

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA
NÍVEL MESTRADO

ÂNDERSON JULIANO NUNES

Intensidade do azul em anéis de crescimento da conífera
subtropical *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

São Leopoldo
2024

ÂNDERSON JULIANO NUNES

Intensidade do azul em anéis de crescimento da conífera subtropical

Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Biologia: Diversidade e Manejo da Vida Silvestre, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Juliano Morales de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Júnior

São Leopoldo

2024

N972i Nunes, Ânderson Juliano.
Intensidade do azul em anéis de crescimento da
conífera subtropical *Araucaria angustifolia* (Bertol.)
Kuntze / por Ânderson Juliano Nunes. – 2024.
50 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Biologia, São
Leopoldo, RS, 2024.
Orientador: Dr. Juliano Morales de Oliveira.
Coorientador: Dr. Luiz Gonzaga da Silveira Júnior.

1. *Araucaria angustifolia*. 2. Dendrocronologia. 3. Anéis
de crescimento. 4. Intensidade do azul. 5. Mudanças
climáticas. I. Título.

CDU: 582.473:581.143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem (A) representa uma amostra com limites de anéis de crescimento bem definidos, em amarelo é representado o lenho inicial e em vermelho o lenho tardio. Na imagem (B) representa anéis parciais (indicação em cinza) e anéis interanuais (indicado em preto) (Imagem do autor).....	11
Figura 2. Localização e aspecto da paisagem do sítio de estudo, no Loteamento Terra Nobre, em Caxias do Sul/RS. A imagem de satélite, do ano de 2013, foi obtida na plataforma GoogleEarth (https://earth.google.com/).....	30
Figura 3. Diagrama climático, demonstrando a variação sazonal da temperatura e da precipitação para a região do sítio de estudo, Loteamento Terra Nobre (Caxias do Sul, Brasil) segundo estimativas da base de dados TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018), para o período de 1958 a 2023.....	31
Figura 4. Cronologia de largura de anel (RW) para <i>Araucaria angustifolia</i> , no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. A cronologia é baseada em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Em (A), séries brutas de RW por árvore. Em (B), séries de índices residuais de RW por árvore e média bponderada (em preto), valores de correlação média ($r\text{-bar}$) e Sinal Expresso da População (EPS) em janelas móveis de 20 anos. Em (C), número de séries de árvores por ano.	36
Figura 5. Cronologia de máxima intensidade do azul no lenho tardio (MXBI) para <i>Araucaria angustifolia</i> , no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. A cronologia é baseada em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Em (A), séries brutas de MXBI por árvore. Em (B), séries de índices residuais de MXBI por árvore e média bponderada (em preto), valores de correlação média ($r\text{-bar}$) e Sinal Expresso da População (EPS) em janelas móveis de 20 anos. Em (C), número de séries de árvores por ano.	37
Figura 6. Associação entre as cronologias de largura de anéis (RW) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio de anéis (MXBI) de <i>Araucaria angustifolia</i> , no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil.....	38
Figura 7. Funções de Correlação para as cronologias de anéis de crescimento de <i>Araucaria angustifolia</i> , no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. Os gráficos representam coeficientes de correlação de Pearson das séries médias de largura (RW) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio (MXBI) com as séries de precipitação total (PRE), temperatura média do ar (TEM) e Índice de	

Severidade de Seca de Palmer (PDSI), para os trimestres abrangendo da primavera da estação de crescimento prévia (pOND) ao outono da estação de crescimento corrente (AMJ). Os coeficientes de correlação significativos ($\alpha = 0.05$) estão assinalados com asteriscos.39

