, pois as peças com menores teores de umidade resultaram em peças com maiores contrações e com maiores empenamentos. Isso evidencia que independentemente do método de secagem ou da espécie, as variáveis ambientais podem ter correlações com as variáveis da madeira.

No que diz respeito a modelagem desenvolvida e apresentada na Figura 18c-h), o R^2 não alcançou elevado coeficiente de determinação. Isso mostra que mais pesquisas precisam ser desenvolvidas com peças de maiores comprimentos, para melhorar a estimativa dos surgimentos de defeitos de secagem, com base nas variáveis correlacionadas.

4.8 TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

4.8.1 Correlações entre as variáveis ambientais e da madeira

A correlação entre as variáveis ambientais e da madeira, na fase inicial de aquecimento até atingirem 56°C, em todos os tratamentos, está disponível na Tabela 13.

Tabela 13 - CORRELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA E AS VARIÁVEIS TEMPO, TEMPERATURA DE BULBO SECO, UMIDADE RELATIVA, UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA, UMIDADE DA MADEIRA, ESPESSURA E LARGURA DAS PEÇAS DE *Pinus* SP. NA FASE DE AQUECIMENTO, ATÉ AS AMOSTRAS ATINGIREM 56 °C

T	t.b.s	u.r	u.e	t.p	u.m	esp.	lar.	Esquema representativo das correlações entre as variáveis
T	1							
t.b.s	0,207	1						
u.r	0,164	-0,662	1					
u.e	0,105	-0,762	0,987	1				
t.p	0,088	0,167	-0,182	1				
u.m	0,493	0,478	-0,210	0,194	1			
esp.	0,015	0,797	-0,481	-0,048	0,065	1		
lar.	0,058	0,167	-0,001	-0,007	0,052	0,049	1	

Legenda: T: tempo; t.b.s: temperatura de bulbo seco; u.r: umidade relativa; u.e: umidade de equilíbrio; t.p: temperatura interna da madeira; u.m: Umidade da madeira; esp.: Espessura das peças de madeira; lar.:Largura das peças de madeira.

FONTE: A autora (2024).

O esquema ilustrativo demonstra correlação positiva muito fraca a muito forte pela proeminência de linha e intensidade da coloração azul entre as variáveis, bem como correlação negativa muito fraca a muito forte pela proeminência de linha e intensidade da coloração vermelha entre as variáveis. Assim, nota-se pelos dados apresentados e pelo esquema que na fase de aquecimento, a temperatura interna da madeira apresentou uma correlação positiva, mas muito fraca com o tempo (0,088), TBS (0,167) e umidade da madeira (0,194). Ao passo em que apresentou correlação negativa e muito fraca com a umidade relativa (-0,163), umidade de equilíbrio (-0,182), espessura (-0,048) e largura (-0,007) das peças.

Analisando as demais variáveis entre si, observa-se que o tempo teve correlação positiva com todas as demais variáveis, porém a maior interação positiva foi com a umidade da madeira, com correlação moderada positiva de 0,493. Logo, peças com maiores teores de umidade necessitaram de maior tempo de secagem. Diversos fatores, como a umidade inicial em união às maiores espessuras das peças, aumentam o tempo de secagem em uma espécie (GARBE, 2006; MARTINS, 2009). Porém na fase de aquecimento da madeira, quanto maior a umidade das peças, maior será o tempo de secagem.

O TBS e o tempo tiveram fraca correlação positiva, de 0,207, resultado semelhante ao observado em pesquisa realizada sobre a temperatura interna da madeira de *Pinus* spp. na fase de aquecimento da secagem (FERNANDES; COSTA; THOMAS, 2006). Os autores elucidaram que o tempo de aquecimento interno da madeira não sofreu grande dependência com a temperatura.

A umidade relativa e umidade de equilíbrio possuem correlações positivas muito forte (0,987), porém bem fraca com o tempo (0,164). Uma vez que quanto maior a quantidade de vapor de água presente no ar na fase de aquecimento, maior será a absorção dessa umidade pela madeira, em busca do equilíbrio com o meio.

A informação supracitada ganha embasamento, pois a umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio da madeira, segundo os dados de correlação, são inversamente proporcionais ao TBS, com valores de -0,662 e -0,762, respectivamente. Isso pode ser explicado porque na fase inicial da secagem ocorre uma rampa de aquecimento até que a temperatura desejada seja alcançada, e nesse caso, quando começa a haver a diminuição da UR e UEM. Na fase de aquecimento, a umidade da madeira é diretamente proporcional ao tempo e ao TBS, com correlação moderada (0,478). Nessa fase, a madeira ainda não começa a perder umidade, ao contrário, ganha, pois o ambiente ainda está saturado de vapor de água.

As variáveis espessuras e larguras só foram medidas antes e após cada secagem. Como existe uma pequena variação milimétrica nas dimensões devido ao desdobro das peças, algumas peças maiores estavam presente nas repetições dos tratamentos a 90°C, o que pode ter sido interpretado como correlação positiva (0,797), mas nesse caso, sem causa e efeito.

De maneira geral, as correlações analisadas obtiveram um comportamento esperado. Isso é um fator positivo pois comprova cientificamente fatos já observados no cotidiano de profissionais que trabalham com aquecimento da madeira.

É importante ressaltar que a maioria dos trabalhos publicados na literatura avaliam a correlação entre temperatura do ambiente de secagem e as propriedades mecânicas da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2013; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2014; SANTOS et al., 2017;

FRANÇA, 2019) e poucos trabalhos analisam a correlação da temperatura interna da madeira com outras variáveis. Assim, observa-se que não foram encontrados trabalhos que realizem essa análise nas diferentes fases da secagem, o que mostra a importância da presente pesquisa e que mais análises sejam realizadas futuramente. A correlação entre as variáveis ambientais e da madeira na secagem completa, em todos os tratamentos, está disponível na Tabela 14.

Na secagem propriamente dita, o aquecimento interno da madeira sofre mais influência da temperatura do ambiente do que das demais variáveis. A espessura foi a segunda variável de maior influência positiva na temperatura interna da madeira, mas fraca. Se comparar a espessura com o tempo de secagem, porém, a correlação positiva aumenta, passando a ser 0,498.

