

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE HORTÊNSIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

ANDRÉ AUGUSTO BRODT

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓ-
GICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE

SÃO FRANCISCO DE PAULA

2022



uergs

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Hortênsias

ANDRÉ AUGUSTO BRODT

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ambiente e Sustentabilidade, da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Clódis de Oliveira
Andrades Filho

Co-orientador: Dr. Juliano Morales de
Oliveira

SÃO FRANCISCO DE PAULA

2022

Catálogo de publicação na fonte (CIP)

B864p Brodt, André Augusto

Processamento digital de imagens aplicado à análise dendrológica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze/ André Augusto Brodt. – São Francisco de Paula, 2022.

57 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade, Unidade Hortênsias, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Clódís de Oliveira Andrades Filho

Coorientador: Prof. Dr. Juliano Morales de Oliveira

1. Anatomia Vegetal. 2. Dendrologia. 3. Processamento Digitais de Imagens. 4. Dissertação. I. Andrades Filho, Clódís de Oliveira. II. Oliveira, Juliano Morales de. III. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Mestrado Profissional em Ambiente e Sustentabilidade, Unidade Hortênsias. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Marcelo Bresolin CRB 10/2136

Apresentação:

Prefácio:

Revisão textual:

Editoração:

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - Unidade Hortênsias

Rua Santos Dumond, 450

CEP: 95400-000 - São Francisco de Paula, RS

www.uergs.edu.br

ANDRÉ AUGUSTO BRODT

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ambiente e Sustentabilidade, da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Clódis de Oliveira Andrades Filho

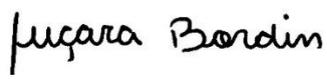
Co-orientador: Dr. Juliano Morales de Oliveira

Aprovada em: 23/02/2022.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Dr. Clódis de Oliveira Andrades Filho
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Dra. Juçara Bordin
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - PPGAS



Dra. Elaine Biondo
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - PPGAS



Ma. Fabiane Wiederkehr
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – Unidade em Sananduva

AGRADECIMENTOS

Certa feita um paleontólogo dedicou ao asteroide que atingiu a Terra e, conseqüentemente extinguiu os dinossauros, sua dissertação de mestrado. Sem a extinção conhecida como evento KT, entre os períodos Cretáceo (K) Terciário (T), sua matéria de estudo conseqüentemente não existiria. Seguindo o mesmo preceito, sinto a necessidade de agradecer primeiramente ao botânico alemão Carl Ernst Otto Kuntze, que em 1922 retificou definitivamente a taxonomia da espécie *Araucaria angustifolia* como a conhecemos até os dias de hoje. Mas o que seria do asteroide, dos dinossauros, do paleontólogo, da Araucária, do botânico até mesmo desse ser humano que digita estas simples letras em seu computador nesta manhã fria deste ano pandêmico de 2021 sem seu criador? Um passo sem direção. Assim, devo a Deus e a toda sua energia vital, assim como devo à minha amada companheira de caminhada Tatiane Macedo e à minha querida filha Eduarda de Macedo Brodt pela paciência nos dias de insanidade, que não foram poucos, uma Nau da loucura no mar das ideias como diria o cantor e compositor Vitor Ramil.

Obrigado a todos e todas!

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida através da linha de pesquisa “Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento” e representa uma nova proposta de análise referente a espécie arbórea *Araucaria angustifolia*. Através da parceria técnico-científica com a Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, na pessoa do professor Dr. Juliano Morales de Oliveira, foi possível acessar informações sobre o tema central dessa dissertação que jamais seriam possíveis, seja na disponibilidade dos recursos físicos como intelectuais.

A pesquisa avançou no sentido de sedimentar o conhecimento já existente referente aos padrões de desenvolvimento dos tecidos de *Araucaria angustifolia* e sua relação com aspectos do ambiente de ocorrência da espécie, associando novas perspectivas de análise a partir do Processamento Digital de Imagens – PDI, área de concentração prática e intelectual do professor e meu orientador, a quem devo muito, Dr. Clódis de Oliveira Andrades Filho, representante institucional da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS e do Laboratório de Gestão Ambiental e Negociação de Conflitos – GANECO, definido com um grupo de pesquisadores associados à mesma universidade e a Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA/RS.

A presente dissertação é apresentada nos seguintes capítulos: (1) Introdução, (2) Revisão da bibliografia (que apresenta a base teórica sobre as técnicas abordadas), (3) Artigo científico, 4) Produto técnico, (5) Considerações finais, além das Referências e Anexos. Vale ressaltar que o artigo será submetido e publicado em periódico científico adequado ao tema abordado.

Em relação ao produto técnico dessa dissertação – item obrigatoriamente exigido para a conclusão do mestrado profissional – apresenta-se o vídeo de divulgação científica, associado ao artigo, intitulado “**PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMA- GENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE**”, vídeo este que contou com recursos exclusivamente viabilizados através da iniciativa da empresa ÁBACO PARTICIPAÇÕES, que concentra entre seus diretores e colaboradores a profunda certeza no valor da ciência como o único caminho para o desenvolvimento de uma sociedade justa e igualitária.

RESUMO

O presente ensaio científico foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento espectral de reflectância aplicada aos tecidos vegetais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze. A partir do Processamento Digitais de Imagens – PDI, através de métodos de melhoramento radiométrico e de modelos de classificação supervisionada, não supervisionada e de interpretação visual dos tecidos (i.e., classificação de referência), foi possível mensurar alterações espectrais nos tecidos vegetais analisados. Diante de uma análise digital, foi possível analisar os distintos comportamentos espectrais relacionados às células traqueídes jovens e tardias que formam por sua vez os anéis anuais de crescimento dos períodos de verão e inverno, objetivo central do ensaio científico que fundamenta a presente dissertação, e que segundo a bibliografia compara, tais alterações identificadas possuem relação entre oscilações de temperatura, sequestro de CO₂ atmosférico, índices de radiação solar, estresse hídrico, entre outros fatores. Os materiais que subsidiaram a pesquisa e posteriormente o ensaio científico foram cedidos pelo Laboratório de Ecologia Vegetal – LEV da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, e se concentram em cinco amostras, em corte transversal do fuste, de distintos indivíduos adultos obtidos em coordenadas geográficas reconhecidas no município de Caxias do Sul/RS. Após a digitalização através de escaneamento das amostras, as mesmas foram processadas pelos softwares Arcgis e Spring, onde foi possível mensurar os valores digitais de brilho dos tecidos vegetais quando expostos às três bandas espectrais visíveis (Red, Green, Blue), aplicando os três modelos de classificação especificamente na banda do azul visível (B). Tal banda espectral monocromática, obteve elevado efeito de classificação em todas as amostras em comparação com as demais bandas visíveis, verde e vermelha (G, R), destacando os menores valores digitais de brilho por conta da densidade do tecido. Dessa forma concluiu-se que o ensaio científico obteve êxito na classificação dos tecidos vegetais, uma vez que foi possível mensurar a densidade do tecido tardio que forma o anel anual de inverno, sendo a classificação supervisionada a que apresentou maior compatibilidade com a classificação de referência.

Palavras-chave: *Araucaria angustifolia*, anéis de crescimento, dendrologia, anatomia vegetal, processamento digitais de imagens, pixel, classificação.

ABSTRACT

Through a digital analysis, applied to plant tissues of *Araucaria angustifolia*, it was possible to analyze the different spectral behaviors of light reflectance related to young and late tracheid cells that in turn form the growth rings of the summer and winter periods. From the Digital Image Processing - PDI, through supervised classification models, non-supervision and visual interpretation of tissues (ie, reference classification), it was possible to measure spectral changes in plant tissues, the central objective of the scientific essay that underlies this present study. This dissertation, and that according to the bibliography compares, such identified changes have a close relationship between temperature fluctuations, atmospheric CO₂ sequestration, solar radiation indices, water stress, among other factors. The materials that support the research and later the scientific testing were provided by the Laboratory of Plant Ecology - LEV at the University of Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, and are concentrated in the first five, in cross-section of the shaft, of different adults treated in geographical coordinates recognized in the city of Caxias do Sul / RS. After digitization through scanning, as processed by Arcgis and Spring software, it was possible to measure the digital brightness values of plant tissues when exposed to the three requested spectral bands (Red, Green, Blue), applying the three classification models specifically in the visible blue band (B). Such a monochromatic spectral band receives a high classification effect in all of the bands compared to the other visible bands, green and red (G, R), highlighting the lowest digital brightness values due to tissue density. Thus, it is known that the scientific test was successful in classifying plant tissues, since it was possible to measure the density of the late tissue that forms the winter annual, with the supervised classification being the one with the greatest compatibility with the reference classification.

Keywords: *Araucaria angustifolia*, growth rings, dendrology, plant anatomy, digital image processing, pixel, classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hipótese da distribuição ancestral da família Araucariaceae no Gondwana (KERSHW; WAGSTAFF, 2001), com o centro de dispersão possivelmente no hemisfério Sul.	16
Figura 2 - Exemplos de interações atmosféricas às quais a espécie vem sendo exposta ao longo de milhares de anos, alterando anualmente as características dos tecidos vegetais que a compõem.	17
Figura 3 - Área de ocorrência natural da espécie nos estados de SC, PR, SP e RJ (hachurado) e a situação e localização geográfica do Estado do RS e o município onde ocorreu a coleta de amostras para o ensaio de pesquisa nesta dissertação (Caxias do Sul/RS).....	18
Figura 4 - Localização da Floresta Ombrófila Mista – FOM, segundo a Lei Federal 11.428 de 2006/IBGE (Brasil, 2006), no município de Caxias do Sul/RS.....	19
Figura 5 - Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – RBMA/VI revisão, neste recorte associando seus zoneamentos ao município de Caxias do Sul/RS.	20
Figura 6 - Características anatômicas dos tecidos vegetais que formam os anéis de crescimento da espécie <i>A. angustifolia</i>	23
Figura 7 - Indica as possíveis alterações atmosféricas que podem alterar o regime fisiológico das espécies arbóreas, assim como efeitos antrópicos como o fogo.	24
Figura 8 - Indica a sequência operacional aplicada em uma das cinco amostras coletadas no município de Caxias do Sul/RS, onde as características físicas e químicas do tecido vegetal apresentaram distintos comportamentos quando absorvidas pela radiação eletromagnética e analisadas a partir do canal do azul visível.	26
Figura 9 - Exemplos das inúmeras interações envolvidas no desenvolvimento da espécie <i>A. angustifolia</i> , que podem ser observadas a partir dos anéis de crescimento.	28
Figura 10 - Indica uma amostra de anéis de crescimento onde se identifica a densidade do tecido vegetal associado ao período de inverno no hemisfério norte.	29

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E EXPRESSÕES

Cenozoico	Era geológica que se iniciou há cerca de 65 milhões de anos
CO ₂	Dióxido de Carbono
Coníferas	Divisão de plantas com características ancestrais únicas
Cretáceo	Período geológico compreendido entre 145 e 65 milhões de anos
FED	Floresta Estacional Decidual
FESD	Floresta Estacional Semi Decidual
FOM	Floresta Ombrófila Mista
GANECO	Laboratório de Gestão Ambiental e Negociação de Conflitos
Gimnosperma	Plantas vascularizadas sem flores e sem frutos
Gondwana	Supercontinente que existiu há aproximadamente 200 milhões de anos
Hotspot	Toda área com pelo menos 1500 espécies endêmicas
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza
Jurássico	Período geológico compreendido entre 200 e 145 milhões de anos
MA	Mata Atlântica
PDI	Processamento Digital de Imagens
Proxy	Expressão entendida como um instrumento para se aferir uma variável ambiental não mais presente no ambiente
RBMA	Reserva da Biosfera da Mata Atlântica
RS	Rio Grande do Sul
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
Triássico	Período geológico que se estende entre 250 e 200 milhões de anos
UERGS	Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	ORIGEM E ANCESTRALIDADE DA ESPÉCIE <i>Araucaria angustifolia</i>	16
2.2	UNIDADES TERRITORIAIS E ATUAL FITOGEOGRAFIA	17
2.3	ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAL.....	21
2.3.1	Processo de formação	21
2.3.2	A influência do clima	22
2.3.3	Aspectos dendrocronológicos e dendroecológicos	22
2.4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS – PDI.....	24
2.4.1	O processamento digital de imagens aplicado a dendrologia	26
2.4.2	O processamento digital de imagens aplicado a dendroecologia	27
2.4.3	O processamento digital de imagens aplicado a densidade dos tecidos vegetais	29
3	ARTIGO CIENTÍFICO	30
4	PRODUTO TÉCNICO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A cronologia dos fenômenos ambientais pode ser investigada e compreendida através de distintas técnicas científicas (GROTZINGER; JORDAN, 2013). Aspectos da estratificação geológica de solos e rochas assim como padrões de sedimentação de ambientes podem traduzir alterações ambientais pretéritas significativas. No mesmo sentido, amostras de testemunhos de gelo das regiões polares guardam informações sobre as alterações atmosféricas pretéritas, concentrando uma fonte extensiva de registros. Estudos desta natureza exigem que se conheça, ao menos, parteda história climática, desempenhando assim pesquisas diacrônicas sobre o clima (LORENSI, 2016). Dentre os mais conhecidos, se destacam os estudos de identificação e caracterização de anéis de crescimento de árvores por ser uma metodologia simples, de baixo custo e bastante eficaz no desenvolvimento de seu propósito.

Tal abordagem consiste na análise da formação dos tecidos vegetais, representado por anéis anuais de crescimento do fuste do indivíduo arbóreo (OLIVEIRA; PILLAR; ROIG, 2007). Identificadas como estruturas anatômicas do tecido vegetal, os anéis de crescimento podem ser observados em corte transversal do fuste, registrando através de círculos elípticos. Os círculos elípticos podem revelar fenômenos que variam em função da irradiação solar, do clima (i.e., variações de temperatura, umidade, etc.) e tempo, ou seja, condicionantes externas ao que o vegetal foi e/ou está exposto atualmente.

No Brasil, segundo Barbosa (2018a), estudos dendrológicos em florestas tropicais começaram há pouco mais de 30 anos, principalmente associadas ao bioma amazônico. Segundo a mesma autora, as plantas respondem a estímulos externos, assim, quando as condições ambientais são adversas, a atividade metabólica se interrompe e as mesmas entram em dormência, todo esse processo fica registrado anualmente em seus anéis de crescimento, no caso de espécies lenhosas. A dificuldade da realização até então de dendrocronologia tropical estaria justamente relacionada ao fato de não haver variação térmica suficiente para induzir a dormência do vegetal e a dificuldade de estabelecer padrões de avaliação, uma vez que as florestas tropicais abrigam inúmeras espécies de árvores com anatomias distintas e minimamente pesquisadas (BARBOSA, 2018b).

Por conta disso, abordagens técnicas aplicadas com relação ao crescimento dos anéis

em ambientes tropicais surgiram somente por volta do ano 2000 (p.e., ALBIERO JUNIOR, 2014; FONTANA et al., 2018; MATTOS; BRAZ, 2012; PEREIRA 2011).

Por conta da anatomia ancestral dos seus tecidos vegetais, a espécie de gimnosperma *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze, ameaçada de extinção, assim como o bioma Mata Atlântica em que a espécie está inserida, desenvolve anéis de crescimento anuais em decorrência da sazonalidade marcante que caracteriza sua zona de ocorrência natural. Essa característica, indica a existência de um significativo potencial de utilização da espécie de conífera para realização, por exemplo, de reconstruções paleoclimáticas (PALERMO; LATORRACA; ABREU, 2002;) sincronizando variações interanuais de temperatura e oscilações do sequestro de CO₂ atmosférico, características do clima temperado à que a espécie é submetida em seu ambiente natural de ocorrência (SEITZ; KANNINEN, 1989; OLIVEIRA et al. 2010). Desta forma, a *A. angustifolia* revela um potencial para reconstruções climáticas e elaboração de cenários futuros no contexto de um planeta em mudanças, uma vez que traduz em seus tecidos vegetais os atuais câmbios climáticos observados na América do Sul (GUEDES, 2012). Ainda sobre este contexto, acredita-se que o desenvolvimento de técnicas que possam aprimorar a interpretação dos anéis de crescimento da espécie *A. angustifolia*, especialmente por ocupar uma zona de *Hotspot* mundial, muito tem a contribuir para o entendimento do tema (ALBIERO JUNIOR, 2014).