Figura 8. Sinais climáticos das cronologias de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. Os gráficos mostram as séries médias de largura (*RW*) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio (*MXBI*) com as séries climáticas que demonstraram correlações significativas nas análises de Função de Correlação, respectivamente, a de precipitação total do outono prévio (PRE) e a temperatura média do ar do outono corrente (TEM).40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros e configurações utilizadas no software CooRecorder (Larsson, 2014) para mensuração da máxima intensidade do azul do lenho tardio (<i>MXBI</i>), em árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> do sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil.....	33
Tabela 2. Estatísticas descritivas das cronologias de largura de anel (<i>RW</i>) e de máxima intensidade de azul do lenho tardio (<i>MXBI</i>) para <i>Araucaria angustifolia</i> , no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. As cronologias são baseadas em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Os valores são estimativas de médias e desvios padrão. MSI, <i>r</i> -int, <i>r</i> -bar e EPS foram calculados com séries de índices residuais.....	35

RESUMO

Este estudo investigou a viabilidade de *Araucaria angustifolia* como proxy dendroclimático em regiões subtropicais, com foco na largura dos anéis de crescimento (RW) e na máxima intensidade do azul do lenho tardio (MXBI). As análises mostraram que as cronologias de RW e MXBI apresentaram sincronia, refletindo respostas ecofisiológicas às variações climáticas. A RW correlacionou-se positivamente com a precipitação do trimestre abril-junho do ano anterior, sugerindo que chuvas no outono anterior favorecem anéis mais largos. Já o MXBI correlacionou-se com a temperatura média do mesmo período do ano corrente, indicando que temperaturas mais altas promovem a lignificação do lenho tardio, resultando em maior intensidade óptica. Esses padrões refletem diferentes fases do ciclo de crescimento da espécie. O MXBI mostrou-se mais relacionado a variáveis térmicas, especialmente a temperatura média do outono, do que a variáveis hídricas como a precipitação e o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), cuja ausência de correlação sugere que a alta disponibilidade hídrica do local atenua o impacto da seca. A correlação moderada entre MXBI e RW ($r = 0,45$, $p = 0,002$) sugere interação entre parâmetros anatômicos e ópticos no registro climático. O EPS para MXBI foi 0,745, inferior ao da RW (0,894), indicando maior robustez da RW como proxy climático. No entanto, a combinação de ambos se mostrou eficaz para reconstruir temperaturas outonais. A capacidade do MXBI de refletir condições térmicas locais é valiosa para entender mudanças climáticas em regiões subtropicais. Futuros estudos devem integrar diferentes proxies e expandir análises a outros contextos ecológicos para aprimorar reconstruções climáticas e estratégias de conservação.

ABSTRACT

This study investigated the feasibility of *Araucaria angustifolia* as a dendroclimatic proxy in subtropical regions, focusing on tree-ring width (RW) and maximum latewood blue intensity (MXBI). The analyses revealed synchronicity between RW and MXBI chronologies, reflecting eco-physiological responses to climate variability. RW showed a positive correlation with precipitation from April to June of the previous year, suggesting that higher rainfall in the preceding autumn favors wider rings. In contrast, MXBI correlated with the mean temperature for the same period of the current year, indicating that higher temperatures enhance latewood lignification, resulting in greater optical intensity. These patterns highlight distinct climatic responses for each proxy, reflecting different growth cycle phases. MXBI was more strongly related to thermal variables, particularly mean autumn temperature, than to hydrological variables such as precipitation and the Palmer Drought Severity Index (PDSI), whose lack of correlation suggests that high water availability at the study site mitigates drought impacts on tree growth. The moderate correlation between MXBI and RW ($r = 0.45$, $p = 0.002$) indicates an interaction between anatomical and optical parameters in recording climate conditions. The EPS for MXBI was 0.745, lower than that of RW (0.894), demonstrating RW's greater robustness as a climate proxy. However, combining both proxies proved effective in reconstructing autumn temperatures. MXBI's ability to reflect local thermal conditions during autumn is valuable for understanding climate changes in subtropical regions. Future studies should integrate multiple proxies and expand analyses to other ecological contexts to improve climate reconstructions and support conservation strategies.