Os resultados desta pesquisa corroboram com os resultados obtidos por Brandão et al., (2022). Os autores realizaram análise da transferência combinada de calor e massa (umidade) para uma peça de madeira de *Pinus elliottii* submetida a secagem em estufa convencional e notaram significativa influência da espessura da peça na velocidade de secagem. Esse resultado também foi semelhante ao observado por Ananías et al., (2013) em estudo com madeira de *Pinus radiata* a diferentes espessuras (16, 24 e 37). Os autores também observaram que conforme aquecia-se peças de maiores espessuras, o tempo médio de aquecimento também aumentava. De maneira geral, peças de maiores espessuras levam mais tempo para o aquecimento interno, segundo Aléon (2004).

Analisando as demais variáveis entre si, observa-se que a umidade relativa e umidade de equilíbrio foram diretamente proporcionais, com correlação de 0,924. Isso mostra que ao diminuir a UR, também ocorre a redução da UEM, uma vez que há sempre a busca por equilíbrio entre essas variáveis. Quando o meio de aquecimento é por meio do ar que não está saturado com vapor de água, ocorre a depressão de bulbo úmido e assim a umidade relativa se torna menor que 100%. Dessa forma, a secagem ocorre à medida que a água evapora da superfície da madeira (WANG; BERGMAN; MACE, 2010).

As peças com maiores umidade tornaram as secagens mais demoradas, pois a umidade das peças e o tempo de secagem foram diretamente proporcionais, com correlação de 0,812. A partir dessa análise de correlação, foi possível comprovar o observado experimentalmente, pois os tratamentos com as peças de menores teores de umidade iniciais resultaram em secagens mais rápidas. Como visto anteriormente, a elevada umidade inicial é um dos fatores capazes de aumentar o tempo de secagem da madeira (GARBE, 2006; MARTINS, 2009), ou vice-versa.

Os dados apresentados na presente pesquisa vão de acordo com a informação de que o tempo necessário para que o centro da madeira atinja a temperatura desejada (nesse caso, 56°C, de acordo com a NIMF 15) é influenciado por muitos fatores, incluindo a fonte de energia usada para gerar o calor, o meio usado para transferir o calor (calor úmido ou seco), a eficácia da circulação

de ar na instalação de aquecimento, a espécie e as propriedades físicas (dimensões, massa específica, teor de umidade, entre outros) da madeira (WANG; BERGMAN; MACE, 2010).

4.9 MODELOS ESTATÍSTICOS PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

O modelo apresentou acurácia na estimativa da variável dependente, que foram constatadas pela RMSE, ou seja, pelo erro padrão da estimativa, e coeficiente de determinação (Tabela 15). É possível observar os parâmetros estatísticos da equação, testados para descrever o aquecimento interno da madeira em função do tempo, temperatura, teor de umidade da madeira e espessura da madeira. As variáveis independentes para o modelo genérico assumiram a equação 7.

Tabela 4 - TABELA COM COEFICIENTES ASSOCIADOS ÀS VARIÁVEIS E AS ESTATÍSTICAS

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	ρ	<i>P</i> -valor	RMSE (°C)	RMSE (%)	R ²
10,10	1.21e ⁻³	-6.49e ⁻²	0,79	-0,42	0,99	< 0,005	0,34	0,49	0,99
(6,62e⁻³)	(1,69e ⁻⁶)	(4,78e ⁻⁵)	(8,19e ⁻⁵)	(2,33e ⁻³)	(2,26e ⁻⁴)				

Em que: $\beta_{i's}$ = coeficientes estimados; RMSE = Root mean square of error (Raiz quadrada do erro quadrático médio); R² = coeficiente de determinação; ρ = parâmetro autoregressivo estimado pelo ajuste.

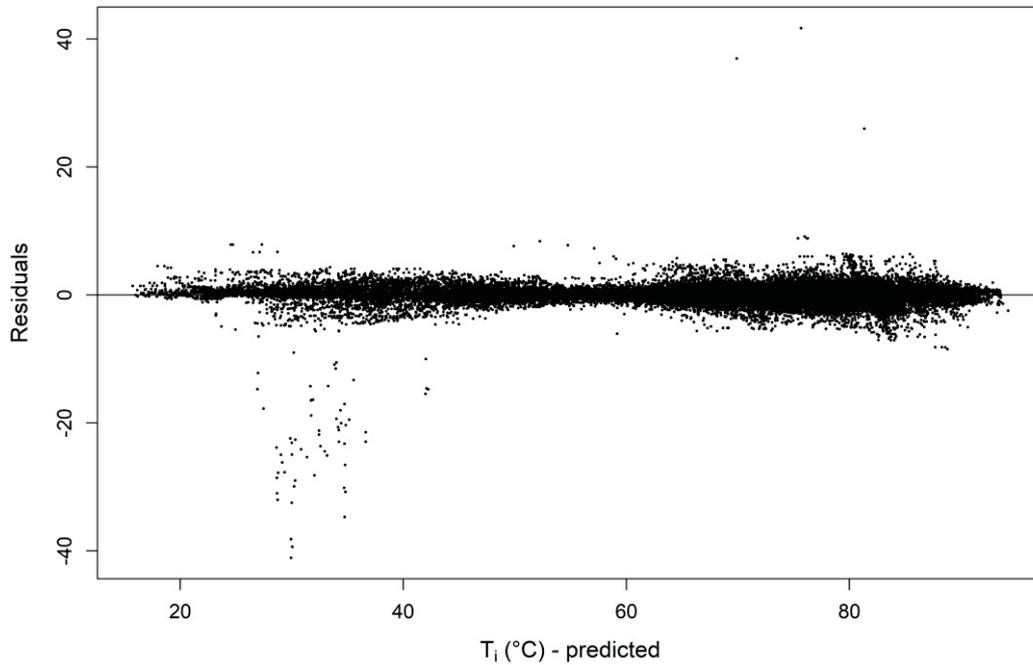
Fonte: A autora (2024).

$$Ti (\text{°C}) = \beta_0 + \beta_1 \text{tempo} + \beta_2 \text{umi} + \beta_3 \text{tbs} + \beta_4 \text{esp}[2] \quad (7)$$

Fonte: A autora (2024).

Nota-se, pelo baixo valor do erro padrão da estimativa, e pelo alto valor do coeficiente de determinação que a equação modelada generalizou bem. A representação da dispersão residual está apresentada na Figura 19. A partir da correlação entre os dados estimados e os dados experimentais foi observado que a análise corrobora com as estatísticas. Observa-se que houve homoscedasticidade, indicando que os resíduos possuem uma variância constante ao longo dos valores previstos da variável dependente, o que é uma condição desejável para garantir a confiabilidade da estimativa.