A despeito do reconhecido potencial da flora, há uma lacuna de estudos no Brasil que efetivamente analisem os tecidos vegetais de espécies arbóreas a partir de técnicas de processamento digital de imagens (PDI). Nesse sentido, são fundamentais a experimentação científica e o aprimoramento de novas técnicas para análises dendrológicas que sejam acessíveis tecnicamente e financeiramente viáveis, como a análise por PDI no ambiente computacional. Com base no conhecimento construído pelas técnicas convencionais de PDI, adaptadas para a problemática até aqui apresentada, esta dissertação propõe a aplicação, análise e estabelecimento de metodologia a partir de técnicas de PDI para avaliação dendrológica da *A. angustifolia*, traduzindo assim a ampla discussão acadêmica sobre o tema para os objetivos práticos do meio profissional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação objetiva realizar um ensaio de aplicação e análise de PDI na investigação dendrológica da espécie *A. angustifolia* e seus distintos métodos de classificação de imagens voltados aos tecidos vegetais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar, através de ensaio por Processamento Digital de Imagens, o comportamento dos tecidos vegetais jovens e tardios que formam os anéis de crescimento anuais da espécie *A. angustifolia*, quando expostos a radiação eletromagnética;
- ii. Identificar possíveis padrões espectrais dos tecidos vegetais quando expostos as faixas de comprimento de ondas eletromagnéticas das faixas do visível: azul, verde e vermelho (i.e, ~440 – 750 nm.);
- iii. Discriminar as alterações espectrais no tecido vegetal jovem e tardio de *A. Angustifolia* a partir de um ensaio científico, através de uma plataforma de processamento digital de imagens e avaliar a empregabilidade do método proposto por Björklund *et al.* (2014);
- iv. Produzir um vídeo de divulgação científica sobre a relevância da análise dos tecidos vegetais da *A. angustifolia* no contexto da observação histórica de mudanças ambientais e a abordagem metodológica desenvolvida nesta dissertação.

1.2 JUSTIFICATIVA

A interpretação de anéis de crescimento possui aplicação em distintas áreas de análises climáticas, como por exemplo na avaliação pretérita de incêndios florestais. Segundo Peláez (2019), em estudo que propiciou a reconstrução de incêndios florestais em Sierra Madre Oriental no México, através da dendrocronologia reversa, foi possível registrar 119 cicatrizes de incêndios no fuste de vegetais do gênero *Pinus* sp., divididos entre os anos de 1961 e 2017, e suas possíveis relações com eventos

climáticos como *El Niño*, por exemplo. No mesmo sentido, referente a avaliação de alterações climáticas, Campôa (2018), mensurou o sequestro de carbono da atmosfera ao longo de um ano fisiológico vegetal no estrato arbóreo de ecossistemas de *Pinus pinaster*, e *Pinus pinea* em florestas costeiras de Portugal Continental, indicando a potencialidade das coníferas, assim como *A. angustifolia*, em análises dendrocronológicas, devido a características fisiológicas específicas. Seguindo ainda o tema sequestro de carbono, Kapoury (2016), trata em seu artigo sobre a potencialidade dos estudos dendrocronológicos na avaliação das taxas de sequestro de carbono a partir de *Vitellaria paradoxa*, no sul do Mali, na África ocidental.

Quanto ao aspecto legal de conservação da araucária no Brasil, reveste-se com destacada importância pelo fato de ser considerada uma espécie "Regionalmente extinta" (REX) no Espírito Santo/ES (SIMONELLI e, FRAGA, 2007); na lista das espécies da Flora ameaçadas de extinção no Estado de São Paulo/SP (SÃO PAULO, 2016); na Lista Vermelha da flora ameaçada de Minas Gerais/MG (COPAM, 1997); em Santa Catarina/SC considerada rara (KLEIN, 1990); Vulnerável" (VU); de acordo com a lista oficial da Flora ameaçada de extinção do Rio Grande do Sul/RS (RIO GRANDE DO SUL, 2002) e considerada "Em perigo" (EN), segundo a Lista Vermelha Oficial do Brasil (BRASIL, 2008). Internacionalmente a espécie figura na Lista Vermelha da IUCN (2013), com o *status* de "Criticamente em perigo" (CR). Por conta de todo seu histórico de exploração indiscriminada, ocorrendo atualmente apenas em remanescentes muitas vezes fora de Unidades de Conservação OLIVEIRA *et al.*, 2009, e por conta de seu caráter relictual, podendo ser considerada também uma das espécies arbóreas de ocorrência mais antiga na América do Sul (HAMPP, 2000), torna-se quase como uma dívida ambiental o estudo e compreensão do seu desenvolvimento.

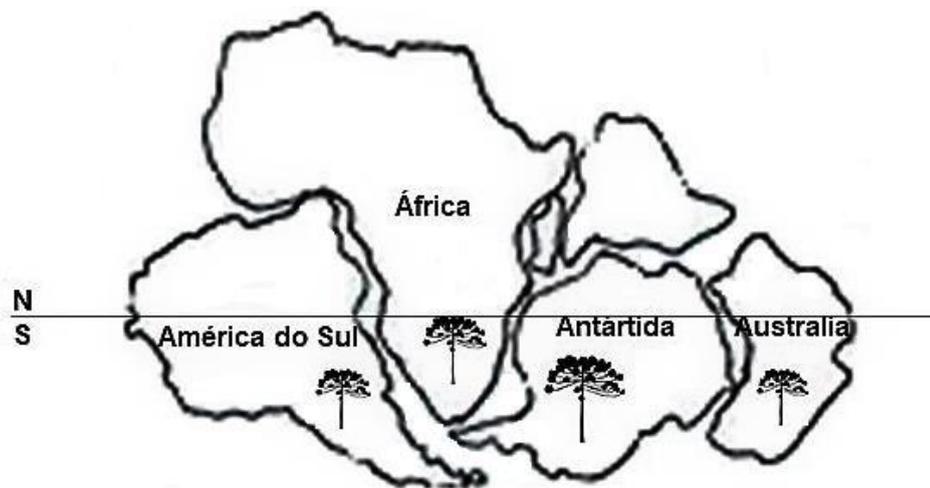
2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica que traz o referencial teórico desta dissertação, tem como objetivo, a sustentação técnica, teórica e descritiva referente ao ensaio científico executado a partir do PDI junto a espécie *A. angustifolia* e está subdivida em itens que contemplam os métodos adaptados e compilados dos artigos que compõem o referencial bibliográfico.

2.1 ORIGEM E ANCESTRALIDADE DA ESPÉCIE *Araucaria angustifolia*

A origem e dispersão da espécie de conífera *A. angustifolia* concentra grande interesse científico pois a mesma pode ser considerada uma das espécies de gimnospermas (i.e., vegetais arbóreos com vascularização específica executada por células traqueídes e que ao longo de sua vida não desenvolvem frutos e nem flores) com a ocorrência mais antiga na América do Sul (SOUZA *et.al*, 2010), podendo ser considerada também uma das espécies arbóreas de ocorrência mais antiga na América do Sul (HAMPP, 2000). Tendo a sua origem no Triássico segundo Kershaw e Wagstaff (2001), a família Araucariaceae teria irradiando-se principalmente pelo hemisfério Sul durante o Jurássico e início do Cretáceo, mantendo-se como componente significativo da Gondwana até final do Cenozoico, Figura 1.

Figura 1 - Hipótese da distribuição ancestral da família Araucariaceae no Gondwana (KERSHW; WAGSTAFF, 2001), com o centro de dispersão possivelmente no hemisfério Sul.

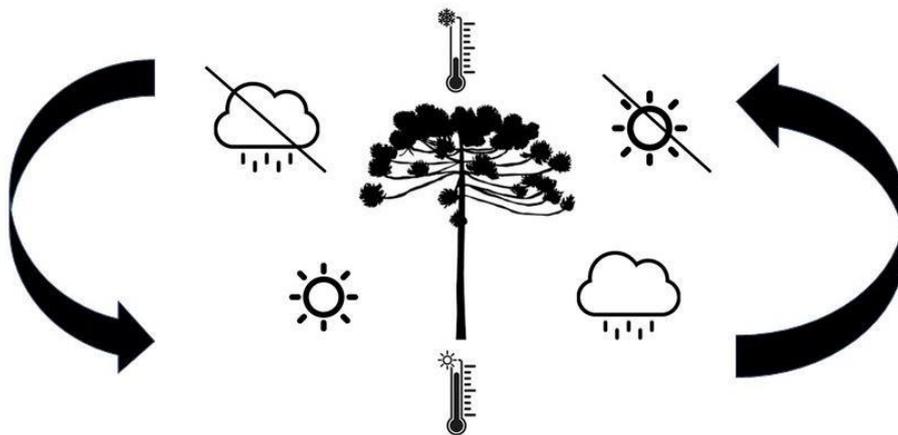


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Atualmente, as 11 espécies de Araucária (SETOGUCHI *et al.*, 1998) estão dis-

tribuídas somente no Hemisfério Sul, sendo que as duas únicas espécies representantes da família na América do Sul, *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze e *Araucaria araucana* (Molina) C. Koch, são endêmicas dessa região (DUTRA; STRANZ, 2009) onde, *A. angustifolia* é a única espécie da família que ocorre no Brasil (SOUZA *et. al*, 2010; KERSHAW; WAGSTAFF, 2001). Do ponto de vista de sua ancestralidade, a espécie possui um potencial inesgotável para estudos ambientais *proxy* (i.e., expressão entendida como um instrumento para se aferir uma variável ambiental não mais presente no ambiente), pois carrega em seus tecidos vegetais uma sequência de registros atmosféricos ainda a serem traduzidos, com grande relevância na interpretação dos eventos climáticos do passado, como descrito anteriormente, Figura 2.

Figura 2 - Exemplos de interações atmosféricas às quais a espécie vem sendo exposta ao longo de milhares de anos, alterando anualmente as características dos tecidos vegetais que a compõem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

2.2 UNIDADES TERRITORIAIS E ATUAL FITOGEOGRAFIA

A ocorrência atual da espécie *A. angustifolia* limita-se exclusivamente em território brasileiro, mais especificamente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e com ocorrência relictual nas cotas mais elevadas dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (BACKES, 2009), tendo como fator relevante de sua ocorrência o gradiente de altitude em relação ao nível do mar, Figura 3.

A espécie apresenta maior representatividade na Floresta Ombrófila Mista – FOM, formação florestal que está inserida na área de domínio da Mata Atlântica – M.A segundo a Lei Federal 11.428 de 2006 (BRASIL, 2006), sendo uma das fitofisionomias

mais ameaçadas neste bioma devido à intensa exploração predatória motivada pelo valor madeireiro de suas espécies em geral, expansão urbana e áreas para agricultura (CASTELLA; BRITZ 2004; CRUZ; SILVEIRA; RIBEIRO, 2009).

A FOM, caracterizada pela presença dominante no dossel da espécie *A. angustifolia*, concentra grande relevância para a realização de ações que visem sua conservação *in situ*, em toda a sua área de ocorrência. Embora seja descrita como uma espécie-chave na manutenção de seu ecossistema associado (OLIVEIRA *et al.*, 2009; BITTENCOURT; SEBBENN, 2009), de extrema relevância social, econômica e ecológica, as populações de *A. angustifolia* têm sido pouco estudadas em termos biológicos (MANTOVANI; MORELLATO; REIS, 2004), demográficos (PALUDO *et al.*, 2009), espaciais (ANJOS *et al.*, 2004), regenerativos (PALUDO *et al.*, 2009; VALENTE *et al.*, 2010; RIOS, 2010), de intensidade luminosa (DUARTE; DILLENBURG; ROSA, 2002; DUARTE; DILLENBURG, 2000), dendrocronológicas e dendroecológicas (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

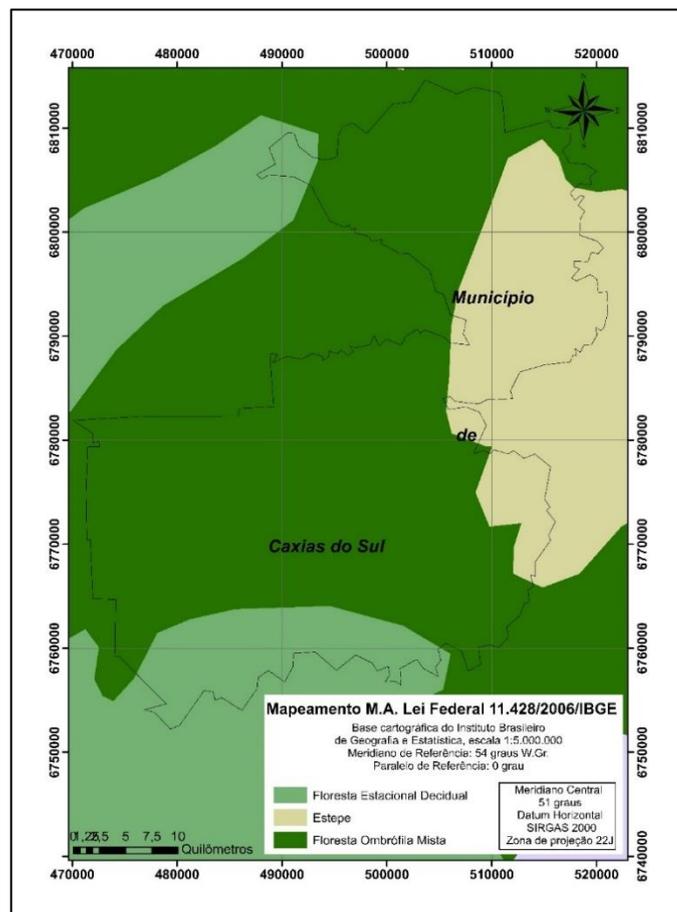
Figura 3 - Área de ocorrência natural da espécie nos estados de SC, PR, SP e RJ (verde claro) e a situação e localização geográfica do Estado do RS e o município onde ocorreu a coleta de amostras para o ensaio de pesquisa nesta dissertação (Caxias do Sul/RS).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021), base cartográfica digital FEPAM (2005).

Com grande extensão territorial associada a FOM, o município de Caxias do Sul, localizado na encosta superior do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, abrange espacialmente três fitofisionomias distintas, no âmbito do Bioma Mata Atlântica, Figura 4. O ambiente é caracterizado pela associação entre a Floresta Estacional Decidual – FED, a Floresta Ombrófila Mista – FOM e as estepes gramíneas lenhosas que caracterizam os Campos de Cima da Serra, um ambiente com elevada biodiversidade, pois concentra elementos da fauna e da flora das três principais fitofisionomias do estado no âmbito da M.A, com distintas espécies de elevado grau de endemismo e com *status* de ocorrência em vulnerabilidade (FEPAM, 2005). A altitude varia de 760 a 817, apresentando o tipo climático Cfa (KÖPPEN, 1931). Sob domínio geológico da Formação Serra Geral (BORSATTO *et al.*, 2015), a área de coleta situa-se na região geomorfológica denominada Planalto das Araucárias (RADAMBRASIL, 1986).

Figura 4 - Localização da Floresta Ombrófila Mista – FOM, segundo a Lei Federal 11.428 de 2006/IBGE (Brasil, 2006), no município de Caxias do Sul/RS.