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO	8
2.	REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1	REFERÊNCIAS	20
3.	ARTIGO: INTENSIDADE DO AZUL EM ANÉIS DE CRESCIMENTO DA CONÍFERA SUBTROPICAL <i>ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA</i> (BERTOL.) KUNTZE ..	26
3.1	INTRODUÇÃO.....	26
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.2.1	Caracterização do sítio de estudo.....	29
3.2.2	Obtenção e processamento das amostras.....	31
3.2.4	Cronologias médias e sinais climáticos	33
3.3	RESULTADOS	34
3.3.1	Cronologias de anéis de crescimento	34
3.3.2	Sinais entre as cronologias e com o clima	38
3.4	DISCUSSÃO.....	41
3.5	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICES	50

1. APRESENTAÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado, intitulada “Intensidade do azul em anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*”, está organizada de acordo com as diretrizes de um artigo científico, precedido por uma revisão de literatura que oferece uma visão abrangente sobre a dendrocronologia de *Araucaria angustifolia* e suas interações com variáveis climáticas. A revisão inclui também um panorama das metodologias mais recentes em dendroclimatologia, focando especialmente no uso de proxies como a largura dos anéis (RW) e a intensidade do azul (BI) para reconstrução de dados climáticos.

O artigo científico, central desta dissertação, está estruturado em cinco seções principais: (i) Introdução, que apresenta o contexto e os objetivos do estudo; (ii) Materiais e Métodos, detalhando os procedimentos experimentais, desde a coleta de amostras até as técnicas de análise de dados dendroclimáticos; (iii) Resultados, onde são apresentados os achados da pesquisa em relação às correlações entre os proxies de *Araucaria angustifolia* e variáveis climáticas; (iv) Discussão, que interpreta os resultados à luz das hipóteses e compara com estudos anteriores; e (v) Conclusão, que sintetiza os principais achados do estudo, destacando a aplicabilidade do BI como proxy climático, especialmente para temperatura em região subtropical. Por fim, as Referências, onde estão listados todos os artigos, livros e outras fontes consultadas para a produção deste artigo.

Essa estrutura busca proporcionar uma compreensão clara e organizada do estudo, desde o embasamento teórico até a análise e conclusões, e visa contribuir significativamente para a aplicação de *Araucaria angustifolia* como ferramenta dendroclimática, ampliando a compreensão sobre os impactos climáticos em regiões subtropicais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A dendrocronologia é a área de estudo dedicada à análise de séries temporais dos anéis de crescimento das plantas, visando inferir variações anuais em diversos fenômenos bióticos e abióticos relacionados ao desenvolvimento das plantas (Fritts, 1976). Os anéis de crescimento, estruturas anatômicas do xilema que se formam em determinadas plantas, apresentam variações em sua composição como resposta às interações ecológicas ao longo da vida do organismo (Oliveira, 2007). Embora as árvores de regiões frias sejam frequentemente utilizadas em dendrocronologia devido à sazonalidade térmica pronunciada que induz a formação de anéis de crescimento anuais, também existem plantas em regiões tropicais e subtropicais com anéis de crescimento anuais, que podem ser analisadas dendrocronologicamente (Brienen, 2016).

A compreensão de como o ambiente influencia o desenvolvimento do organismo, resultando em variações nos anéis de crescimento, é uma etapa crucial para realizar inferências dendrocronológicas específicas para uma determinada espécie (Fritts, 1976). Informações sobre condições e/ou eventos ambientais podem ser registradas numa árvore de diversas maneiras. Injúrias mecânicas, como por exemplo incêndios florestais, apresentam marcas mais visíveis. Outras podem ser facilmente identificadas na madeira, caso deixem marcas típicas, como por exemplo anéis de geada (Scipioni et.al., 2021). No entanto, é mais difícil identificar ocorrências ambientais que estejam codificadas em forma de largura, densidade, estrutura e composição química da madeira formada anualmente (Speer, 2010).

Com base nos resultados das informações ambientais registradas nos anéis de crescimento, é possível aplicar o princípio da datação cruzada, fundamental para a dendrocronologia (Fritts, 1976). Pois, estabelece que a correspondência de padrões da largura ou de outro parâmetro nos anéis de crescimento entre as diversas séries cronológicas (amostras) permite o reconhecimento do ano exato em que cada anel de crescimento foi formado (Cook & Kairiukstis, 2013). Essa marca fornece um tipo de controle, pois aferem o posicionamento adequado no tempo de cada camada de crescimento ao identificar erros primários de datação, causados por anéis falsos ou ausentes, por exemplo. O resultado é uma série de crescimento com resolução de calendário anual (Stoke; Smilley, 1968).