Figura 19 - DISPERSÃO RESIDUAL DOS DADOS PREDITOS PARA A TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

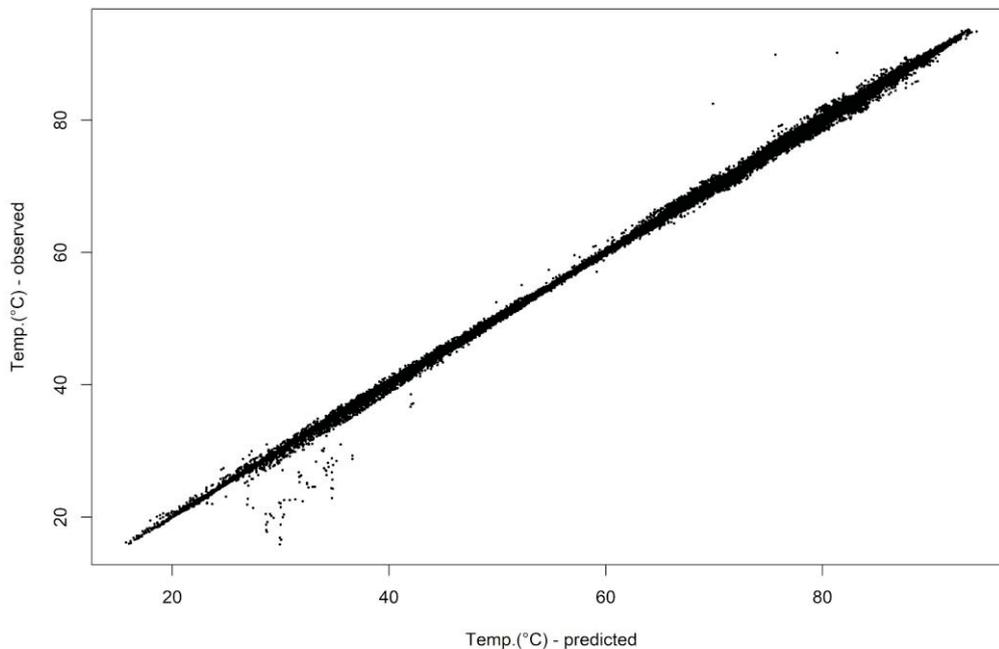


Em que: T_i (°C) – Predicted: Temperatura interna da madeira de *Pinus* sp. predita

Fonte: A autora (2024).

Os valores ajustados em relação aos valores observados da temperatura interna da madeira estão apresentados na Figura 20. A plotagem demonstra que o comportamento entre os dados analisados ocorreu de acordo com o esperado, com a interseção de uma reta, ou seja, uma relação de aproximadamente 1 para 1.

Figura 20 - VALORES AJUSTADOS EM RELAÇÃO AOS VALORES OBSERVADOS DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA

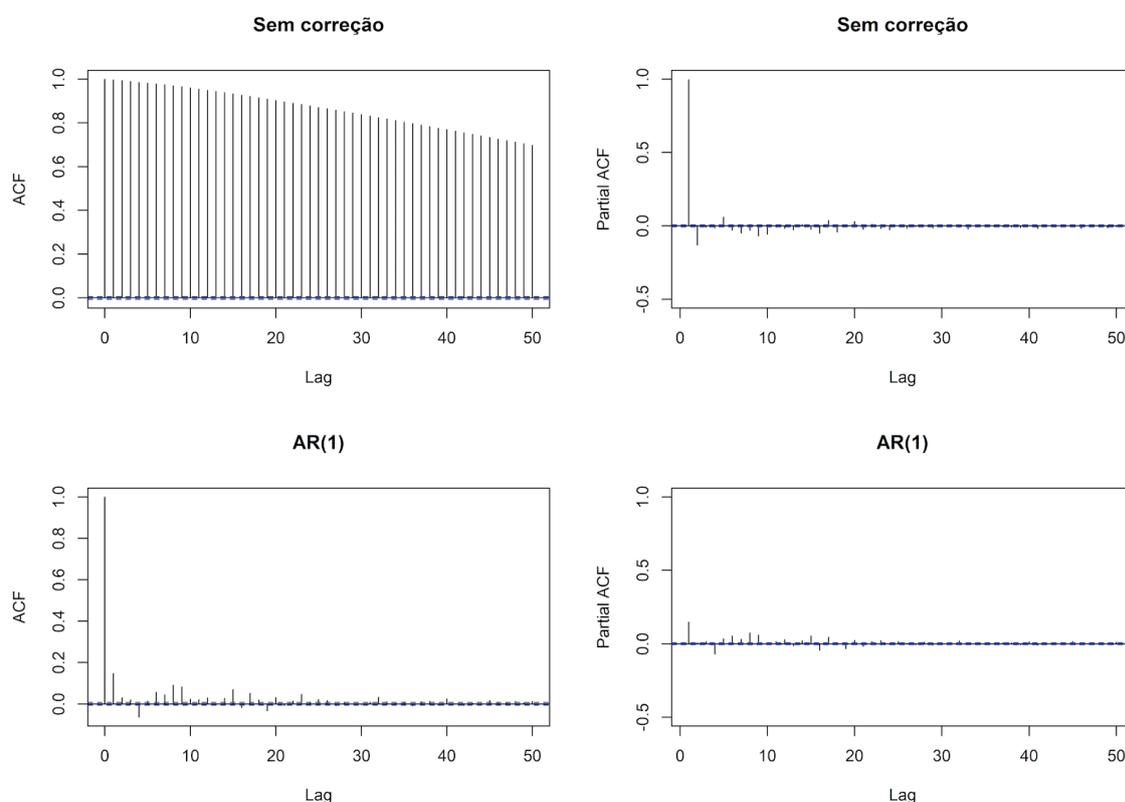


Em que: Tem. (°C) – observad: Temperatura interna da madeira observada; Temp. (°C) – predicted: Temperatura interna da madeira predita.

Fonte: A autora (2024).

Assim, com intuito de aperfeiçoamento do ajuste realizado, utilizou-se da análise gráfica ACF e Partial ACF, para verificar a minimização da autocorrelação, de forma a contrastar os ajustes sem a utilização do (AR(1)) e após a sua utilização. Os gráficos do ajuste das medidas diagnósticas de autocorrelação com valor atual baseado imediatamente no valor anterior (AR(1)), estão dispostos na Figura 21.