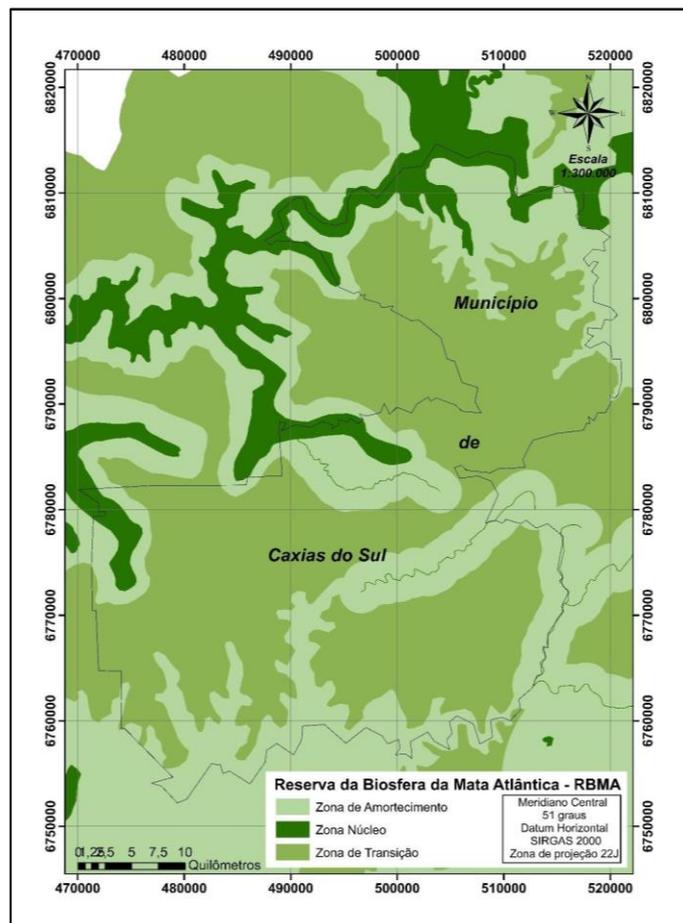


Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2006).

No ano de 2008, foi definido o mapa de aplicação da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – RBMA no RS (Figura 5), que corresponde a 17,2% da área do Estado do RS (48.695 km²), abrangendo os remanescentes florestais que abrigam recursos florísticos e faunísticos mais expressivos e seu potencial genético (MARCUIZZO; PAGEL; CHIAPPETTI, 1998).

Na época, foram delimitados os zoneamentos propostos, objetivando a conservação de remanescentes significativos da cobertura vegetal original e de seus ecossistemas associados, oportunizando políticas públicas com o intuito de limitar e ordenar a ocupação e expansão urbana dos municípios compreendidos pelo mapeamento.

Figura 5 - Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – RBMA/VI revisão, neste recorte associando seus zoneamentos ao município de Caxias do Sul/RS.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Marcuzzo, 1998.

Ainda tratando-se especificamente dos padrões de ocorrência de *A. angustifolia* no Estado do Rio Grande do Sul, sua feição é caracterizada por dois estratos arbóreos bem definidos - um superior, dominado pela *A. angustifolia*, que confere à floresta em que está inserida uma arquitetura exclusiva, e outro inferior, dominado por variedades como a canela (*Nectandra leucantha*) e a imbuia (*Ocotea porosa*) e ainda um estrato arbustivo no sub-bosque, onde predominam a erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e o xaxim (*Dicksonia sellowiana*). É uma formação florestal associada a climas mais secos e frios, como podemos encontrar nos Campos de Altitude da Serra Geral, nos patamares das Florestas Estacionais Semi-Deciduais – FESD e Deciduais e nos Campos Pampenos, especialmente em remanescentes relictuais nas partes mais elevadas do Escudo Sul Riograndense ou popularmente reconhecida como Serra do Sudeste (SOUZA, 2006).

2.3 ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAL

2.3.1 Processo de formação

Dentre as células que compõem parte dos tecidos vegetais de *A. angustifolia*, as células traqueídes desempenham um importante papel na condução colunar do xilema, tecido de condução de fluidos orgânicos e que por sua vez formam os tecidos de sustentação mecânica do vegetal. Durante os ciclos anuais de desenvolvimento e envelhecimento desses tecidos ocorre a lignificação, um processo de alteração na estrutura química das paredes celulares traqueídes tardias, um comportamento entendido como secundário à formação dessas células, e caracterizada no tecido vegetal pela grande concentração de lignina (CAMPBELL *et al.*, 2011).

A lignina é descrita como um polímero fenólico que vem a se desenvolver na parede celular quando o crescimento do tecido vegetal tenha cessado seu desenvolvimento anual, considerado por Raven *et al.* (2014), como sendo uma morte celular programada. Esse tecido celular tardio, caracterizado pela lignina, assume maior densidade e conseqüentemente altera sua coloração, devido à grande concentração de células mortas e redução da vascularização na estação do inverno, resultado do estresse térmico e hídrico ao qual o vegetal é submetido anualmente. Essa alteração na composição química das paredes celulares traqueídes tardias leva ao incremento da densidade do tecido, principalmente no período anual de envelhecimento e morte celular, formando os anéis anuais de crescimento (Raven *et al.*, 2014).

2.3.2 A influência do clima

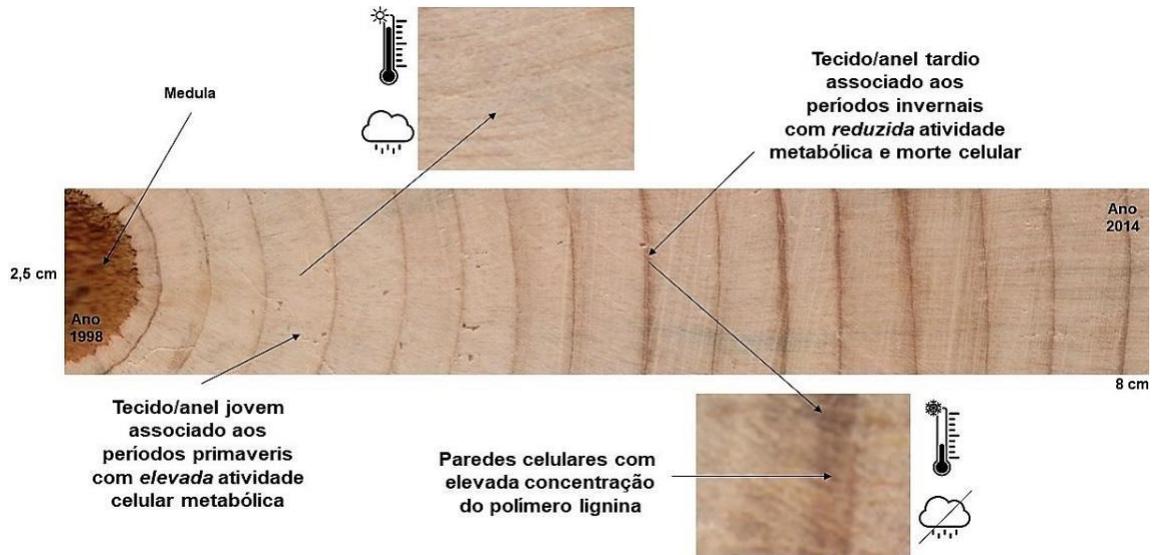
Atualmente o ser humano vivência uma mudança na forma como o clima se manifesta, o que pode ser mensurado e analisado, por meio de metodologias diversas que comparam eventos climáticos históricos com a atualidade em cada região do planeta (BJÖRKLUND *et al.*, 2014). A vegetação tem um papel relevante neste aspecto, ao servirem de sumidouros naturais de carbono e ao permitirem um arrefecimento da temperatura, onde as florestas assumem um papel de destaque no controle das alterações climáticas (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Essa relação de desenvolvimento das árvores é profundamente influenciada pelo clima, sendo necessário entender de que forma esta influência atmosférica afeta o crescimento, para assim, averiguar quais as consequências das alterações climáticas nas florestas.

Dado que a variação no clima afeta a dinâmica de crescimento das árvores (HAYLES *et al.*, 2007) torna-se então importante compreender de que forma o clima afeta o crescimento das mesmas, apontando quais os seus fatores mais determinantes. Ainda segundo Jansen *et al.* (2007), o conhecimento das mudanças climáticas passadas pode aprimorar a compreensão da variabilidade registrada atualmente, e abordar questão de se a mudança climática contemporânea é única ou não quando interpretada em um contexto de longo prazo.

2.3.3 Aspectos dendrocronológicos e dendroecológicos

Além de sua importância como espécie-chave na manutenção e resiliência da FOM, o lenho da araucária pode fornecer registros históricos anuais confiáveis das variações climáticas pretéritas vivenciadas por seus indivíduos (ALBIERO JUNIOR, 2014). Esses registros históricos são encontrados nos anéis de crescimento, descritos por Oliveira *et al.* (2007), como estruturas anatômicas do xilema secundário que observados em corte transversal, delimitam círculos mais ou menos concêntricos e contínuos, ao redor da medula do vegetal (Figura 6).

Figura 6 - Características anatômicas dos tecidos vegetais que formam os anéis de crescimento da espécie *A. angustifolia*.

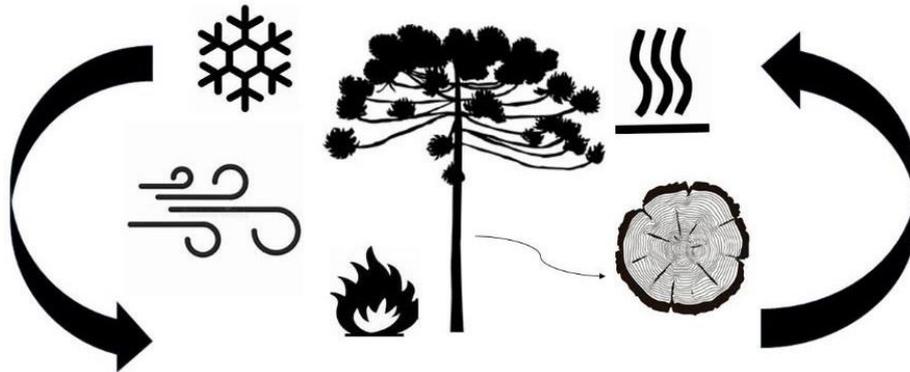


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O estudo de séries temporais dos anéis de crescimento pode ser definido como dendrocronologia e suas relações com variáveis ambientais de dendroecologia (OLIVEIRA *et al.*, 2007). As análises e interpretações dos anéis de crescimento em árvores permitem a identificação e reconstrução das variações ambientais pretéritas, dinâmicas populacionais, variações dos recursos hídricos, edáficos, efeitos dos ventos, herbívoros, presença de metais pesados no ambiente e ação antrópica (BOTOSSO; MATTOS, 2002), demonstrando inúmeras analogias que podem ser descritas através das datações, possibilitando um melhor entendimento do clima e dinâmica vegetal pelas informações derivadas dos anéis de crescimento (OLIVEIRA *et al.*, 2010) (Figura 7).

Seitz e Kanninen (1989); Wehr e Tomazello Filho (2000) Botosso e Mattos (2002); Oliveira *et al.* (2007); Oliveira *et al.* (2010); relatam o potencial dendrocronológico e dendroecológico de *A. angustifolia*, apresentando formações anuais de anéis, embora estudos dendroecológicos com araucária sejam ainda relativamente pouco explorados (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Figura 7 - Indica as possíveis alterações atmosféricas que podem alterar o regime fisiológico das espécies arbóreas, assim como efeitos antrópicos como o fogo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No Hemisfério Norte, especialmente nos países associados à região geográfica da Europa Setentrional, a pesquisa associada ao estudo digital de séries temporais dos anéis de crescimento, encontram correlações entre a temperatura atmosférica, conteúdo de lignina das células traqueídes das coníferas nativas e densidade dos tecidos vegetais tardios, onde demonstram exercer maior controle sobre o crescimento em relação a outros parâmetros climáticos. Tais experimentos, sugerem a possibilidade de utilização como um *proxy* confiável em reconstruções climáticas pretéritas em escala multicentenária (BJÖRKLUND *et al.*, 2014).

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS – PDI

Imagens digitais possuem inúmeras definições teóricas. Entretanto, como base neste ensaio científico, podemos defini-las como um conjunto de pixels (*picture elements*) distribuídos em um plano cartesiano na forma de uma matriz de linha e coluna que representam uma cena (ZANOTTA *et al.*, 2019). Assim, cada pixel reflete uma quantidade específica de energia/brilho, muito por conta da composição química e física que compõem a cena, energia essa que provém de uma fonte de radiação natural (sol) ou artificial (lâmpada), podendo ser refletida em diferentes comprimentos de onda.

A imagem, definida aqui como o tecido vegetal de *A. angustifolia*, foi obtida através da reflectância de uma fonte de radiação artificial (*scanner*) a uma resolução (quantidade de pixels que forma a imagem) de 1.200 *pixels* por polegada,

correspondendo assim a cena com aproximadamente 30.000 elementos refletindo distintas quantidades de brilho, que em geral varia de 0 à 255, relacionado ao nível de cinza (NC), valor de brilho (VB) ou número digital (ND), sendo composta ainda pelas três bandas espectrais associadas a faixa do visível humano, que correspondem às cores compostas (Red), verde (Green) e azul (Blue) que formam a imagem, sendo de fundamental importância pois cada banda espectral traduz uma característica distinta da imagem, em termos de interação com a radiação eletromagnética (ZANOTTA *et al.*, 2019).

Assim, o PDI consiste então em transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela presente e a que nos interessa especificamente (ALBUQUERQUE; ALBUQUERQUE, 2000). Essa transformação passa por classificar a imagem de forma que se possa traduzir a informação, objeto central da análise. De acordo com Queiroz Rodrigues e Gómez (2004), existem vários métodos de classificação que buscam, através de diversas abordagens, identificar com acurácia a informação de cada pixel da imagem, classificando em categorias.

Um dos principais modelos, o de classificação supervisionada, processada a partir de um software pré-definido, se baseia na identificação de diferentes classes (no caso dessa dissertação uma classe associada ao tecido jovem e outra classe ao tecido tardio) com distintos comportamentos espectrais. Para isso, algoritmos de classificação são informados previamente pelo analista para extrair as feições de interesse em um espaço multidimensional (BERNARDI *et al.*, 2007). Outro modelo amplamente utilizado, a classificação não-supervisionada requer pouca ou nenhuma participação do analista no processo de classificação da imagem, pois a classificação é quase que totalmente automatizado pelo software ou plataforma de PDI. Neste modelo de classificação o analista especifica alguns parâmetros que o algoritmo irá utilizar para identificar e selecionar padrões que são inerentes aos dados (MENESES; ALMEIDA, 2002).