A datação cruzada envolve diversos passos, como a correspondência dos padrões de largura dos anéis entre amostras da mesma árvore e entre árvores diferentes, a análise da sincronia entre essas amostras, e a identificação de eventuais faltas de coincidência. Também é essencial reconhecer onde os anéis podem estar ausentes, falsos ou incorretamente observados, o que exige uma inspeção cuidadosa da estrutura do anel. O objetivo final é estabelecer uma cronologia precisa e confiável (Fritts, 1976).

As árvores podem alcançar idades bem avançadas, desta forma, junto de conceitos de dendrocronologia, é possível compreender que os troncos desses vegetais arbóreos constituem documentos de grande valor histórico regional (Burger & Richter, 1991). Muitas espécies europeias têm idades que variam de 200 até 700 anos, algumas chegam a 1200 anos ou até 2000 anos (Vetter & Botosso, 1993). Alguns indivíduos, de determinadas espécies florestais, podem alcançar 2000 anos como as sequóias americanas (*Sequoia sempervirens*) ou 3000 anos como a sequóia-gigante (*Sequoiadendron giganteum*). Um exemplar de pinus (*Pinus aristata*), na Califórnia (Estados Unidos), tem idade estimada entre 4200 - 4600 anos (Currey, 1965), sendo considerado o ser vivo mais velho da Terra.

Além de trazer referências valiosas sobre a vida do vegetal, a aplicação das informações contidas nos anéis de crescimento tem sido de grande relevância na análise da ocorrência de fenômenos ecológicos e ambientais. Os anéis de crescimento permitem a identificação e reconstrução das condições climáticas do passado, assim como das alterações ambientais naturais, da dinâmica das populações florestais e dos recursos hídricos e dos processos geomorfológicos (Botosso, 2002).

Também, possibilitam avaliar o efeito dos ventos, a ocorrência de ataque de insetos e microrganismos, os processos tectônicos, as atividades vulcânicas, os incêndios, as operações silviculturais, a presença de metais pesados no ambiente e de ações antropogênicas (Fritts, 1976; Eckstein & Krause, 1989; Vetter & Botosso, 1989; Jacoby & D'Arrigo, 1990; Worbes & Junk, 1989; Villalba et al., 1992; Schweingruber, 1993; Buckley et al., 1995; Gourelay, 1995; Worbes, 1995; D'Arrigo & Villalba, 2000; Villalba, 2000; Kitzberger, 2000).

Em um anel distinguem-se normalmente duas partes: i) lenho inicial ou primaveril e ii) lenho tardio ou outonal (Figura 1) (autor, ano – revisão bibliográfica usar uma imagem de publicação).



Figura 1. Imagem (A) representa uma amostra com limites de anéis de crescimento bem definidos, em amarelo é representado o lenho inicial e em vermelho o lenho tardio. Na imagem (B) representa anéis parciais (indicação em cinza) e anéis interanuais (indicado em preto) (Imagem do autor).

O lenho inicial corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, normalmente a primavera, quando as plantas despertam do período de dormência e reassumem suas atividades fisiológicas com todo o vigor. Com a aproximação do fim do período vegetativo, normalmente o outono, as células diminuem paulatinamente a sua atividade fisiológica. Em consequência, suas paredes celulares tornam-se gradualmente mais espessas e suas cavidades menores. Isso dá ao lenho tardio uma tonalidade mais escura que permite distingui-lo do inicial ou primaveril. É essa alternância de cores que evidencia os anéis de crescimento de muitas espécies, em especial das Gimnospermas, vulgarmente conhecidas como coníferas (Fritts, 1976).