Figura 21 - GRÁFICOS DO AJUSTE DAS MEDIDAS DIAGNÓSTICAS DE AUTOCORRELAÇÃO COM VALOR ATUAL BASEADO IMEDIATAMENTE NO VALOR ANTERIOR AR(1).



Fonte: A autora (2024).

Uma vez constatada a autocorrelação dos dados analisados, com valores próximos de 1 (visto que as medidas são próximas e igualmente espaçadas no tempo), justificou-se a utilização do modelo (AR(1)) e houve uma redução dessa correlação. Ao aplicar-se o modelo autorregressivo de 1º ordem na função de autocorrelação parcial, ou seja, apenas a correlação direta entre uma observação e suas observações anteriores, sem os efeitos das observações intermediárias, obteve-se resultado satisfatório, com a maior minimização da correlação entre as medidas em relação ao modelo sem a correção.

Na validação do modelo verificou-se por meio das estatísticas utilizadas, o modelo se adequa tanto para o banco de dados do ajuste quanto para o banco de dados que não participou do ajuste. As estatísticas de validação estão dispostas na Tabela 16.

Tabela 5 - ESTATÍSTICAS DE VALIDAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Estatística	Valor
MAE (°C)	3,98
MPE (%)	5,98
RMSE (%)	7,32

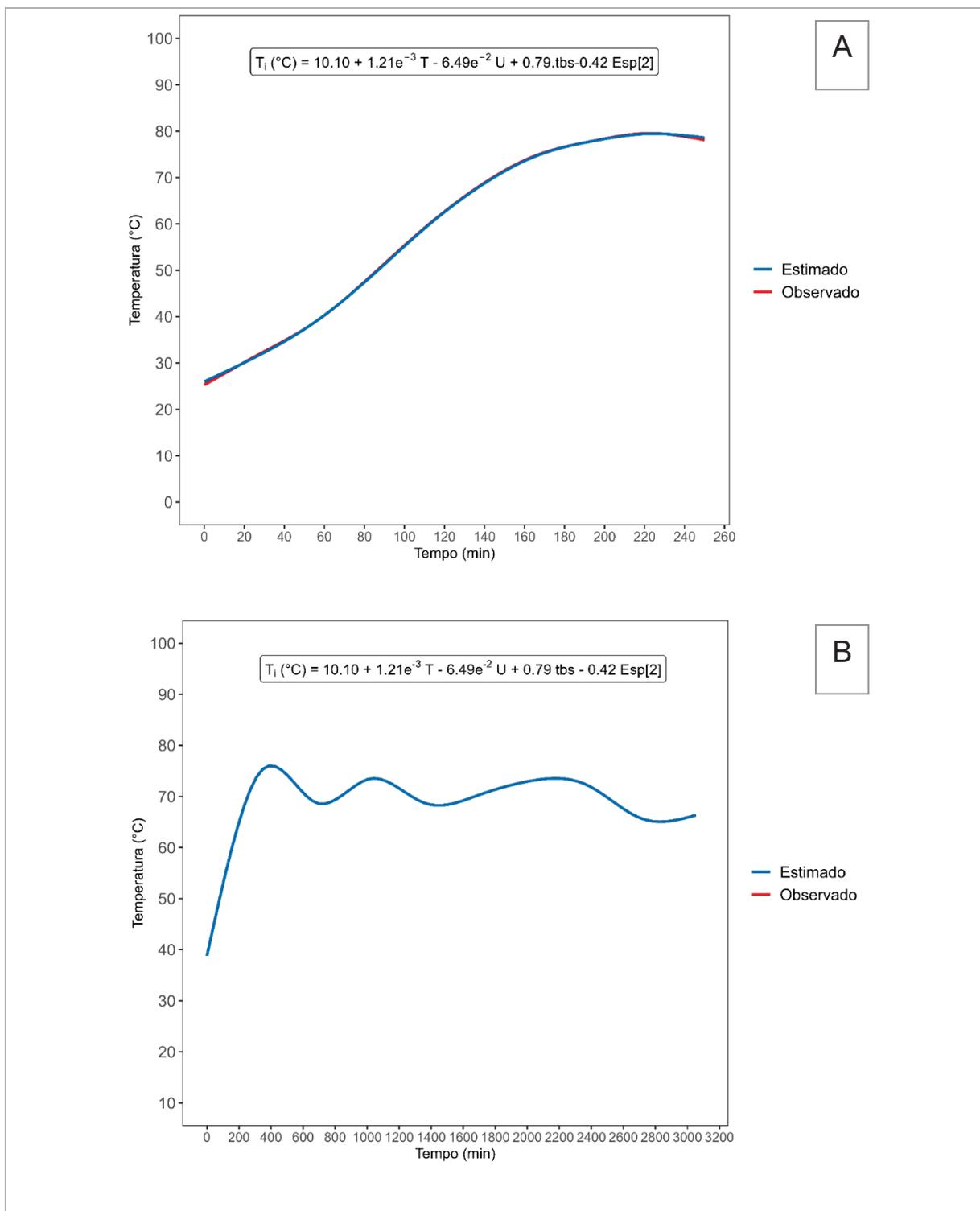
Em que: MAE = mean absolute error (erro absoluto médio); MPE = Mean percentagem error (média do erro percentual); RMSE = Root mean square of error (Raiz quadrada do erro quadrático médio).

Fonte: A autora (2024).

O modelo estatístico desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado então para as diferentes fases da secagem, por se tratar de um modelo que foi ajustado com dados experimentais a partir de condições semelhantes ao setor madeireiro. Para isso a análise experimental para o desenvolvimento do modelo passou por todos os processos que ocorrem normalmente nas estufas industriais de secagem da madeira: ventilação forçada, vaporização por meio de caldeira, controle dos parâmetros dos processos, entre outros.

A estimativa da curva dos dados ajustados e experimentais de aquecimento interno da madeira de *Pinus* sp. está representada na Figura 22. Os dados preditos e experimentais foram dispostos ao longo do tempo na fase de aquecimento e fase de secagem completa por meio do modelo estatístico desenvolvido.

Figura 22 - CURVA DOS DADOS EXPERIMENTAIS E AJUSTADOS DE TEMPO DE AQUECIMENTO INTERNO DA MADEIRA DE *Pinus* SP. DURANTE FASE DE AQUECIMENTO (a) E SECAGEM COMPLETA PARA TODOS OS TRATAMENTOS (b)



Fonte: A autora (2024).