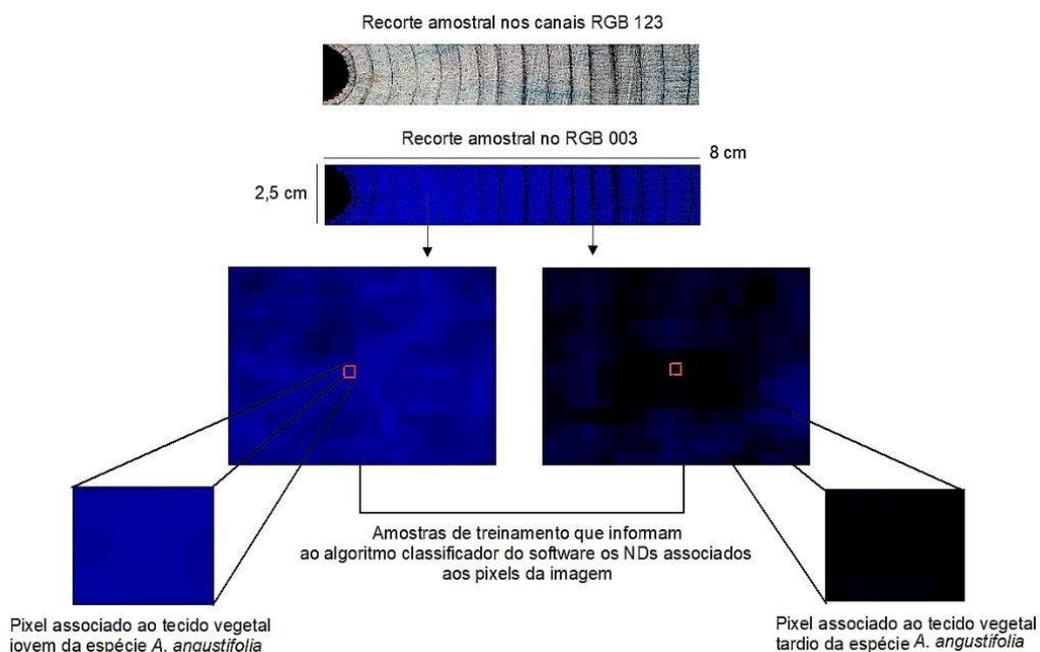
Com base nos dois modelos de classificação processados pelo software, modelos estes que analisaram os Níveis Digitais – ND com base em agrupamento de pixels com ND semelhantes (*clustering*) e pixel a pixel com aplicação do algoritmo de classificação Máxima Verossimilhança, pode-se argumentar que os modelos adotados diferem entre si quanto a complexidade e ao desempenho e, ainda, para um mesmo algoritmo, os resultados podem ser distintos em função de variáveis, como por exemplo o grau de heterogeneidade de cada classe analisada, apontando a

necessidade de elevar o número de procedimentos de classificação, em demais softwares inclusive, a fim de definir o melhor algoritmo classificador apropriado.

2.4.1 O processamento digital de imagens aplicado a dendrologia

O termo análise, utilizado na condução do ensaio científico e tema dessa dissertação, esteve intimamente relacionado a parte da classificação da imagem onde estivesse a informação de interesse, neste caso concentrada nos tecidos vegetais formados no período de inverno e verão da espécie *A. angustifolia*. Dessa parametrização, pois concentra inúmeros fenômenos ou medidas quantitativas que são utilizadas para descrever diferentes informações dentro de uma imagem, a análise digital executada focou-se nos valores expressos de ND dos *pixels* associados aos tecidos vegetais quando expostos a radiação eletromagnética, onde cada pixel presente na matriz da imagem digital venha a se manifestar de forma distinta devido à sua composição química que revela as diferentes densidades entre os tecidos formados no inverno e os que vem a se formar no verão, Figura 8.

Figura 8 - Indica a sequência operacional aplicada em uma das cinco amostras coletadas no município de Caxias do Sul/RS, onde as características físicas e químicas do tecido vegetal apresentaram distintos comportamentos quando absorvidas pela radiação eletromagnética e analisadas a partir do canal do azul visível.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por outro lado, o tema ainda se encontra minimamente explorado, muito por conta da própria distribuição endêmica da espécie e sua ancestralidade, Kershaw e Wagstaff (2001). A dificuldade da realização de dendrologia tropical deve-se a fatores relacionados a reduzida variabilidade climática, sem período invernal que induz a redução da atividade cambial, e a fisiologia das espécies, que influenciam no comportamento celular, bem como os seus efeitos combinados, ainda são mal-compreendidos (BARBOSA, 2018b); por isso, trabalhos mais aplicados com relação ao crescimento dos anéis surgiram somente por volta do ano 2000 (ALBIERO JUNIOR, 2014; FONTANA et al., 2018; MATTOS; BRAZ, 2012; PEREIRA, 2011).

A partir deste período, diferentes técnicas de identificação e análise de anéis de crescimento têm sido exploradas com ajuda de equipamentos específicos e ou adaptações para tal. A metodologia convencional, segundo Rosot *et al.* (2003), ocorre ainda principalmente em florestas comerciais, onde a mensuração se dá com a retirada de uma amostra (bagueta) a partir da introdução do trado de Pressler no tronco/fuste da árvore, geralmente à altura do peito. A técnica, amplamente utilizada em amostras convencionais de espécies florestais exóticas, é considerada laboriosa e com precisão questionável, por conta do ângulo de inserção do equipamento no tronco/fuste. Tal angulação influencia diretamente no resultado da amostra, que por sua vez pode induzir ao erro de coleta e posterior avaliação. Em comparação com o modelo convencional, as inúmeras técnicas de processamento digital vêm acompanhando uma tendência mundial no sentido de se elevar a rapidez e a precisão na obtenção e processamento de dados, principalmente com o uso de geotecnologias, Rosot *et al.* (2003).

Nesse sentido, é fundamental a experimentação científica e o aprimoramento de novas técnicas para análises dendrológicas e que sejam acessíveis tecnicamente e financeiramente como a análise por PDI no ambiente computacional.

2.4.2 O processamento digital de imagens aplicado a dendroecologia

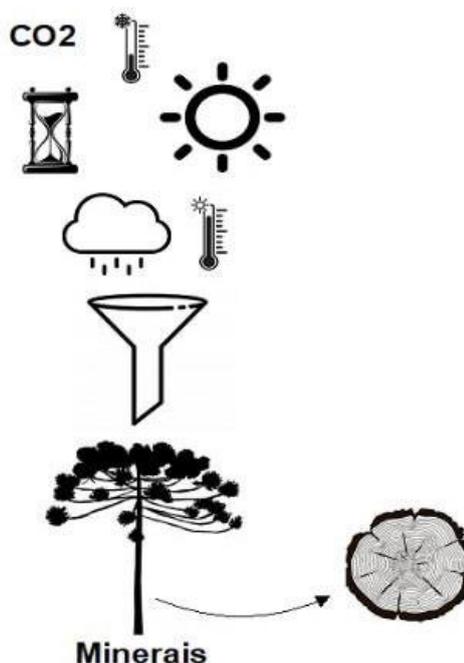
O conhecimento das mudanças climáticas e ambientais passadas pode aprimorar nossa compreensão referente a variabilidade climática natural e abordar questões referentes às mudanças climáticas contemporâneas (JANSEN *et al.*, 2007). Diante dessa abordagem, a dendroecologia se propõe a avaliar as causas e consequências do desenvolvimento e variações dentro de uma mesma espécie e

entre espécies distintas, e sua relação com variação ambiental, dado o papel das florestas no ciclo global de sequestro de CO₂ (ROZENDAAL; ZUIDEMA, 2011) (Figura 9).

A ocorrência de anéis de crescimento anual nos trópicos tem sido negada por um longo tempo (por exemplo, LIEBERMAN *et al.*, 1985). A ausência de anéis de crescimento anual foi entendida como consequência de uma falta de sazonalidade nas florestas tropicais úmidas. Desde então, ficou claro que os anéis anuais são formados quando árvores tropicais experimentam dormência dos seus tecidos vasculares em um determinado período do ano devido a condições ambientais desfavoráveis. Embora os procedimentos de avaliação do papel das florestas no sequestro de CO₂ estejam consolidados, a utilização de ferramentas digitais que possam processar e mensurar tais informações ainda são incipientes.

Contudo, tais técnicas de análises de imagens, associadas aos testes tradicionais podem minimizar as limitações, como por exemplo o papel da lignina na atividade celular dos tecidos vegetais, pois se destacam por sua precisão e objetividade, entretanto, é necessário adaptar essas técnicas de PDI às diferentes espécies vegetais e compreender seus padrões anuais de crescimento.

Figura 9 - Exemplos das inúmeras interações envolvidas no desenvolvimento da espécie *A. angustifolia*, que podem ser observadas a partir dos anéis de crescimento.



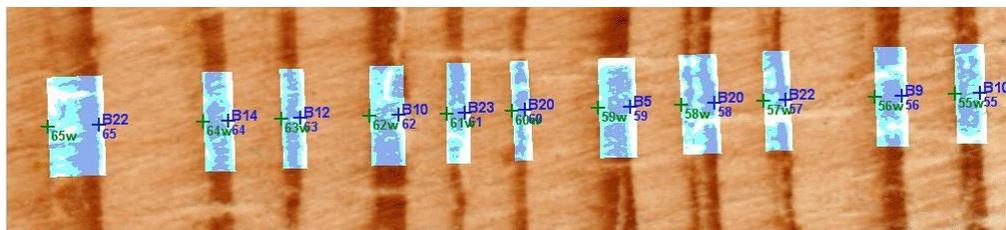
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

2.4.3 O processamento digital de imagens aplicado a densidade dos tecidos vegetais

Em distintos períodos anuais, as espécies arbóreas experimentam mudanças em sua estrutura e interações com o meio ambiente. Mecanismos metabólicos relacionados entre idade de desenvolvimento das espécies, recursos atmosféricos, assim como taxas fotossintéticas ainda se apresentam com relativas incertezas entre os pesquisadores do tema (HADAD *et al.*, 2014). Por outro lado, é fato que a fisiologia das árvores sofre mudanças de sensibilidade ao clima com a idade, sendo apoiado pelos estudos da densidade dos anéis de crescimento, Rozas *et al.* (2009).

Neste campo, os estudos desenvolvidos no hemisfério norte, que tratam do processo de incremento de densidade dos tecidos vegetais tardios têm sido estudados, considerando também outras espécies de gimnospermas, (CAMPBELL *et al.*, 2011), onde o desenvolvimento dessas espécies de árvores é limitado principalmente pelas oscilações sazonais de temperatura. Nesse sentido, Björklund *et al.* (2014), vem estabelecendo relações semelhantes apoiadas em *softwares* específicos como *CooRecorder*, identificando a relação entre densidade dos tecidos vegetais e a intensidade dos fenômenos atmosféricos associados aos períodos de inverno, utilizando uma espécie de gimnosperma com ocorrência no hemisfério norte e analisada na banda cromática também do azul visível (Figura 10).

Figura 10 - Indica uma amostra de anéis de crescimento onde se identifica a densidade do tecido vegetal associado ao período de inverno no hemisfério norte.



Fonte: Modificado de Björklund *et al.* (2014).

O escopo do ensaio metodológico, buscou compreender apenas uma pequena fração dessa dinâmica que associada especificamente aos tecidos vegetais, do ponto de vista metodológico de detecção, relacionada aos tecidos vegetais da *A. angustifolia* quando analisados a partir do PDI, não relacionando modelos atmosféricos aos seus resultados, embora compreenda a íntima e profunda relação entre estes fatores.

3 ARTIGO CIENTÍFICO

O artigo **PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE**, apresenta os procedimentos metodológicos e resultados desta dissertação. Os resultados obtidos através do ensaio científico executado, bem como discussões mais aprofundadas, serão posteriormente submetidos a um periódico científico como trata o regimento interno do PPGAS, no seu artigo 21.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE

André Augusto *BRODT*¹; Clódís de Oliveira *ANDRADES-FILHO*^{1,2}; Juliano Morales de *OLIVEIRA*³.

¹Programa de Pós-graduação em Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS -Unidade Hortênsias).

²Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências (IGeo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

³Programa de Pós-graduação em Biologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

brodta@gmail.com; clodis.filho@ufrgs.br; julianooliveira@unisinobr

Resumo

Diante de uma análise digital de imagens, aplicada aos tecidos vegetais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze, foi possível analisar os distintos comportamentos espectrais de reflectância luminosa submetida às células traqueídes jovens e tardias. A partir do Processamento Digitais de Imagens – PDI, através dos métodos de classificação supervisionada e não supervisionada dos pixels da imagem, foi possível identificar alterações espectrais no tecido vegetal, decorrentes do processo de lignificação. Essas alterações nas paredes celulares são possivelmente associadas a oscilações de temperatura e CO₂ atmosférico, índices de radiação solar e/ou estresse hídrico. Assim, as distintas classificações de imagens digitais se apresentam como uma técnica promissora para análises dendrológicas, alternativamente aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: *Araucaria angustifolia*. Anéis de crescimento. Dendrologia. Anatomia vegetal. Processamento digitais de imagens. Pixel. Classificação.

INTRODUÇÃO

Dentre as espécies vegetais nativas que ocorrem no clima temperado do Estado do Rio Grande do Sul (KÖPPEN, 1931), a espécie de conífera *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze, única gimnosperma representante moderna da família Araucariaceae em território nacional, concentra grande interesse relacionado ao seu endemismo, processos de dispersão e histologia dos seus tecidos vegetais (Oliveira, 2007; Pieruzzi, 2013). Por conta da sua ancestralidade, as células traqueídes são responsáveis pela condução colunar do xilema, um fluido orgânico que une raízes e folhas em um complexo sistema de pressão atmosférica e que por sua vez formam os tecidos de sustentação mecânica do vegetal.

Durante os ciclos anuais de desenvolvimento e envelhecimento desses tecidos ocorre a lignificação, um processo de alteração na estrutura química das paredes celulares traqueídes, um comportamento entendido como secundário à formação dessas células, e caracterizada no tecido vegetal pela grande concentração de lignina.

A lignina pode ser definida como um polímero fenólico que só se desenvolve quando o crescimento celular tenha cessado seu desenvolvimento anual, considerado por Raven *et al.* (2014), como sendo uma morte celular programada. Esse tecido celular tardio, caracterizado pela lignina, assume maior densidade e consequentemente altera sua coloração, devido à grande concentração de células lignificadas no período estacional do inverno, resultado do estresse térmico e hídrico ao que o vegetal é submetido anualmente. Essa alteração na composição química das células traqueídes tardias leva ao incremento dessa densidade, principalmente no período anual de envelhecimento, formando os anéis anuais de crescimento.

Para o melhor entendimento dessa dinâmica dos tecidos vegetais que sincroniza a sazonalidade atmosférica com a densidade dos tecidos ao longo do tempo, ocasionando assim o surgimento dos anéis de crescimento anuais, a espécie *A. angustifolia* apresenta um potencial amostral considerável para estudos ambientais *proxy*¹. Este potencial se deve ao seu aspecto evolutivo ancestral e seu sistema vascular, considerada uma das espécies de gimnospermas com ocorrência mais antiga na América do Sul (SOUZA *et al.*, 2010) com características excepcionais do seu sistema vascular, traduzidas unicamente pelas células traqueídes.

¹ Expressão entendida como um instrumento para se aferir uma variável ambiental não mais presente no ambiente.

O processo de incremento de densidade dos tecidos vegetais tardios tem sido estudado, sobretudo no Hemisfério Norte, considerando também outras espécies de gimnospermas (CAMPBELL *et al.*, 2011), onde o desenvolvimento dessas espécies de árvores também é limitado principalmente pelas oscilações sazonais de temperatura atmosférica e disponibilidade de radiação solar, fatores ambientais que podem estar associados às atuais mudanças climáticas extremas.

A discriminação dos tecidos vegetais tardios tem sido realizada por diversas abordagens técnicas. Em sua maioria são técnicas que exigem expressivos investimentos financeiros, como a mensuração de densidade da madeira através de Raio X (p.e., ROQUE; TOMAZELLO 2007), na aquisição de *softwares* específicos ou nas técnicas que exigem práticas pouco dinâmicas, como o tratamento químico da madeira a fim de extrair lipídios a partir da celulose, através do método Soxhlet² (SOXHLET, 1879). Assim, são necessárias iniciativas mais recentes de desenvolvimento de técnicas e de menor custo para mensuração da densidade dos tecidos vegetais.

Nesse sentido, Björklund *et al.* (2014) propuseram o uso de Processamento Digital de Imagens (PDI) sobre cortes transversais de tecidos vegetais, especificamente analisando a faixa de comprimento de ondas eletromagnéticas do azul (i.e., ~440 – 485 nm.), comparando dessa forma, as oscilações pretéritas de temperatura com relação a densidade dos anéis de crescimento anuais. A faixa do azul visível tem sido então identificado em espécies do Hemisfério Norte como sendo a faixa espectral que melhor pode representar o incremento e variações de concentração de lignina nas células mortas na maturidade, revelando assim a densidade do tecido vegetal tardio, uma vez que tais tecidos apresentam maior propensão em absorver o comprimento do azul com relação aos tecidos vegetais jovens (MC.CARROLL *et al.*, 2002).