A característica clássica do anel de crescimento é a largura (distância em largura do início do anel primaveril até o final do anel outonal), desta forma essa metodologia apresenta-se como disciplina científica eficaz para entender a resposta das plantas ao clima, uma vez que possibilita a compreensão sobre o comportamento dos indivíduos em cenários climáticos passados (Fritts, 1976; Cook, 1985; Scheingruber 1988; Speer 2010;). Por meio desta escala interanual, pesquisas com espécies arbóreas tropicais na Mata Atlântica vem investigando fortemente a relação entre crescimento e precipitação ou temperatura (Dünisch, 2005; Brandes et al., 2011; Brienens, 2016; Venegas-González et al., 2016; Fontana et al., 2018).

Além das características próprias de cada espécie, é fácil compreender que árvores de regiões onde as estações do ano são bem definidas apresentam anéis de crescimento nítidos. Ao contrário, as que crescem em locais de condições climáticas mais uniformes – como na maior parte do Brasil – têm normalmente anéis de crescimento indistintos ou pouco evidentes. Em muitas árvores tropicais e subtropicais, os anéis correspondem aos períodos de chuva e de seca, inundações, queda das folhas ou simplesmente dormência, podendo ocorrer dois ou mais ciclos em um ano. Os anéis de crescimento não são, portanto, necessariamente anuais. Também, é comum encontrar-se anéis de crescimento descontínuos, que não formam um círculo completo em torno da medula. Há, ainda, os chamados falsos anéis de crescimento que ocorrem quando se forma mais de um anel por período vegetativo (Botosso, 2002).

Ainda assim alguns autores afirmam que uma espécie pode responder de formas diferentes às condições climáticas e de habitat em que está crescendo, por esse motivo, o entendimento da dinâmica de crescimento de espécies arbóreas em condições naturais é importante para seu uso sustentável e ampliar os conhecimentos das dinâmicas de populações (Oliveira, 2007; Mattos, 2011).

A quantificação da idade por meio da contagem dos anéis anuais de crescimento é realizada mediante a identificação e reconhecimento anatômicos dessas estruturas. Este método baseia-se na análise meticulosa da morfologia dos anéis, exigindo uma abordagem precisa e especializada para atribuir a idade cronológica correspondente a cada anel. Tal procedimento constitui uma prática estabelecida em estudos dendrocronológicos e outras disciplinas relacionadas, contribuindo significativamente para a compreensão temporal e a datação de eventos em contextos biológicos e ambientais (Vetter & Botosso, 1989; Worbes, 1989; Détienne, 1989; 1995; Mattos, 1999; Botosso, 2000; Tomazello Filho et al., 2000; Ferreira, 2002; Dünisch, 2002).

Conforme Roig (2000) ressalta, a abordagem dendrocronológica, que envolve a contagem de anéis de crescimento, é reconhecida como a metodologia mais precisa para a determinação da idade de árvores. Contudo, em regiões tropicais, diversas espécies apresentam limitações ao exibir anéis de crescimento de forma evidente, ou existe uma lacuna substancial no entendimento da periodicidade com que esses anéis são formados. Diante dessa complexidade, é prudente sugerir que os métodos convencionais de datação dendrocronológica busquem complementaridade em outras

abordagens, visando obter informações mais precisas sobre a periodicidade de formação da madeira e, conseqüentemente, a idade alcançada pelas árvores tropicais. Essa estratégia torna-se imperativa para aprimorar a confiabilidade e abrangência das análises temporais em ecossistemas caracterizados pela diversidade e peculiaridades climáticas das regiões tropicais.

Ainda que a visibilidade dos anéis de crescimento possa ser influenciada por diversos fatores ambientais, como a idade da árvore, a competição por recursos e as condições do sítio, as características diagnósticas desses anéis tendem a ser consistentes dentro de uma determinada espécie (Schweingruber, 2007). Portanto, é de suma importância compreender os mecanismos subjacentes a essas diferenciações a fim de realizar uma delimitação precisa de cada anel e sua subsequente datação. Esse conhecimento contribui significativamente para a precisão e confiabilidade das análises dendrocronológicas, fornecendo uma base sólida para estudos temporais em ecossistemas florestais e ampliando nossa compreensão sobre os padrões de crescimento e resposta das árvores às condições ambientais.