É possível observar na Figura 22a) que ocorre uma pequena variação entre os dados experimentais e os dados ajustados nos primeiros 30 a 40 minutos de secagem. Tal fato pode ser justificado por se tratar da fase inicial da secagem, onde todos os sensores e equipamentos estão no início do processo, ou seja, onde ainda está ocorrendo o aumento gradativo da temperatura em condições de elevada umidade do ar (ANANÍAS; VENEGAS, 2005). No entanto, observa-se que nos minutos seguintes ocorreu uma excelente sobreposição dos dados ajustados aos dados experimentais.

Após aproximadamente 240 minutos, ocorre novamente uma pequena variação entre os dados experimentais e os dados ajustados, isso ocorre porque nesse tempo inicia-se a mudança de fase da secagem, com variações entre TBU, TBS, UR, UM, entre outros. Durante esse período as variações provocam mudanças também na temperatura interna da madeira, que busca se adaptar ao ambiente, porém nos minutos seguintes (Figura 22b), ocorre novamente uma excelente sobreposição dos dados ajustados aos dados experimentais.

Em um modelo de regressão, a obtenção do valor do R^2 próximo de 1 mostra que as variáveis independentes explicam com precisão a variação da variável dependente, logo, é um indicativo de um bom ajuste. Alguns estudos anteriores e com objetivo semelhante ao da presente pesquisa foram desenvolvidos e também obtiveram bons resultados.

Um exemplo é a pesquisa desenvolvida por Santini e Tomaselli (2001), que embora parecida, o intuito era de estimar a umidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm com 25 mm de espessura a diferentes temperaturas. Os pesquisadores utilizaram análise de regressão para correlacionar a relação entre temperatura de bulbo úmido (TBU) com temperatura interna (TI) e umidade da madeira. Embora tenha-se alcançado uma boa correlação ($0.97 < r < 0.99$) entre as duas variáveis em todos os processos de secagem estudados, houve falta de definição de um valor indicador para o ponto final do processo de secagem, e sugeriram o desenvolvimento de mais estudos antes da modelagem ser usada em escala industrial.

A simulação do aquecimento da madeira de *Pinus* sp. também foi realizada em pesquisa anterior para diferentes espessuras, teores de umidade e densidades básicas (FRANÇA, et al., 2012). Os autores também reproduziram dados com baixo nível de erros, evidenciando assim que os modelos utilizados são bastante promissores para aplicações em outros segmentos, sendo uma ferramenta de apoio em tomadas de decisão.

Ainda, a análise da transferência combinada de calor e massa (umidade) foi realizada para madeira de *Pinus eliottii* submetida a condições de secagem em estufa convectiva convencional (BRANDÃO et al., 2022). Os autores notaram que a análise matemática em relação aos dados experimentais de outros pesquisadores resultou nos valores de R^2 de 0,909 para a temperatura. Além disso, os resultados de simulação podem auxiliar na análise dos mecanismos da secagem da madeira, predizendo de maneira satisfatória as principais variáveis do processo, reduzindo assim custos de testes operacionais e os riscos de perda de material.

Um estudo numérico experimental semelhante também foi realizado com o objetivo de explicar a transferência de calor na madeira de *Pinus taeda*, com 25 mm de espessura, durante a fase de aquecimento da secagem (FERNANDES; COSTA; THOMAS, 2006). Ao contrário da presente pesquisa, a estimativa dos dados por meio do modelo estatístico desenvolvido pelos autores não apresentou boa concordância com os resultados experimentais. Além disso, os autores relataram que são necessários aproximadamente 35 min para que o ponto central da tábua seca atinja a temperatura de 56 °C.

Outro trabalho anterior também tentou estimar a temperatura interna da madeira de coníferas em função da temperatura do ambiente, apenas por meio de dados experimentais, a fim de garantir as especificações da NIMF 15 (ALÉON, 2004). O autor usou diferentes espessuras da madeira, peças com teor de umidade acima e abaixo de 25% e diferentes temperaturas de secagem. Foi alcançado tempo de aquecimento interno de aproximadamente 47 minutos para as peças com 22 mm a diferentes temperaturas.

Neste trabalho verificou-se que o tempo para que o centro das peças com espessura e teor de umidade próximas atingissem 56°C, foi de aproximadamente 94 minutos. Resultado superior às pesquisas relatadas anteriormente, mas em concordância com estudo semelhante realizado no Chile, para validação de protocolo padrão para certificar a secagem industrial da madeira de *Pinus radiata* (ANANÍAS et al., 2013). Os autores relatam que para peças de 24 mm, foram necessários 91 minutos para o aquecimento interno da madeira.

Os mesmos autores mostraram que foi possível prever o tempo de aquecimento interno da madeira com 8,1% de desvio padrão dos valores experimentais, por meio de modelagem desenvolvida em estudo anterior, onde a previsão do tempo de aquecimento interno da madeira foi em função da temperatura do ar saturado e da espessura da madeira (ANANÍAS; VENEGAS, 2005).

15 serrarias no Chile, operando um total de 40 fornos adotaram o método desenvolvido por Ananías et al., (2013) para certificar seus processos de secagem. Isso demonstra que modelagens já são utilizadas em outros países como método para comprovar com eficiência o tratamento fitossanitário da madeira.

Visto que a presente pesquisa apresenta bons resultados, com menos de 0,5% de variação entre os dados estimados e os observados, realizou-se nova modelagem matemática, especificamente para a fase de aquecimento visando estimativa para tempo necessário para realização de tratamento fitossanitário. O modelo desenvolvido apresentou um bom ajuste, pois é capaz de capturar 79% da variação dos dados em relação à média da variável dependente (Tabela 17), porém mais testes se fazem necessário.

Tabela 6 - TABELA COM COEFICIENTES ASSOCIADOS ÀS VARIÁVEIS E AS ESTATÍSTICAS (FASE DE AQUECIMENTO)

β_0	β_1	β_2	β_3	RMSE (Min)	RMSE (%)	R ²
64,85	-20,55	1,55	-6,30	5,63	10,79%	0,79
(1,25)	(1,25)	(1,25)	(1,25)			
<0,005*	<0,005*	<0,005*	0,22*			

Em que: $\beta_{i's}$ = coeficientes estimados; RMSE = Root mean square of error (Raiz quadrada do erro quadrático médio); R² = coeficiente de determinação; * P-valor.

Fonte: A autora (2024).