Desta forma, é fundamental a realização de testes e aplicações de processamento digital de imagens voltados a espécies nativas do Hemisfério Sul, e a *A. angustifolia* se apresenta como espécie de potencial relevância para esta abordagem investigativa que pode vir a contribuir enquanto um método dinâmico e eficiente para discriminação de tecidos vegetais tardios. Assim sendo, o objetivo deste estudo foi realizar um ensaio experimental de discriminação de alterações espectrais no tecido vegetal jovem e tardio de *A. angustifolia* por PDI e avaliar a empregabilidade do método de Björklund *et al.* (2014) a esta espécie de gimnosperma endêmica da América do Sul.

² Processo físico/químico de laboratório para extração de lipídios de tecidos vegetais.

MATERIAL E MÉTODOS

Origem dos dados

Preliminarmente, os dados referentes a *A. angustifolia* utilizados neste ensaio foram obtidos a partir do acesso ao armazenamento físico de 25 amostras (i.e., discos, cortes transversais de fuste) do acervo técnico cedidas pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, com supressão licenciada e extraídas por terceiros a partir em uma única localidade no município de Caxias do Sul, ano de 2014 e com coordenadas reconhecidas. Quanto ao desenvolvimento do banco de dados, desenvolveu-se no ambiente Microsoft Windows um modelo operacional em que cada amostra física pudesse ser digitalizada/escaneada e posteriormente associada à um único arquivo distinto, disponibilizando cada imagem ao *software* de PDI.

A partir do modelo de banco de dados já estruturado, foi definido o *software* de processamento de dados *ArcGis* versão 10.5 a fim de desenvolver processos de classificação aplicados ao conjunto de amostras selecionadas com resolução de 1.200 *Dots Per Inch* – DPI ou pontos por polegada na sua tradução livre.

Caracterização amostral

Foram selecionadas para integrar o escopo amostral deste ensaio, cinco amostras de *A. angustifolia* das 25 obtidas previamente do acervo técnico, uma vez que grande parte das amostras não atendiam uma padronização visual prévia, relacionada especialmente ao dimensionamento físico (largura e comprimento), uma vez que seriam escaneadas em equipamento portátil. Dessa forma, as cinco amostras de indivíduos adultos, coletadas no município de Caxias do Sul (Figura 1) e previamente preparadas pelo Laboratório de Ecologia Vegetal (LEV) na UNISINOS, através de um polimento orbital manual com distintas graduações abrasivas a fim de facilitar a interpretação visual dos tecidos vegetais, (Figura 2), foram posteriormente digitalizadas a partir de um equipamento de *scanner*, fator preponderante na seleção e dimensionamento das amostras.

Quanto ao local de coleta das amostras, o município de Caxias do Sul, localizado na encosta superior do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, abrange espacialmente três fitofisionomias distintas, no âmbito do Bioma Mata Atlântica.

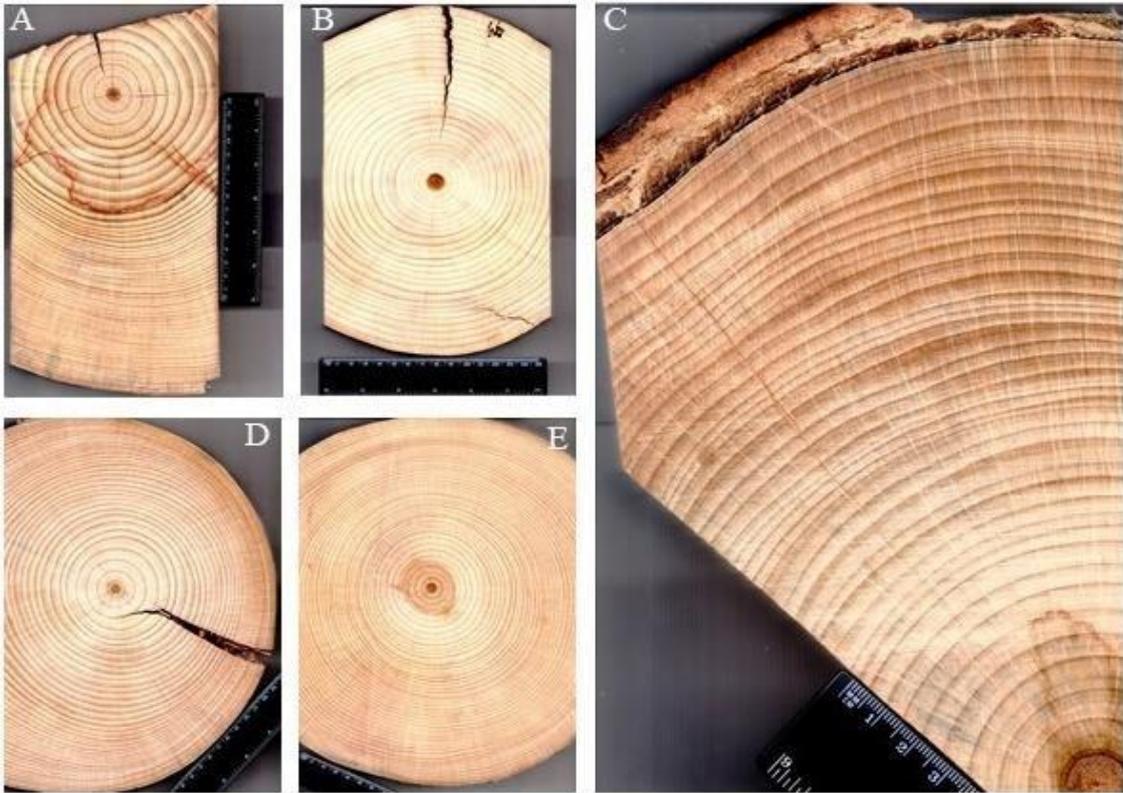
Figura 1 - Município de Caxias do Sul, localizado na encosta superior do nordeste do Rio Grande do Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021) com base em FEPAM (2005).

O ambiente onde as amostras foram coletadas é caracterizado pela associação dos Campos de Altitude (IBGE,2006), Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Decidual, fitofisionomia esta que possui maior representatividade de cobertura vegetal em área no município segundo dados estaduais (FEPAM,2005). A altitude varia de 760 a 817 metros, apresentando o tipo climático Cfa (KÖPPEN, 1931). Sob domínio geológico da Formação Serra Geral (BORSATTO *et al.*, 2015) a área de coleta situa-se na região geomorfológica denominada Planalto das Araucárias (RADAMBRASIL, 1986).

Figura 2 - Cinco amostras de discos/cortes transversais de fuste de diferentes indivíduos adultos de *A. angustifolia* (de A à E), coletadas no município de Caxias do Sul/RS e cedidas pelo Laboratório de Ecologia Vegetal – LEV da UNISINOS. Dimensão da régua: 15 cm.

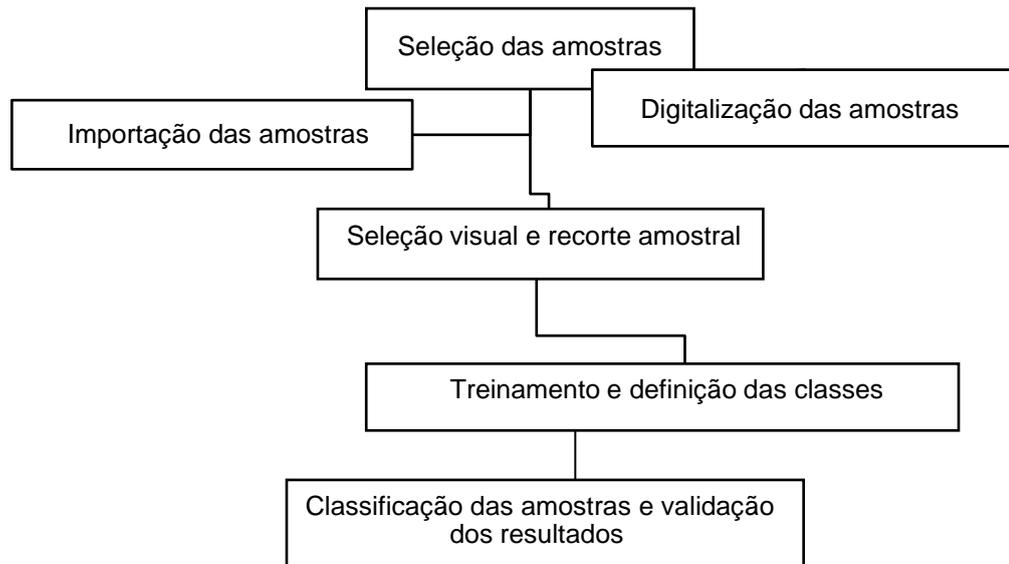


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Processamento digital de imagens

Por definição, PDI consiste em um conjunto de etapas e técnicas a fim de capturar, representar e transformar imagens (Albuquerque, 2000). Nesse sentido, o imageamento das cinco amostras buscou definir previamente aspectos como o método de captura das imagens, o *software* de processamento de imagens a ser operacionalizado, a criação de banco de dados, a definição da resolução mais apropriada à análise, a seleção visual, o recorte a ser analisado, a definição das bandas espectrais de análise assim como o treinamento, classificação e validação das imagens obtidas. Assim, a Figura 3 busca traduzir a sequência operacional aplicada à análise dos tecidos vegetais.

Figura 3 - Indica a sequência operacional adotada no processamento das imagens.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

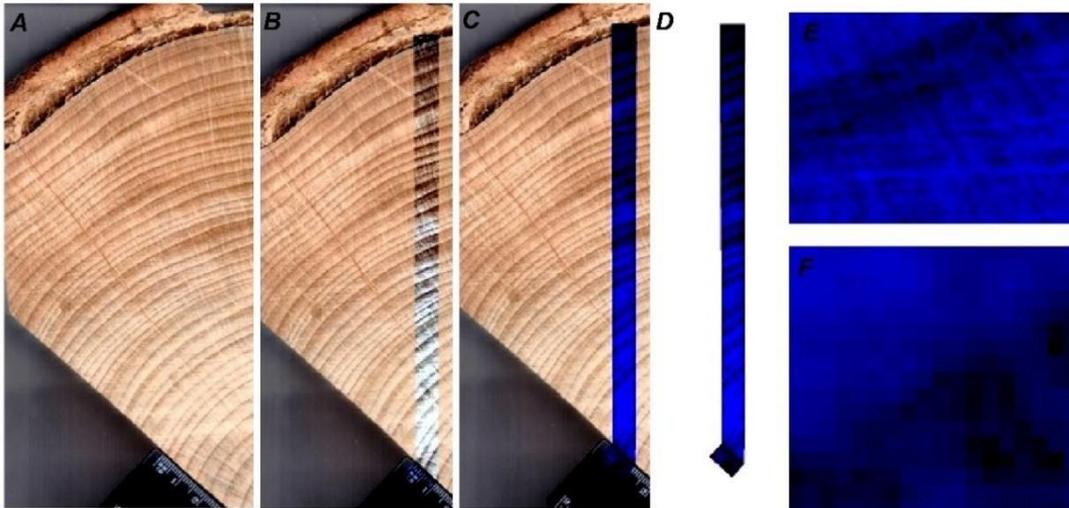
A aquisição das imagens digitais por sua vez foi realizada com *scanner* Hewlett Packard, modelo ScanJet 200 com resolução de 1200 DPI, o que corresponde a 1200 pixels³ a cada 2,54 centímetros na imagem. As imagens foram importadas e processadas no *software* ArcGis versão 10.5 através de uma interface USB para PC, neste momento já convertida em formato TIFF.

O *software* utilizado no processamento, que opera como uma plataforma de (SIG)⁴, inclui ferramentas de processamento de imagens, sendo operacionalizado e comercializado pela empresa Norte Americana Environmental Systems Research Institute – ESRI (ESRI, 2011. *ArcGis Desktop: Release 10.5 Redlands, CA*). Procedendo ao comando do operador, foram selecionados visualmente em tela um recorte retangular em cada amostra, a fim de expressar as informações contidas na imagem, segundo o plano cartesiano X e Y, Figura 4.

³ Menor elemento de um dispositivo de exibição, ao qual é possível atribuir-se um valor de reflectância.

⁴ Abreviatura de Sistema de Informação Georreferenciada, que atribui uma localização reconhecida.

Figura 4 - Processo aplicado à uma das cinco amostras em escala a partir da sua digitalização através do escaneamento (A), aplicação do contraste linear das bandas RGB (B) e seleção do recorte amostral (C), seleção do canal do azul visível da imagem e isolamento do recorte (D), ampliação aleatória do recorte ea análise visual do melhor a ser classificado (E) e (F).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir da seleção das amostras já digitalizadas foi aplicado um contraste linear automático a fim de expandir os valores originais de cada *pixel* (0 a 255) a serem manipulados nas três bandas espectrais do visível (RGB)⁵ capturadas conjuntamente pelo processo prévio de escaneamento. Especificamente à faixa do azul (*Blue*) foi definida como a mais adequada, com base nos resultados de Björklund *et al.* (2014), na mensuração das distintas densidades do tecido vegetal em cada uma das amostras com base na aplicação resultante demonstrada na primeira etapa de Resultados e Discussões deste manuscrito. Na sequência, foram identificadas por análise exploratória e treinadas simulações de duas classes espectrais em cada um dos recortes, tecido vegetal tardio (i.e., menor brilho) e tecido vegetal jovem (i.e., maior brilho).

Ao fim da análise preliminar e treinamento simulatório, foram selecionadas seis amostras em cada um dos cinco recortes (três amostras no tecido vegetal tardio e três amostras no tecido vegetal jovem) medindo exatamente 10 x 50 pixels = 500, totalizando assim 3000 *pixels* amostrados para cada um dos cinco recortes (Figura 5). Esse modelo de classificação supervisionada interativa, *pixel a pixel*, utiliza a informação espectral de cada pixel a fim de identificar regiões homogêneas em cada

⁵ Abreviatura de uma paleta de cores, vermelho, verde e azul, que combinadas produz um largo espectro cromático.

classe do tecido vegetal analisado, discriminando os pixels a partir dos Níveis Digitais (ND), valores de *pixel* (brilho), cujas intensidades são resultantes da assinatura espectral, onde a composição química das células traqueídes tardias possam apresentar distintos comportamentos diante de uma fonte de radiação, refletindo um pulso eletro-magnético específico (Zanotta, 2019).