Em gimnospermas, a definição dos anéis de crescimento é estabelecida com base em variações observadas no lúmen e no espessamento das paredes dos traqueídeos. Por outro lado, em angiospermas dicotiledôneas, devido à maior complexidade da estrutura da madeira, os anéis de crescimento podem ser identificados por meio de diversas características distintas. Essas incluem diferenças no lúmen e no espessamento das fibras, similarmente às gimnospermas, além de variações no diâmetro e na disposição dos vasos, ou mesmo pela presença de parênquima axial marginal. É relevante destacar que essas características, dentre outras, podem ocorrer de forma concomitante (Oliveira, 2007). Essa diversidade morfológica na definição dos anéis de crescimento em angiospermas dicotiledôneas ressalta a necessidade de uma análise detalhada e integrada para uma interpretação precisa e abrangente dos padrões de crescimento dessas plantas.

Para além das metodologias tradicionais de contagem e mensuração dos anéis de crescimento, observa-se um avanço significativo nas técnicas, sendo uma delas a capacidade de medir as mudanças anuais na densidade da madeira de coníferas tanto na densitometria de raios-X (Briffa, 2000), quanto na intensidade do azul (Wilson et al., 2014). Mesmo assim, as características distintivas do lenho inicial e tardio emergem como variáveis suplementares valiosas (Schweingruber e Briffa, 1996). Nesse contexto, é possível explorar a variação da densidade da madeira tanto entre

quanto dentro dos anéis de crescimento individuais ao longo do ciclo de vida da árvore, empregando duas metodologias principais: (i) a obtenção de uma secção transversal de um tronco (método destrutivo), demandando o corte da árvore para a obtenção de um disco transversal de madeira, ou (ii) a coleta de pequenas amostras de árvores vivas mediante a inserção de uma sonda na planta (método não-destrutivo). O último método possibilita a extração de pequenas amostras de madeira sob a forma de baguetas, onde os limites dos anéis de crescimento podem ser visualizados. Esta abordagem não-destrutiva representa um avanço significativo, permitindo uma análise detalhada da estrutura da madeira sem comprometer a integridade da árvore em estudo (Schweingruber e Briffa, 1996).

Para a realização das análises, são empregadas técnicas avançadas de densitometria de raios-X, as quais envolvem a interpretação de filmes radiográficos por meio de um microdensitômetro óptico, análises de imagens ou a medição da variação da densidade por meio de raios Gama (Polge, 1963; Ferraz, 1976; Worbes, 1995; Vetter, 2000; Tomazello Filho et al., 2000). Essas metodologias proporcionam uma análise detalhada e precisa da estrutura da madeira, contribuindo para o avanço do conhecimento dendrocronológico e a compreensão dos processos de crescimento das árvores.

Vários estudos realizados nas últimas décadas, analisando os anéis de árvores, evidenciaram de maneira inequívoca que as cronologias de densidade máxima do lenho tardio (MXD), desenvolvidas a partir de árvores coníferas em ambientes de alta altitude/latitude, apresentam uma clara correlação com as temperaturas de verão, superior àquela observada nas cronologias de largura de anel (RW) (Büntgen et al., 2006; Esper et al., 2010, 2012; Grudd, 2008; Hughes et al., 1984; Luckman e Wilson, 2005; Schweingruber e Briffa, 1996; Luckman e Wilson, 2003). Estudos mais recentes, utilizando conjuntos de dados atualizados e métodos alternativos para redução de tendências, corroboraram a assertiva de que o MXD parece apresentar uma boa correspondência com as temperaturas de verão (Esper et al., 2010; Wilson et al., 2007a). Entretanto, é imperativo ressaltar que tais observações demandam validação em diferentes locais e contextos, a fim de consolidar a robustez e a generalização dessas relações em estudos dendrocronológicos. A densidade máxima da madeira (MXD), portanto, configura-se como um indicador reconhecido, cuja utilização em análises dendrocronológicas promove avanços substanciais na compreensão das

respostas das árvores às variações climáticas sazonais (Briffa, 2000; Esper et al., 2014).