Observa-se que o coeficiente “espessura” não foi significativo para o modelo, resultado diferente do modelo estatístico considerando a secagem completa, no qual essa variável foi importante. Esse fato pode ser explicado pelo motivo que os dados foram coletados apenas na fase de aquecimento, no qual todo sistema da estufa é aquecido lentamente. Como visto na Tabela 13, não houve interação significativa entre as variáveis analisadas e a temperatura interna da madeira na fase de aquecimento.

Os parâmetros estatísticos da equação para o modelo genérico, testados para descrever o tempo de aquecimento interno da madeira na fase de aquecimento, em função da temperatura, teor de umidade da madeira e espessura da madeira, assumiram a equação 8. Mesmo diante da necessidade de mais análises com mais variações nas espessuras da madeira, uma prévia de aplicação prática da estimativa de tempo para tratamento fitossanitário da madeira de *Pinus* sp. foi

realizada (Tabela 18). Tal estimativa foi realizada com modelagem baseada apenas nos dados experimentais da fase de aquecimento da madeira, não da secagem completa como o modelo anterior.

$$Tempo_{min} = \beta_0 + \beta_1 TBS[90^\circ C] + \beta_2 Class_{esp[2]} + \beta_3 Class_{umi[verde]} + e \quad (8)$$

Fonte: A autora (2024).

Tabela 7 - APLICAÇÃO PRÁTICA DA ESTIMATIVA DE TEMPO PARA TRATAMENTO FITOSSANITÁRIO DA MADEIRA DE *Pinus* SP.

Temperatura inicial da madeira de 37°C						
Espessura (mm)	TBS (°C)	Classe de umidade	Tempo até atingir 56°C (min)	HT conforme NIMF 15 (min)	<u>Estimativa de tempo até atingir 56°C (min)</u>	<u>Estimativa de HT conforme NIMF 15 (min)</u>
40	75	Verde	60	90	58,5	88,5
22	90	Verde	42	72	38	68
22	75	Seca	64	94	64,8	94,8
22	90	Seca	43	73	44,3	74,3
40	90	Seca	65	95	64,8	94,8

Fonte: A autora (2024).

O modelo desenvolvido foi inspirado no modelo desenvolvido por Ananías et al., (2013), porém os resultados apresentados na aplicação prática baseada no modelo estatístico (Equação 8) não foram exatos em relação aos valores observados. Isso evidencia a necessidade de mais pesquisas com alternâncias entre espessura das peças de madeira, temperaturas do ambiente de secagem e mais classes de umidade da madeira.

Além disso, disponibilizar mais espécies é uma proposta importante para melhoria do ajuste. Embora os resultados não tenham sido exatos, houve pouca variação entre o tempo observado e o tempo estimado para a madeira atingir 56°C, o que é esperado pelo erro do modelo ajustado, de aproximadamente 10,79%. O modelo pode ser utilizado industrialmente, desde que realizados com ajuste de tempo superior ao estimado, assim como recomendado por Ananías et al., (2013), com um coeficiente de segurança de 1,2 vezes o valor estimado. A equação de

regressão linear múltipla criada pelos autores auxiliou várias serrarias no Chile a atenderem as normas da ISPM 15.

Dessa forma acredita-se ser este um passo importante para novos métodos de certificação sanitária da madeira também no Brasil. Isso irá otimizar o processo de tratamento fitossanitário da madeira em estufa de secagem convencional. Espera-se que essas informações sejam uma ferramenta útil para orientar decisões relacionadas ao tratamento térmico de acordo com o especificado pela NIMF 15.

5. CONCLUSÕES

Os programas de secagem desenvolvidos para diferentes classes de teor de umidade da madeira de *Pinus* sp. foram controlados pela umidade das peças e concluídos ao atingir a média de teor de umidade final desejado. Isso demonstrou eficiência na redução do tempo de secagem e mínima porcentagem de defeitos. As peças de maiores larguras apresentaram maior propensão a defeitos como encanoamento e encurvamento, porém de natureza leve.

Durante a fase de aquecimento, a análise estatística mostrou uma correlação positiva, porém fraca, entre a temperatura interna da madeira e variáveis como o tempo, TBS e o teor de umidade. Já durante a secagem completa, a análise estatística mostrou que houve correlação forte e positiva entre a temperatura interna da madeira e o TBS, com uma correlação de 0,97. Logo, a secagem completa foi mais responsiva para a estimativa da temperatura interna da madeira.

O modelo estatístico desenvolvido para estimar a temperatura interna da madeira apresentou alta precisão e foi validado com um erro padrão de 0,34 e um coeficiente de determinação de 0,99, demonstrando robustez e generalização eficaz. A correlação entre os dados estimados e experimentais confirmou a validade do modelo, com um erro percentual médio de apenas 5,98%.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho descreve quali-quantitativamente o avanço das publicações sobre tratamento fitossanitário da madeira em torno da NIMF 15, não apenas no Brasil, mas em todo o mundo. Há um panorama científico geral sobre os tipos de tratamento fitossanitários aceitos atualmente e os tratamentos e protocolos que estão em busca de implementação pela norma vigente.

Observou-se um avanço no que se refere a tratamentos fitossanitários mais ambientalmente corretos em busca de implementação, com ênfase em uso de biocidas em tratamentos iniciais ou combinados para a madeira. Há demanda por substituição do MB durante a fumigação de ESM e substâncias químicas menos agressivas, como *sulfuryl fluoride*, *bromomethane* e *ethanedinitrile*, tem demonstrado resultados satisfatórios. Pesquisas com micro-ondas, aquecimento dielétrico e aquecimento joule tem ganhado notoriedade como ampliação das opções para tratamento térmico da madeira.

A partir de análises experimentais, este trabalho descreve uma investigação estatística precursora para prever a temperatura interna da madeira e otimizar o tempo e dispêndio financeiro envolvidos no tratamento fitossanitário da madeira por tratamento térmico – HT em estufa convencional. O ajuste entre os dados experimentais de temperatura central da madeira em função das variáveis analisadas, apresentou coeficientes de correlação satisfatórios acima de 0,98. Porém será necessária uma avaliação futura por meio de dados em escala industrial.

O modelo estatístico desenvolvido nesta tese representa um passo a mais para a certificação sanitária da madeira no Brasil, sugerindo aplicação em diferentes fases da secagem e contribuindo para a otimização de tratamento fitossanitário da madeira por HT em estufa de secagem convencional. As mais exigentes empresas exportadoras de madeira podem inovar nos seus sistemas de automação adaptando ao modelo estatístico desenvolvido desta tese. Dessa forma será possível estimar a temperatura interna da madeira em tempo real e fornecer laudos de curva de aquecimento interno da madeira cada vez mais precisos para o MAPA. A modelagem aqui apresentada tem potencial para tornar dispensável o uso de sensores na madeira durante o HT.