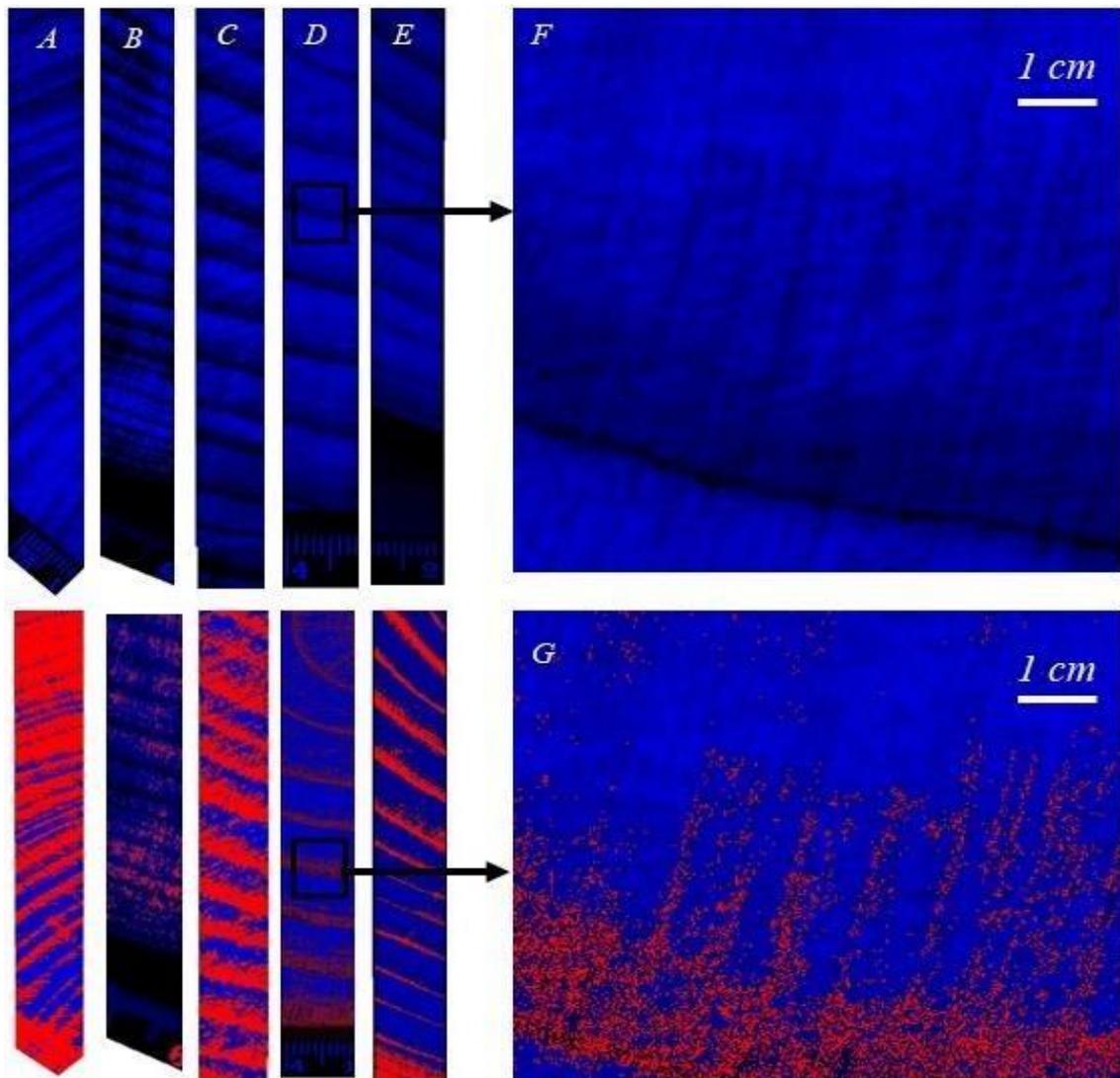
Após a classificação das amostras, que consiste em um processo de extração de informação em imagens digitais a fim de reconhecer padrões e executadas por algoritmos interativos como (*Iso Cluster* e *Maxver*)⁶ nas três bandas do visível (RGB) através do *software ArcGis versão 10.5*, que determina semelhanças entre os ND, ou agrupamentos de pixels baseados em modelos estatísticos (Cruz, 2009), os mesmos foram analisados a partir de histogramas, onde foi possível mensurar aos valores e frequências dos ND em cada recorte.

Quanto a validação aplicada ao processo de classificação das amostras, que busca determinar o grau de confiabilidade da análise estatística executada pelo *software*, utilizou-se como referência uma classificação visual, com vetorização manual, ação desenvolvida pelo *software* de SIG SPRING na sua versão 5.5.2 (CÂMARA *et al.*, 1996) desenvolvido e operacionalizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

⁶ Algoritmos matemáticos processados pelo software de SIG que agrupa os pixels por semelhança de Níveis Digitais (ND) ou pela distância de referência entre os mesmos ND.

A Figura 5 ilustra os cinco recortes (de A a E) selecionados no canal do azul e suas respectivas classificações. (F) mostra em detalhe o recorte (D) e (G) mostra em detalhe o tecido vegetal tardio após a classificação preliminar dos ND.

Figura 5 - Indica os cinco recortes amostrais (de A à E) na banda espectral do azul visível (acima) e suas respectivas classificações supervisionadas *pixel a pixel* (abaixo). Na cor azul o tecido vegetal jovem e em vermelho, o tecido vegetal tardio, detalhes (F e G).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas em treinamento, aproximadamente 15.000 *pixels* relacionados aos tecidos vegetais de *A. angustifolia* nas cinco amostras. Associadas às bandas RGB, foram identificadas através da manipulação de histograma as

estatísticas descritivas com base nos ND nos canais do azul, verde e vermelho. A Tabela 1 indica os valores mínimos, médios e máximos de brilho obtidos nos canais RGB, característicos em todas as cinco amostras. O canal do azul possui maior amplitude associado aos valores de brilho relacionado ao tecido vegetal tardio, em comparação aos canais do verde e do vermelho.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos Níveis Digitais (ND) obtidos nos tecidos vegetais nos canaisRGB.

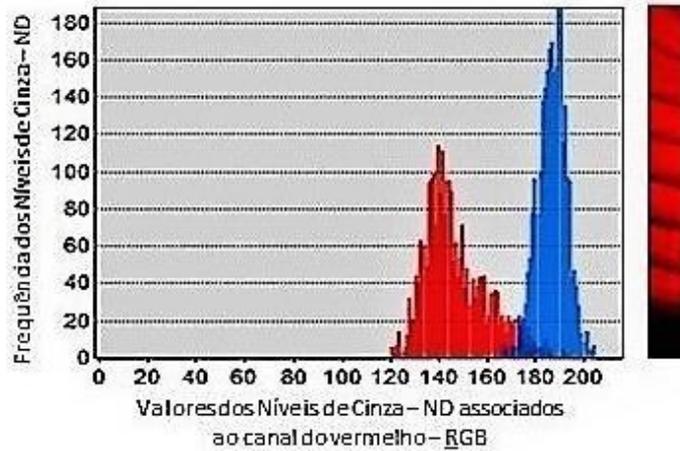
Níveis Digitais (ND)	Vermelho	Verde	Azul
Mínimo	131	81	56
Médio	153,83	122,13	94,68
Máximo	202	179	158
Amplitude	71	98	102

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os histogramas nos canais do vermelho, verde e azul, Figura 6, Figura 7 e Figura 8, respectivamente, representam a frequência de valores de ND dos tecidos vegetais tardios e jovens característicos nas amostras, e revelam que o canal azul é aquele que melhor discrimina a resposta de brilho de ambos os tecidos. Os histogramas referentes aos canais vermelho e azul indicam uma expressiva sobreposição de valores de brilho entre os dois tipos de tecidos, mais marcadamente ainda no canal verde. Isto significa que na imagem, muitos *pixels* de tecidos tardios e jovens se revelam na imagem com brilhos semelhantes, condição que não é apropriada para interpretação visual ou classificação de imagens *pixel a pixel* visando a discriminação dos tecidos.

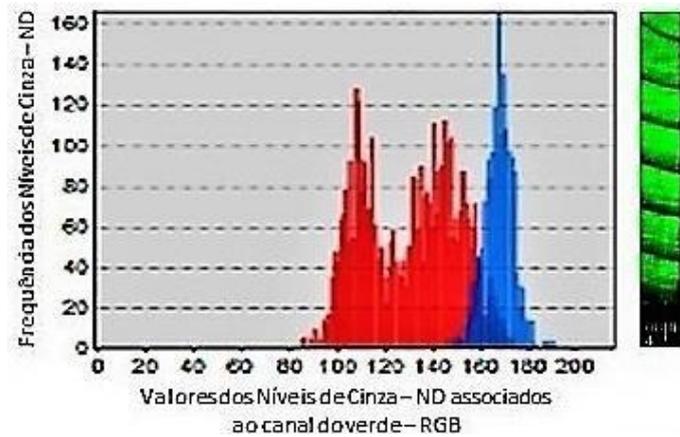
Já o canal azul, em relação aos demais, apresenta uma sobreposição reduzida de valores de brilho entre os dois tipos de tecido, sendo, portanto, mais indicado para uso na discriminação por classificação de imagens, já que os valores de *pixel* do tecido vegetal tardio lignificado possui valores de brilho expressivamente mais baixos em relação aos tecidos vegetais jovens.

Figura 6 - Histograma referente ao canal RED. As frequências de ND indicadas em azul referem-se aos tecidos jovens e, em vermelho, referentes aos tecidos tardios.



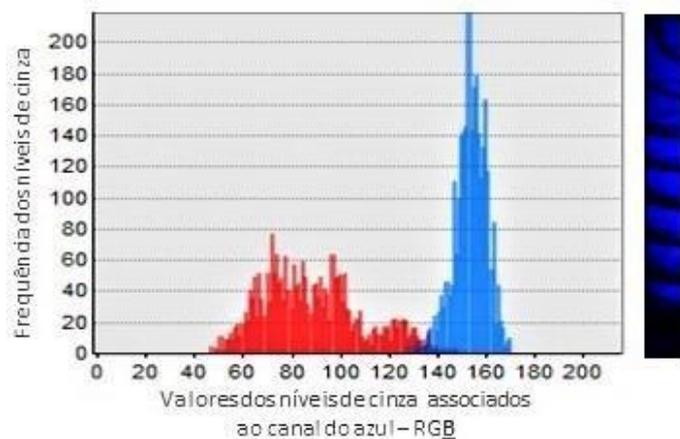
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 7 - Histograma referente ao canal GREEN. As frequências de ND indicadas em azul referem-se aos tecidos jovens e, em vermelho, referentes aos tecidos tardios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 8 - Histograma referente ao canal BLUE. As frequências de ND indicadas em azul referem-se aos tecidos jovens e, em vermelho, referentes aos tecidos tardios.



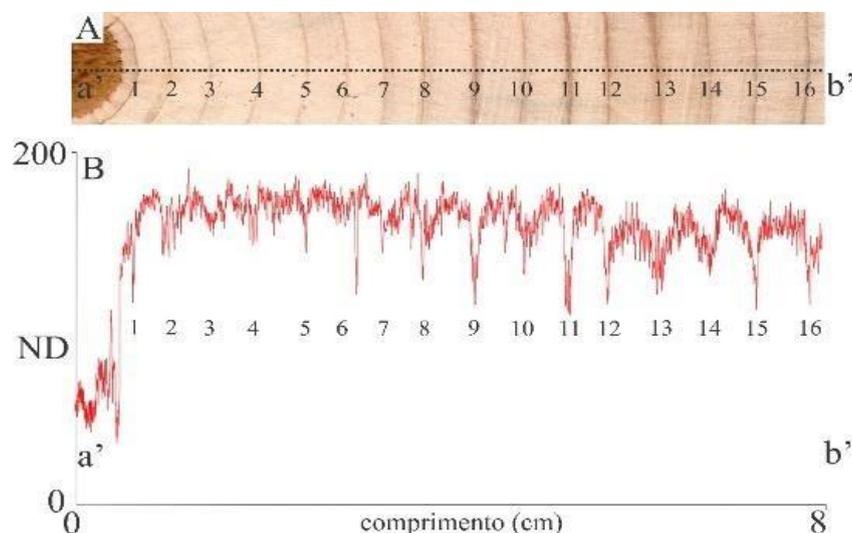
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Portanto, as discriminações identificadas, nos cinco recortes amostrais no canal do azul da imagem, relacionadas ao tecido vegetal tardio (i.e., lignificado), possuem relação com os resultados obtidos por Österreicher *et al.* (2006), Mc.Carroll *et al.* (2002) e Seftigen *et al.* (2020), pois quando expostos à radiação eletromagnética de onda de 440 a 485 nm. o brilho alcança os menores valores de ND. Isso ocorre devido a maior absorção da radiação visível, na faixa do azul, a partir do tecido lignificado, condição aqui explorada para a discriminação transversal destes tecidos em relação aos tecidos vegetais jovens.

Assim, se pode observar que o brilho e a frequência dos NDs, associados ao canal do azul visível, tende a seguir a densidade máxima do tecido vegetal tardio da espécie *A. angustifolia*, densidade esta que se manifesta no fim do período anual de desenvolvimento dos tecidos analisados. Esta condição permite, portanto, a identificação espacial dos tecidos que formam os anéis de crescimento.

Esta constatação é complementada a partir da observação da Figura 9 onde é apresentado um corte transversal sobre uma amostra onde são identificados visualmente dezesseis trechos sequenciais com densificação de lignina partindo do centro do disco amostral para a borda. Estes trechos, marcadamente anéis de crescimento, estão expressos no perfil espectral, a partir dos trechos de valores baixos de ND, em contraste ao padrão de valores mais elevados dos trechos de tecido não inverniais, observando transversalmente a amostra.

Figura 9 - Perfil transversal espectral a partir de valores de ND (banda do Azul) sobre amostra de *A. angustifolia*. A) imagem em composição colorida RGB-True Color; linha tracejada: linha se seção transversal espectral de a' – b'; números indicam as posições de densificação de lignina; B) perfil em valores de ND.

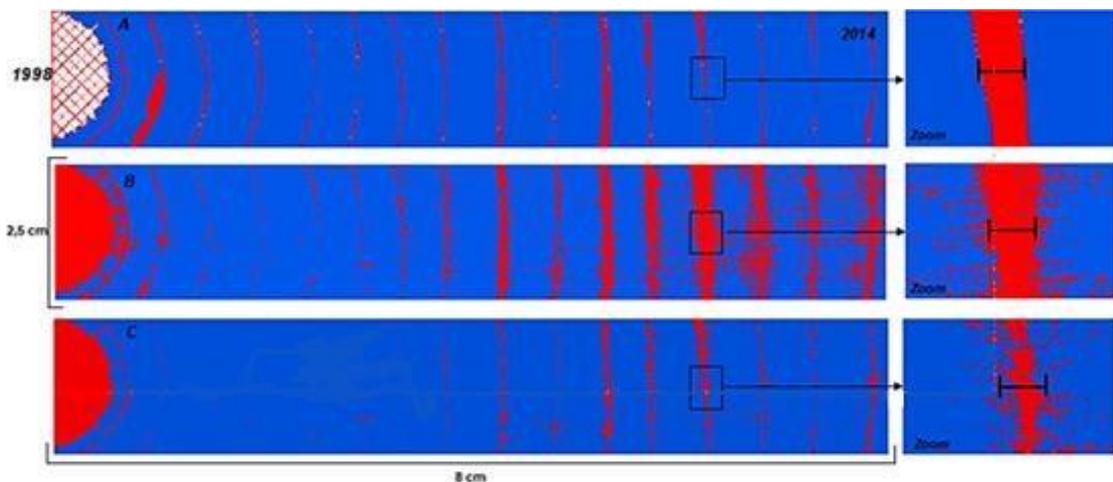


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Classificação e validação amostral

Em relação aos atributos utilizados na classificação supervisionada interativa, escopo central desta análise, considerou-se que todo *pixel* esteja associado uma única classe vegetal: tecido jovem ou tecido tardio. Posteriormente, a partir de uma vetorização manual (Figura 10 A) classificou-se visualmente os pixels associados aos tecidos vegetais a fim de propor uma classificação de referencial comparativo, um processo validativo entre a classificação supervisionada interativa (Figura 10 B) e uma classificação não supervisionada (Figura 10 C), utilizando-se neste último caso um algoritmo que identifica automaticamente classes a partir de agrupamentos de *pixels* com ND similares, no SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996).

Figura 10 - Diferentes modelos de classificação exercidos sobre o mesmo recorte amostral, apresentando distintos comportamentos espectrais entre os modelos. (A) Classificação visual de referência; (B) Classificação supervisionada; (C) Classificação não-supervisionada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com o objetivo de mensurar o erro amostral, quantificando a probabilidade de um pixel pertencer ou não a classe de tecido vegetal jovem ou tardio selecionado, foram conduzidos dois processos de validação envolvendo os modelos de classificação supervisionada interativa *pixel a pixel* e a classificação não supervisionada. Para o processo de validação, que avaliou o desempenho dos algoritmos de classificação dos *pixels*, utilizou-se uma matriz de erro ou confusão para descrever e testar o grau de concordância (confiabilidade e precisão) na classificação (PRINA; TRENTIN, 2015) eo coeficiente Kappa a fim de avaliar o grau de

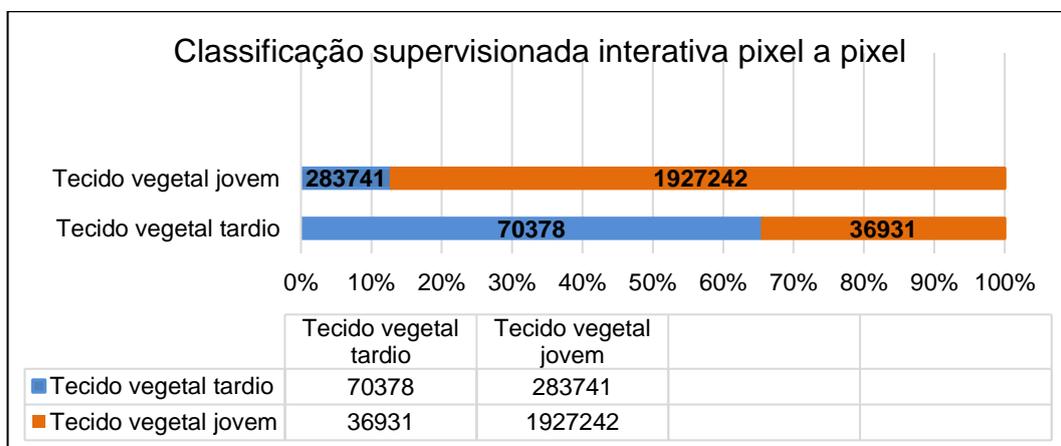
concordância estabelecido, da classificação supervisionada e não supervisionada com a classificação de referência.

No processo de validação, os valores de ND extraídos dos recortes a partir da estatística descritiva fornecida pelo *software*, foram processados calculando assim uma matriz de erro, onde para cada classe (tecido vegetal jovem e tardio) computou-se a fração de amostras que foram corretamente detectadas como tal e o número de amostras erroneamente classificadas, com base em cada classificador previamente selecionado com o intuito de poder avaliar a qualidade das amostras coletadas, e por consequência, da classificação da imagem.

O Gráfico 1 indica que o número de amostras coletadas, de forma supervisionada, do tecido vegetal jovem apresentou maior concordância com o algoritmo utilizado na classificação dos *pixels*, acompanhada pelo tecido vegetal tardio com cerca de 70% de acerto, embora apresentando uma amostragem mais difusa e com ruído referente aos ND associado ao anel de inverno, resultado associado ao item B da Figura 10.

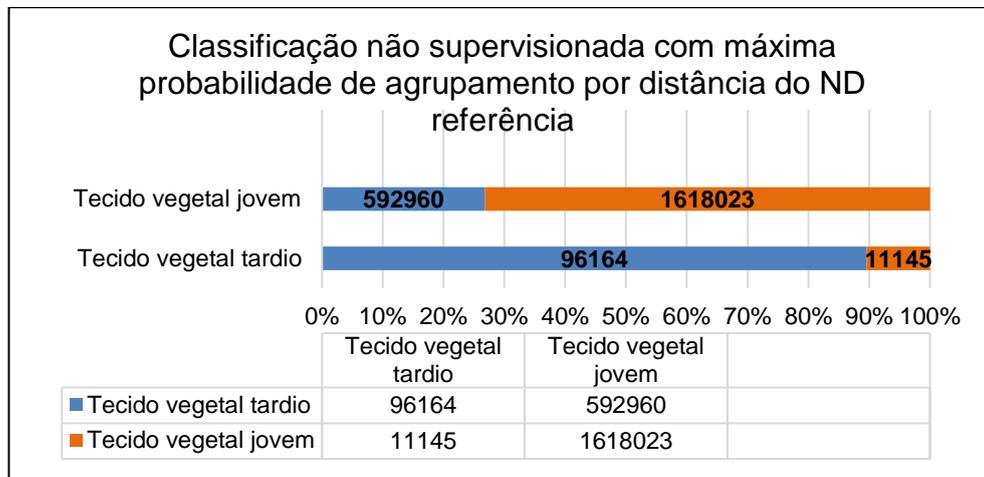
O Gráfico 2, a qual obteve uma discordância considerável de classificação *não* supervisionada dos ND do tecido vegetal jovem, próximo dos 30%, e uma concordância próxima dos 90% com relação ao tecido vegetal tardio, mesmo não considerando neste modelo de classificação, a interferência prévia do operador, resultado as-sociado ao item C da Figura 10.

Gráfico 1 - Indica os valores de ND concordantes associados aos tecidos vegetais jovem e tardio, a partir da classificação supervisionada interativa *pixel a pixel* sendo processada pelo algoritmo MAXVER. Coeficiente Kappa 0.2519 (fraco).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 2 - Indica os valores de ND associados aos tecidos vegetais jovem e tardio, a partir da classificação K médias, de forma **não** supervisionada, tendo como princípio básico de classificação o agrupamento em centros de grupos de *pixels*, com expressiva concordância no tecido tardio. Coeficiente Kappa 0.1754 (pobre).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Diante do que se pode observar, na descrição dos resultados, suas classificações e validações, que os mesmos apresentam concordância em distintos aspectos com os estudos realizados por Björklund *et al.* (2014), utilizando espécies de gimnospermas endêmicas do Hemisfério Norte.

Esta constatação sugere então a possibilidade de relação entre as distintas densidades dos tecidos vegetais jovens e tardios (que foram os anéis de crescimento), discriminadas por processamento digital de imagens, quando expostos à radiação eletromagnética de onda de 440 a 485 nm. (azul visível), associados aos menores valores de ND de cada *pixel* e a consequente possibilidade de quantificação desses valores, abordagem que encontra relação com Seftigen *et al.* (2020) e Fuentes *et al.* (2016) aplicado a espécie de gimnosperma, *Pinus Silvestris*, considerada exótica da flora Brasileira, sendo nativa do Hemisfério Norte.

Segundo Rydval *et al.* (2014), a densidade do tecido tardio de gimnospermas, ao contrário somente da largura do anel que se forma, tende a acompanhar com maior representatividade as mudanças climáticas ano a ano, entendida como câmbios de alta frequência, em vez de mudanças ao longo de décadas ou períodos mais longos, câmbios de baixa frequência. Assim, a espécie *A. angustifolia* confirma-se como importante elemento nos estudos *proxy*, vinculando o comportamento espectral dos tecidos tardios, formadores dos anéis de crescimento, associados ao polímero lignina, às distintas técnicas de PDI.

Quanto aos modelos de classificação utilizados neste ensaio, o algoritmo processado pelo *software* de forma não supervisionada, que considerou um *pixel* de referência (ND) e as mínimas distâncias geométricas associadas a este *pixel*, obteve maior sucesso quando comparado ao algoritmo classificador supervisionado que analisou *pixel a pixel* interativamente e os agrupou em ND semelhantes. Por fim, o presente ensaio destaca a importância do conhecimento prévio das questões relacionadas a formação dos anéis de crescimento, pois a vetorização manual não automática mostrou-se fundamental em termos comparativos aos modelos de classificação automática. A partir desta nova possibilidade oferecida pelo PDI, entende-se que o cruzamento com dados climatológicos e a geolocalização dos remanescentes nativos de *A. angustifolia* possa proporcionar modelos de classificação de imagens regionalizados, e sua relação com os eventos climáticos extremos.

CONCLUSÕES

As características sazonais atmosféricas bem definidas e específicas, associadas às regiões com clima subtropical, como o que ocorre no Município de Caxias do Sul, induz à dormência anual de algumas espécies vegetais arbóreas, formando assim os tecidos que caracterizam os anéis de crescimento jovens no verão e os anéis tardios lignificados no inverno. Tendo como objetivo o caráter mais descritivo do que analítico, através do ensaio foi possível, através das classificações propostas, discriminar, diferenciar e quantificar, a partir do PDI, as alterações nos tecidos vegetais tardios associados ao polímero lignina dos demais tecidos jovens presentes nas amostras.

Com base nos dois modelos de classificação propostos, comparados à classificação visual de referência, foi possível identificar um certo padrão de concordância entre as amostras, muito embora no cenário da classificação não supervisionada, que ponderou as distâncias médias entre os ND de cada *pixel* e os agrupou tenha obtido o melhor sucesso, traduzindo a menor margem de erro e com uma validação mais apurada. O ensaio experimental apontou elementos promissores não apenas na interpretação dos tecidos tardios, mas como também na interpretação dos tecidos jovens, um resultado que até então não havia expectativas. Foi possível também explorar o potencial de uso de análise e classificação por processamento de imagens, sugerindo que eventos ambientais e a intensidade cronológica

desses fenômenos possam ser traduzidos nos tecidos vegetais de *A. angustifolia* a partir dos valores de ND da faixa espectral do azul visível, analisando o incremento da densidade dos tecidos tardios identificados a partir do canal do azul visível, associados ao polímero lignina, sugerem períodos anuais de inverno com intensidade mais elevada, possibilitando a identificação de possíveis padrões sazonais.

REFERÊNCIAS

- BJÖRKLUND, J.A.; GUNNARSON, B.E.; SEFTIGEN, K.; ESPER, J.; LINDERHOLM, H.W. Blue intensity and density from Northern Fennoscandian tree rings: using earlywood information to improve reconstructions of summer temperature. **Clim Past.**, v.10, p.877–885, 2014.
- BORSATTO, S.; DANI, N.; BRESSANI, L. A.; LISBOA, N. A. Mapeamento geológico da área urbana de Caxias do Sul como etapa da cartografia geotécnica. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v.5, p.83-92, 2015.
- CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v.20, n.3, p.395-403, May-Jun 1996.
- CAMPBELL, R.; MCCARROLL, D.; ROBERTSON, I.; Loader, N.J. Hakan Grudd, and Björn Gunnarson “Blue Intensity in *Pinus sylvestris* Tree Rings: A Manual for A New Palaeoclimate Proxy”. **Tree-Ring Research**, v.67, n.2, p.127-134, 2011.
- FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **Arquivos digitais para uso em SIG – base cartográfica digital do RS 1:250.000**. Porto Alegre: FEPAM, 2005.
- FUENTES, M.; BJÖRKLUND, J.; SEFTIGEN, K.; SALO R.; GUNNARSON, B.E.; LINDERHOLM, H.W.; ARAVENA, J.C..A comparison between Tree-Ring Width and Blue Intensity high and low frequency signals from *Pinus Sylvestris* L. from the Central and Northern Scandinavian Mountains. **TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**, v.14, 2016.
- KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Fundo de Cultura Econômica. 1931.
- MC CARROLL, D., PETTIGREW, E., LUCKMAN, A., GUIBAL, F.; EDOUARD, J.L. Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree-rings. **Arctic, Antarctic and Alpine Research** v.34, p.450–53, 2002.
- OLIVEIRA, J. M. **Anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: bases de dendrocronologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil**. 2007. 139 f. Tese, (Doutorado em ecologia) - Setor de Biociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA, J. M.; PILLAR, V. D.; ROIG, F. A. Padrões de idade e crescimento de *Araucaria angustifolia*: Reconstruindo históricos de distúrbios e dinâmica vegetacional. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8, Caxambu, 2007. **Anais** Caxambu, 2007.

PIERUZZI, F. P. Criopreservação de *Araucaria angustifolia* (BERT.) O.KUNTZE: ASPECTOS FISIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS. 2013. Tese, (Doutorado em biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em biotecnologia, Universidade de São Paulo – USP, Instituto Butantan – IPT, São Paulo, 2013.

PRINA, B. Z.; TRENTIN, R. GMC: Geração de matriz de confusão a partir de uma classificação digital de imagens do ArcGIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17, 2015, João Pessoa-PB, Brasil. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015.

RAVEN, P. H.; EICHHORN, S. E.; EVERT, R. F. Evert. **Biologia Vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda., 2014. 1637 p.

RYDVAL, M.; LARSSON, L-Å.; MCGLYNN, L.; GUNNARSON, B.E.; LOADER, N.J.; YOUNG, G.H.; WILSON, R. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland. **Dendrochronologia**, v.32, p.191–204, 2014.

SEFTIGEN, K.; FUENTES, M.; LJUNGQVIST, F.; BJÖRKLUND; Using Blue Intensity from drought-sensitive *Pinus silvestris* in Fennoscandia to improve reconstruction of past hydroclimate variability. **Climate Dynamics**, v.55, p.579–594, 2020.

SOXHLET, F. Die gewichtsanalytische Bestimmung des Milchfettes. **Dinglers Polytechnisches Journal**, v.232, p.461-465, 1879.

SOUZA, M. I. F. **Análise da diversidade genética de populações de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze utilizando marcadores AFLP**. 2006. 75 f. Dissertação, (Mestre em Ciências Biológicas) – Setor de Genética, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

4 PRODUTO TÉCNICO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

O produto final da dissertação caracteriza-se como um vídeo de divulgação técnico/científica, viabilizado através da iniciativa exclusiva da empresa privada ÁBACOPARTICIPAÇÕES, que concentra entre seus diretores e colaboradores a profunda certeza no valor da ciência como o único caminho para o desenvolvimento de uma sociedade justa e igualitária.

O vídeo, intitulado com a mesma temática do artigo científico “PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADO À ANÁLISE DENDROLÓGICA DE *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) O. KUNTZE”, trata da condução do ensaio metodológico e suas perspectivas, sendo gravado com tomadas externas e internas junto às dependências do Laboratório de Ecologia Vegetal – LEV, integrado ao campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, na cidade de São Leopoldo/RS, com a participação do Prof. Dr. Juliano Morales de Oliveira, que representa a instituição.

Aborda as técnicas associadas ao Processamento Digital de Imagens – PDI, onde foi possível mensurar os anéis de crescimento que formam os tecidos de vascularização e sustentação da espécie, oportunizando assim uma nova perspectiva de análise, com desdobramentos não somente ao meio acadêmico, mas com análise profissional focada na prática, relacionada à conservação dos remanescentes florestais da espécie endêmica da América do Sul e ameaçada de extinção. Através da metodologia adotada, buscou-se correlacionar a íntima relação entre variações atmosféricas pretéritas associadas a precipitação, temperatura e sequestro de CO₂ com os anéis de crescimento interanuais, que formam os tecidos vegetais da espécie, a *Araucaria angustifolia*.

Possui aproximadamente cinco minutos de duração, e foi conduzido sob orientação e supervisão do Prof. Dr. Clódís de Oliveira Andrades Filho representante institucional da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS, e contou com a apresentação do mestrando do presente PPG. Conta com estratégias de divulgação e alcance em instituições de ensino, assim como ferramentas de mensuração do seu impacto, utilizando por exemplo a plataforma de compartilhamento de vídeos do Youtube, com *tags* de pesquisa relacionados ao tema de mudanças climáticas e seus fenômenos e eventos extremos, assim como a conservação da espécie, sendo que as métricas de divulgação, associados a plataforma, levou em consideração o tempo de duração do vídeo, a contemporaneidade e consistência do tema.

Por fim, com seu caráter exclusivamente técnico/científico, o vídeo integra-se como o produto técnico final do curso, associado a linha de pesquisa “Tecnologias Sustentáveis para o Desenvolvimento” do Programa de Pós Graduação em Ambiente e Sustentabilidade da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – PPGAS UERGS, e busca atender o regimento interno da instituição, especialmente em seu Art.20.