Como recomendações para pesquisas futuras recomenda-se estudos para aplicação desse modelo estatístico em outras espécies de madeira e em diferentes condições de secagem. Dentre possíveis espécies, a madeira de *Eucalyptus* spp. é indispensável. Além disso, uma demonstração de análise dos impactos econômicos sofridos pelo Brasil antes e após a implementação da NIMF

15 serão valiosos, bem como estudos de políticas que incentivem boas práticas para a conformidade com a norma. Espera-se que essa pesquisa sirva de ferramenta para aceitação de novos protocolos para diversos métodos de tratamentos fitossanitários da madeira, não apenas tratamento térmico por secagem em estufa convencional, e não apenas para as regulamentações do Brasil para o trânsito de ESM.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUÊS, T. A. S.; MARIA, D. D. M. B.; MADI, J. P. S.; BEHLING, A.; BATISTA, D. C.; CADEMARTORI, P. H. et al., Air-drying performance of three genotypes of teak wood. **BioResources**, 19(3), 6215. 2024.
- ALÉON, D. Traitement phytosanitaire du bois par chauffage à cœur. **EPPO Bulletin**, v. 34, n. 1, p. 133–138, 2004.
- ANANÍAS, R. A. et al., Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. **Wood and Fiber Science**, v. 45, n. 1, p. 98–104, 2013.
- ANANÍAS, R. A.; VENEGAS, R. Industrial drying of radiata pine. Heat terilization time and temperature development. **Maderas-Cienc Tecnol** v. 7, n. 3. p. 179-188. 2005.
- AQUINO-GONZÁLEZ, L. V. et al., Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*). **Madera y Bosques**, v. 16, n. 2, p. 35–46, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941. Madeira-Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 107p. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11.700 (CB-205): madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral: medição e quantificação de defeitos. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.297 (NB-1381): madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.
- BATISTA, D. et al., Analysis of the kiln drying process of a sawmill in Espírito Santo state, Brazil: **a case study**. 23 nov. 2017.
- BONAZZA, M. et al., Efeito da idade, sortimento e tempo de estocagem na densidade verde da madeira de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 735–756, 9 set. 2022.
- BRANDÃO, A. F. C.; BIRCHAL, V. S.; COSTA JUNIOR, E. F.; COSTA, A. O. S. Resolução numérica e análise do transporte simultâneo de calor e massa durante o processo de secagem da madeira de *Pinus elliottii*. **Revista Principia**. 2022.
- BRANDÃO, A.T.O. **Determinação de Metodologia para a Indicação de Programas de Secagem de Madeiras**. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- CADEMARTORI, P. H. G. DE et al., Qualidade da madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm. procedente de florestas resinadas. **CERNE**, v. 18, p. 577–583, dez. 2012.

CINIGLIO, G. **Avaliação da Secagem de Madeira Serrada de *E. grandis* E *E. urophylla***. 1998. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de Concentração: Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

DUCATTI, M. A. **Diagnóstico da secagem convencional de madeiras no Estado de São Paulo** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2000.

ESCOVEDO, T. **Implementando um Modelo de Classificação no Scikit-Learn***. Medium, 19 mar. 2021. Disponível em: <https://tatianaesc.medium.com/implementando-um-modelo-de-classifica%C3%A7%C3%A3o-no-scikit-learn-6206d684b377>.

FERNANDES, L. P.; COSTA, V. J.; THOMAS, G. C. **Modelagem matemática da secagem de madeira em estufas - fase de aquecimento**. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT- ABCM, Curitiba, Brazil, 2006.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. DE. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 157–174, 2013.

FRANÇA, F. J. N.; BATISTA, D. C.; COSTA JR, E. F. **Modeling of heat transfer in *Pinus* sp.** Série Técnica - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v. 15, p. 26, 2012.

FRANÇA, R. F. **Correlação estrutura/propriedades das madeiras termotratadas de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* spp.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. 2019.

FU, Z. et al., Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. **Polymers**, v. 15, n. 15, p. 3295. 2023.

GALVAO, A. D., & JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. 1985.

GARBE, E. A. **Fatores influentes na secagem convencional de *Pinus taeda* com ênfase em trincas superficiais**. UFPR, Curitiba. 2006.

HERRERA-DÍAZ, R. et al., Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. **Drying Technology**, v. 36, n. 5, p. 537–544, 2017.

HIGA, A. R.; KAGEYAMA, P. Y.; FERREIRA, M. **Variação da densidade básica da madeira de *P. elliotii* Var. *elliotii* e *P. taeda***. 1973.

JORDAN, J. **Evaluating a machine learning model**. Disponível em: <<https://www.jeremyjordan.me/evaluating-a-machine-learning-model/>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

KAUMAN, W.G.; MITTAK, Y G. The effect of thermal degradation on shrinkage and collapse of wood from 3 Australian species, **Forests Product Journal**, v. 11, n. 9, p. 445-452. 1966.

KEINE, S. **Avaliação do processo de secagem de madeira em estufa com banho de vapor**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria. 1997.

KIM, M.-J.; SHIN, H.-K.; KIM, G.-H. Estimation of Heat Sterilization Time of Chinese Laminae Species Used in The Production of Glue-laminated Board. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 44, n. 5, p. 760–766, 2016.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem de madeira**. Tese. (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. 2002.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1968.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975.

LARSEN, F.; ORMARSSON, S.; OLESEN, J. F. Moisture-driven fracture in solid wood. **Wood Material Science and Engineering**, v. 6, n. 1–2, p. 49–57, mar. 2011.

LIEBL, O. A.; et al., Influência dos Parâmetros Dimensionais da Pilha na Qualidade da Madeira de *Eucalyptus* spp. Submetida à Secagem ao Ar. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00105514, 31 ago. 2017.

MAPA, I. **PORTARIA MAPA Nº 514, DE 8 DE NOVEMBRO DE 2022 - DOU - Imprensa Nacional**. 2022a. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou>>. Acesso em: 31 mar. 2024.

MAPA. **Instrução Normativa Mapa nº 32/2015**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/aduana-e-comercio-exterior/manuais/despacho-de-importacao/legislacao/outras-normas/instrucao-normativa-mapa-no-32-2015>>. Acesso em: 5 fev. 2024.