Link de acesso ao vídeo: <https://youtu.be/IlCX7awjE0k>

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos objetivos, estabelecidos no delineamento amostral no início da pesquisa, tendo como objetivo específico de discriminar as alterações espectrais no tecido vegetal tardio de *A. angustifolia*, através do processamento digital de imagens e avaliar a empregabilidade em uma espécie de gimnosperma endêmica do sul da América do Sul, a presente dissertação atingiu os objetivos científicos e técnicos propostos. Diante da análise e resposta espectral dos tecidos vegetais tardios e jovens da espécie *A. angustifolia*, submetidos ao PDI, foi possível obter distintos valores de reflectância especialmente entre os tecidos associados ao polímero fenólico lignina e consequentemente com maior densidade, estabelecendo uma íntima relação com o método proposto por Björklund *et al.* (2014).

Destacam-se os resultados obtidos a partir de *softwares* de SIG com ferramentas operacionais de PDI, que conseguiram traduzir de forma satisfatória as alterações nos tecidos vegetais de *A. angustifolia* em modelos matemáticos capazes de diferenciar os distintos tecidos vegetais tardios e jovens da espécie, que foram os anéis anuais de crescimento. A possibilidade de utilização dos processos envolvendo o PDI, na interpretação dos tecidos vegetais de *A. angustifolia* cria, a partir desta nova abordagem, uma oportunidade que até então era pouco explorada, envolvendo a datação cruzada entre as distintas fontes de mensuração de anéis associadas a dendrocronologia.

Entretanto, aponta-se a necessidade de que novas abordagens sejam conduzidas no sentido de relacionar a densidade dos anéis de *A. angustifolia* com aspectos do clima regional em que a espécie esteja inserida, oportunizando os seguintes temas:

a) datação cruzada das informações referentes a densidade dos tecidos tardios com *softwares* que abordem somente a contagem dos anéis, como por exemplo o *Coorecorder*, b) estimular a análise retroativa aos eventos climáticos extremos e ou períodos recorrentes de mudanças climáticas, c) tornar público, no aspecto do alcance, o produto técnico/vídeo produzido como ferramenta didática e d) construir ações continuadas que permitam maior visibilidade ao produto técnico elaborado.

6. REFERÊNCIAS

- ALBIERO JÚNIOR, A. A. **Estrutura populacional e dendroecologia de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes condições de crescimento no parque nacional de Iguaçu/PR: Interior e borda de floresta natural.** 2014. 95f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Botânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.
- ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de Imagens: Métodos e Análises.** Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/Ministério de Ciências e Tecnologia – CBPF/MCT, 2000.
- ANJOS, A.; MAZZA, M. C. M.; SANTOS, A. C. M, C. S.; DELFINI, L. T. Análise do padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas no Estado do Paraná, utilizando a função K de Ripley. **Scientia Forestalis**, v.66, n.50, p.38-45, 2004.
- BACKES, A. **Floresta com Araucária, ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável.** Ribeirão Preto: Editora Holos, 2009.
- BARBOSA, L. O. **Efeito da competição no incremento em área transversal de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em floresta ombrófila mista, no sul do Brasil.** 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade de Santa Maria, RS, 2018. (a).
- BARBOSA, A. C. M. **Estudo promove a reconstrução do clima da Amazônia a partir de anéis de crescimento de árvores.** Escrito por: na Eliza Alvim. Portal UFLA, Publicado em 07 junho 2018. Disponível em: <https://ufla.br/noticias/pesquisa/11975-estudo-promove-a-reconstrucao-do-clima-da-amazonia-a-partir-de-aneis-de-crescimento-de-arvores>. (b).
- BERNARDI, H. V. F.; DZEDZEJ, M.; CARVALHO, L. M. T.; ACERBI JÚNIOR, F. W. Classificação digital do uso do solo comparando os métodos “pixel a pixel” e orientada ao objeto em imagem QuickBird. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007.
- BIOLAW. **Estudo Técnico Científico - Zoneamento Ambiental para a Atividade de Silvicultura no Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Biolaw, 2006.
- BITTENCOURT, J. V. M.; SEBBENN, A. M. Genetic effects of forest fragmentation in high-density *Araucaria angustifolia* populations in Southern Brazil. **Tree Genetics & Genomes**, v.5, n.4, p.573–582, 2009.
- BJÖRKLUND, J.A.; GUNNARSON, B.E.; SEFTIGEN, K.; ESPER, J.; LINDERHOLM, H.W. Blue intensity and density from Northern Fennoscandian tree rings: using earlywood information to improve reconstructions of summer temperature. **Clim Past.**, v.10, p.877–885, 2014.

BORSATTO, S.; DANI, N.; BRESSANI, L. A.; LISBOA, N. A. Mapeamento geológico da área urbana de Caxias do Sul como etapa da cartografia geotécnica. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v.5, p.83-92, 2015.

BOTOSO, P. C.; MATTOS, P. P. **Conhecer a idade das árvores: importância e aplicações**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Livro vermelho da flora brasileira ameaçada de extinção**. Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: Fundação Biodiversitas, 2008.

CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v.20, n.3, p.395-403, May-Jun 1996.

CAMPBELL, R.; MCCARROLL, D.; ROBERTSON, I.; Loader, N.J. Hakan Grudd, and Björn Gunnarson "Blue Intensity in *Pinus sylvestris* Tree Rings: A Manual for A New Palaeoclimate Proxy". **Tree-Ring Research**, v.67, n.2, p.127-134, 2011.

CAMPÔA, J.F.S. **Influência do clima no crescimento de Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster*) e Pinheiro-Manso (*Pinus pinea*) em florestas costeiras de Portugal Continental**. 2018. 100f. Dissertação (Mestrado em engenharia do ambiente) - Universidade Nova de Lisboa, 2018.

CASTELLA, P.R.; BRITTEZ, R.M. **A Floresta com Araucária no Paraná: conservação e diagnóstico dos remanescentes florestais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.

CHIAPPETTI, M.; KROB, A.; GUADAGNIM, D.; Revisão e atualização dos limites e zoneamento da reserva da biosfera da Mata Atlântica em base cartográfica digitalizada. Instituto amigos da RBMA, faze VI/2008.

COPAM. **Deliberação COPAM nº 85, de 21 de outubro de 1997**. Aprova a lista das espécies ameaçadas de extinção da flora do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Diário do Executivo, Minas Gerais, 30 out. 1997.

CRUZ, Z.Q; SILVEIRA, J.C; RIBEIRO, J.P. Ensaio de segmentação e classificação digital de uma unidade de conservação com imagens CBERS utilizando o sistema SPRING. Estudo de caso: Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009.

DUARTE, L. S.; DILLENBURG, L. R. Ecophysiological responses of *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) seedlings to different irradiance levels. **Australian Journal of Botany**, v.48, n.4, p.531-537, 2000.

DUARTE, L. S.; DILLENBURG, L. R.; ROSA, L. M. G. Assessing the role of light availability in the regeneration of *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae). **Australian Journal of Botany**, v.50, n.6, p.741-751, 2002.

DUTRA, T. L.; STRANZ, A. Biogeografia, evolução e ecologia da família Araucariaceae: o que mostra a Paleontologia. In: FONSECA, C.R.; SOUZA, A. F.; LEAL-ZAN-

CHET, A. M.; DUTRA, T. L.; BACKES, A.; GRANADE, G. (eds.) **Floresta com Araucária: Ecologia, Conservação e Desenvolvimento Sustentável**. Ribeirão Preto: Holos, 2009. p. 15-33.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **Arquivos digitais para uso em SIG – base cartográfica digital do RS 1:250.000**. Porto Alegre: FEPAM, 2005.

FONTANA, C.; ÁVILA, G.R.; NABAIS, C.; BOTOSSO, P.C.; OLIVEIRA, J.M. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. **Neotropical Biology and Conservation**, v.13, n.4, p.321-333, oct./dec. 2018.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a terra**. 6. ed. Porto Alegre: Ed. Bokman, 2013.

GUEDES, L.A. **Estudo dos anéis de crescimento de árvores da região sul do Brasil**. Relatório final de projeto de iniciação científica. Santa Maria: PIBIC/CNPq/INPE, 2012.

HADAD, M.A.; JUNENT, F.A.R.; BONONSEGNA, J.A.; PATÓN, D. **Agge effects on the climatic in *Araucaria araucana* from xeric sites in Patagonia**. Argentina: Plant Ecology & Diversity, 2014.

HAMPP, R.; MERTZ, A.; SCHAIBLE, R.; SCHWAIGERE, M.; NEHLS, U. Distinction of *Araucaria angustifolia* seeds from different locations in Brazil by a specific DNA sequence. **Trees**, v.14, n.8, p.439-434, 2000.

HAYLES, L. A.; GUTIÉRREZ, E.; MACIAS, M.; RIBAS, M.; BOSCH, O.; CAMARERO, J. J. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. **Global Change Biology**, v.13, n.7, p.804-815, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa da Área de Aplicação da Lei Federal nº 11.428 de 2006** (Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008, publicado no Diário da União de 24 de novembro de 2008).

IUCN. 2013. **Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN 2013**: e.T32975A2829141. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32975A2829141.en>. Acesso em 22 de março de 2022.

JANSEN, E., et al. Palaeoclimate. In S. Solomon; D. Qin; M. Manning; Z. Chen; M. Marquis; K.B. Averyt; M. Tignor; H.L. Miller. (eds.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, pp. 433-497.

KAPOURY, S. Potential of dendrochronology in assessing carbon sequestration rates of *Vitellaria paradoxa* in southern Mali, West Africa. **Dendrochronologia**, v.40, 2016.

KERSHAW, P.; WAGSTAFF, B. The Southern Conifer Family Araucariaceae: history, Status, and Value for Paleoenvironmental Reconstruction. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.32, n.14, p.397-414, 2001.

KLEIN, R. M. **Espécies raras ou ameaçadas de Extinção do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: IBGE. Diretoria de Geociências, 1990.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Fundo de Cultura Econômica. 1931.

LIEBERMAN, D.; LIEBERMAN, M.; PERALTA, R.; HARTSHORN, G.S. Mortality patterns and stand turnover rates in a wet tropical forest in Costa Rica. **Journal of Ecology**, v.73, n.5, p. 915-924, 1985.

MARCUZZO, S.; PAGEL, S.; CHIAPPETTI, M.; **A Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Rio Grande do Sul, situação atual, ações e perspectivas**. Caderno nº 11, verão de 1998, CETESB.

Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 791 p.

MANTOVANI, A.; MORELLATO, L. P. C.; REIS, M. S. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Revista Brasileira de Botânica**, v.27, n.4, p.787-796, 2004.

MARCUZZO, S.; PAJÉ, S. M.; CHIAPPETTI, M. I. S. **A Reserva da Biosfera da Mata Atlântica - RBMA no Rio Grande do Sul: situação atual, ações e perspectivas**. Porto Alegre: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 1998. 60p.

MATTOS, P. P. de; BRAZ, E. M. **Anéis de crescimento e clima**. Reunião técnica, EMBRAPA FLORESTAS – Doc. 236; jun. 2012.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB, 2012.

OLIVEIRA, J. M.; PILLAR, V. D.; ROIG, F. A. Padrões de idade e crescimento de *Araucaria angustifolia*: Reconstruindo históricos de distúrbios e dinâmica vegetacional. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8, Caxambu, 2007. **Anais...** Caxambu, 2007.

OLIVEIRA, J. M.; ROING, F. A.; PILLAR, V. D. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in southern Brazilian highlands. **Austral Ecology**, v.35, n.2, p.134-147, 2010.

OLIVEIRA J. M.; SANTAROSA E.; PILLAR V. D.; ROIG F. A. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. **Trees**, v.23, p.107- 115, 2009.

PALERMO, G. P. de M.; LATORRACA, J. V. DE F.; ABREU, H. DOS S. Métodos e técnicas de diagnose de identificação dos anéis de crescimento de árvores tropicais. **FLORAM**, v.9, n. único, p.165-175, 2002.

PALUDO, G. F.; MANTOVANI, A.; KLAUBERG, C.; REIS, M. S. Estrutura demográfica e padrão espacial de uma população natural de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze (Araucariaceae), na reserva genética florestal de Caçador, estado de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v.33, n.6, p.1109-1121, 2009.

PELÁEZ, B. C. **Reconstrucción de incendios florestales mediante la dendrocronología em la Sierra Madre Oriental, México**. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Florestales, Linares, Nuevo León, 2019.

PEREIRA, L. D. **Dendroecologia de *Cedrela fissilis* (Vell.) na região de Santa Maria, RS**. 2011. 63 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

QUEIROZ, R. B.; RODRIGUES, A. G.; GÓMEZ, A. T. Redes Neurais: Um comparativo com Máxima Verossimilhança Gaussiana na Classificação de Imagens CBERS 1. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO APLICADA AO MEIO AMBIENTE, 2., 2004, Itajaí. **Anais...** Itajaí: CBComp, 2004. p. 746-749.

RAVEN, P. H.; EICHHORN, S. E.; EVERT, R. F. Evert. **Biologia Vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda., 2014. 1637 p.

RIOS, C. M. **Capacidade regenerativa da floresta missioneira argentina frente a distúrbios antrópicos**. 2010. 172 f. Tese (Doutorado em engenharia florestal-Conservação da natureza) – Setor de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto Estadual CONSEMA n. 42.099 de 31 de dezembro de 2002**. Declara as espécies da flora nativa ameaçadas de extinção no estado do Rio Grande do Sul e da outras providências. Porto Alegre, Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Diário Oficial do Estado, 01 jan. 2002.

ROQUE, R.M.; TOMAZELLO, F. M. Relationships between anatomical features and intra-ring density profiles of *Gmelina arborea* applying X-ray densitometry. **Cerne**, Lavras, v.13, n.4, p.23-34, 2007.

ROSOT, M. A. D.; FILHO, A. F.; DISPERATI, A. A.; EMERENCIANO, D. B. Análise de tronco digital: uma nova metodologia para a medição de anéis de crescimento. **Revista Floresta**, v.33, n.3, p.235-255, 2003.

ROZAS, V.; DESOTO, L.; OLANO, J. Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus thurifera*. **New Phytologist**, v.182, p.687–697, 2009.

ROZENDAAL, D. M.; ZUIDEMA, P. Dendrocronology in the tropics: a review. **Trees**, v.25, n.1, p.13-16, 2011.

RYDVAL, M.; LARSSON, L-Å.; MCGLYNN, L.; GUNNARSON, B.E.; LOADER, N.J.; YOUNG, G.H.; WILSON, R. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland. **Dendrochronologia**, v.32, p.191–204, 2014.

SEITZ, R.A.; KANNINEN, M. Treering analysis of *Araucaria angustifolia* in Southern Brazil: preliminary results. **IAWA Bull**, v.10, n.2, p.170-174, 1989.

SETOGUCHI, H.; OSAWA, T. A.; PINTAUD, J.; JAFFRE, T.; VEILLON, J. M. Phylogenetic relationships within Araucariaceae based on RBCL gene sequences. **American Journal of Botany**, v.85, n.11, p.1507–1516, 1998.

SIMONELLI, M.; FRAGA, C. N. de (orgs.). **Espécies da flora ameaçadas de extinção no estado do Espírito Santo**. Vitória: Ipema, 2007.

SOUZA, A. F. et al. Seed crop size variation in the dominant South American conifer *Araucaria angustifolia*. **Acta oecologica**, v.36, n.1, p.126-134, 2010.

SOXHLET, F. Die gewichtsanalytische bestimmung des milchfettes. Polytecchnisches Journal, v.232, n.5, p.461-465, 1879.

VALENTE, T. P.; NEGRELLE, R. B.; SANQUETA, C. R. Regeneração de *Araucaria angustifolia* em três fitofisionomias de um fragmento de floresta ombrófila mista. **Iheringia**, v.65, n.1, p.17-24, 2010.

WEHR, N.J; TOMAZELLO FILHO. M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdensitometria de raios X. **Scientia florestalis**, v.58, n.53, p.161-170, 2000.

ZANOTTA, D.; ZORTEA M.; FERREIRA, M. P. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.