MARIA, D. M. B.; CALEGARIO, N.; SOARES, B. C. D.; OLIVEIRA B. D. Y.; LIMA, J. T. Changing the calculated surface area of wood samples to define drying schedules for *Eucalyptus* clones. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 2022.

MARTINS, A. P. M. et al., Estimativa do Afilamento do Fuste de Araucária Utilizando Técnicas de Inteligência Artificial. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 0, 2017.

MARTINS, M. D. F., OLIVEIRA, L. D. S., & COELHO, B. Taxa de secagem da madeira de *pinus elliottii* engelm. De diferentes espessuras. 2009. Disponível em: https://www2.ufpel.edu.br/cic/2009/cd/pdf/EN/EN_00378.pdf

MOURA, V. P. G. & SANTIAGO, J. Densidade básica da madeira de espécies de pinus tropicais determinadas através de métodos não destrutivos. **EMBRAPA**. Boletim de pesquisa, n. 33, 1991.

NIGGL, J. **Wood Warping and How to Prevent It**. 2024. Disponível em: <<https://www.intouch-quality.com/blog/wood-warping-and-how-to-prevent-it>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

OLIVEIRA, L. S.; RECH, A. M. Importância da Secagem da Madeira. 2021. LASEMA – CENG – UFPEL. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/lasema/files/2021/10/Informe-02-Importancia-da-secagem-da-madeira.pdf>>.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying - A review. **BioResources**, v. 2, n. 4, p. 789–811, 9 set. 2007.

PERRÉ, P. **Fundamentals of wood drying**. European Cost. 2007.

PLYWOOD, C. L. &. **How To Store Lumber To Prevent Warping. Curtis Lumber & Plywood**. 2020. Disponível em: <<https://www.clp-inc.com/how-to-store-lumber-to-prevent-warping/>>. Acesso em: 22 jan. 2024

PONCE, R.M., WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília. 1985. 70 p. il. (Série Documentos, 22).

SALINAS-LIRA, C.; ET AL., Recuperação de empenamento em madeira serrada de pinho radiata por tratamento a vapor. **BioResources**. 2018. Disponível em: <<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. Control of the drying process through the relationship of wood and wet-bulb temperatures. *Drying Technology*, 19(1), 127-135. 2001.

SANTINI, E.J. **Métodos usuais de secagem de madeira**. I Seminário sobre secagem de In: I Seminário sobre Secagem Da Madeira. Santa Maria: FSM/CEPEF/FATEC, 1992.

SANTOS, L. L. et al., **Correlação da resistência à compressão paralela às fibras de madeira de *Pinus* sp. em corpos de prova isentos de defeitos e peças estruturais**. 2017, **Anais**. Buenos Aires, Argentina: UNNOBA, 2017. Disponível em: <http://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T3-15.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2024.

SHELLY, J. R.; ARGANBRIGHT, D. G.; BIRNBACH, M. Severe Warp Development in Young-Growth Ponderosa Pine Studs. **Wood and Fiber Science**, p. 50–56, 1979.

SIAU, J. F. **Transport Processes in Wood**. Berlin, Heidelberg: Springer, v. 2, 1984.

SIMPSON, W. T. **Dry Kiln Operators Manual**. Agric. Handbook AH-188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1991.

SKAAR, C. **Water in Wood**. Syracuse University Press, p. 218, 1972.

SMITH, S. T. **Drying Lumber**. Milwaukie Hardwoods, LLC. 2023. Disponível em: <<https://milwaukiehardwoods.com/drying-lumber/>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

Soares, B. C.D.; Lima, J.T.; Silva, J. R. M. Analysing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(4), 543-554. 2016.

SOUZA, G. O. DE et al., **Avaliação da qualidade da madeira comercializada no município de Mossoró, RN - Um estudo de caso.** | Brazilian Journal of Wood Science / Revista Ciência da Madeira. 2018.

SOUZA, L. F. D.; et al., Estudo experimental da secagem de tábuas de *Pinus taeda*: efeito das variáveis do processo sobre a velocidade de secagem e defeitos gerados no material desidratado. Em: AYOUB, J. P.; OLIVEIRA, M. R. N. D. (Eds.). **Desvendando a Engenharia: sua abrangência e multidisciplinaridade.** v. 2, n. 1. p. 246–267, Editora Científica Digital, 2021.

TALGATTI, M. et al., Gradientes de umidade e suas implicações nas tensões de secagem, quantidade e dimensões de rachaduras na madeira de *eucalyptus tereticornis* aos 15 anos. **Revista do Instituto Florestal**, v. 31, n. 1, p. 65–74, 27 jan. 2019.

TAMME, H.; MUISTE, P.; TAMME, V. Optimizing the pine wood drying process using a critical diffusion coefficient and a timed moistening impulse. **Forestry Studies**, v. 75, n. 1, p. 150–165, 2022.

TAVARES, E. L. **Avaliações de métodos para redução de rachaduras de topo de toras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná). 2013.

TEIXEIRA, M. M.; et al., Uso de diferentes técnicas para descrição da altura de um plantio monoespecífico de angico-vermelho. **Agrarian Academy**, v. 6, n. 11, p. 340–353, 2019.

TERAZAWA, S. Methods for easy determination of kiln drying schedules of wood. **Wood Industry**, v.2, n.5, 8p. 1965.

TOMAZELLO FILHO, M. T. Variação radial da densidade básica e da estrutura. **IPEF**. n. 29, p.37-45, 1985.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Sci. For.**, v. 42, n. 101, 2014.

UFF. **Aprendizado de Máquinas com R | Ciência de dados.** 2024. Disponível em: <<https://cienciadedados.uff.br/aprendizado-de-maquinas-com-r/>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

WANG, X.; BERGMAN, R. D.; MACE, T. Heat sterilization of ash (*Fraxinus* spp.) firewood: Heat-treating options, temperature monitoring and thermal verification. **Wood Material Science and Engineering**, v. 5, n. 2, p. 104–109, 2010.

ZANUNCIO, A.; et al., Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply. **CERNE**, v. 23, p. 147–152, 1 jun. 2017.

ZEN, L. R. et al., Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291–298, 1 jul. 2019.

ZEN, L. R. **Métodos combinados para secagem da madeira de *Eucalyptus*: pré-secagem ao ar livre com secagem em estufa convencional**. 105 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. 2016.