A densidade máxima da madeira (MXD) é amplamente reconhecida como uma das representações mais robustas e sólidas dos anéis de árvores em relação à temperatura do verão em ambientes de latitudes elevadas e altitudes elevadas. Este indicador é extensivamente empregado em estudos de anéis de árvores em escalas local (Sander et al., 1995; Büntgen et al., 2006; Gunnarson et al., 2011), regional (Barber et al., 2004; Wiles et al., 2014; Esper et al., 2014) e hemisférica (Briffa, 2000; Breitenmoser et al., 2012). Além disso, tem sido utilizado em diversas reconstruções da variabilidade climática milenar (Luckman e Wilson, 2005; Büntgen et al., 2006; Esper et al., 2012; Melvin et al., 2013; Zhang et al., 2015).

A sua aplicação em estudos dendrocronológicos proporciona uma base sólida para a compreensão das respostas das árvores às condições climáticas sazonais, permitindo investigações detalhadas em diferentes escalas geográficas e temporais. A reconhecida robustez do MXD fortalece sua utilidade como uma ferramenta essencial em pesquisas relacionadas à variabilidade climática e estudos paleoclimáticos, contribuindo significativamente para o entendimento das dinâmicas climáticas ao longo dos séculos (Briffa, 2000; Esper et al., 2014).

No entanto, o contínuo avanço na tecnologia de análise e processamento de imagem digital tem proporcionado uma oportunidade para a consolidação do *Blue Intensity* (BI) como um complemento ao MXD, apresentando vantagens significativas em termos de facilidade e custo para obtenção de proxies climáticos (Sheppard et al., 1996; McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014, 2015).

Essa abordagem inovadora tem despertado interesse crescente na comunidade científica devido à sua eficiência e praticidade na obtenção de dados climáticos a partir da análise de imagens digitais de seções transversais de anéis de árvores. O potencial do BI como uma ferramenta viável para estudos dendrocronológicos e reconstruções climáticas tem sido amplamente reconhecido, representando uma alternativa promissora ao MXD em termos de acessibilidade e simplicidade de aplicação (McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014).

A proposta central do *Blue Intensity* (BI) consiste em mensurar a intensidade do canal azul de luz refletida na superfície da madeira. O valor de BI é influenciado pelas propriedades ópticas da madeira, as quais, de acordo com McCarroll et al.

(2002) e Campbell et al. (2007), encontram-se correlacionadas com o teor de lignina presente nas paredes celulares da madeira tardia. Diversos estudos experimentais têm corroborado uma relação altamente significativa entre o BI e a densidade máxima da madeira (MXD). Assim, a Intensidade Azul tem sido considerada, desde os estágios iniciais, como um "substituto" viável para a densitometria de raios-X (McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Rydval et al., 2014; Björklund et al., 2014; Björklund et al., 2015).

A luz azul, medida a partir do espectro RGB em imagens digitais de superfícies de madeira devidamente preparadas por meio de software de análise de imagem digital, consolidou-se como uma metodologia padrão, adotada por diversos pesquisadores. Essa abordagem simplificada e custo-eficaz tem se mostrado promissora, oferecendo uma alternativa acessível e eficiente para a obtenção de informações climáticas a partir de análises dendrocronológicas baseadas em imagens (McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014).

O método Blue Intensity (BI) tem sido empregado para extrair sinais climáticos de anéis de árvores, possibilitando a construção de reconstruções de temperatura ao longo de vários séculos (McCarroll et al., 2013; Wilson et al., 2014; Björklund et al., 2015). A aplicabilidade desse proxy tem sido continuamente refinada ao longo do tempo. Inicialmente, a utilização da luz refletida - daí o termo Blue Reflectance em publicações anteriores, como exemplificado por McCarroll et al. (2002) - foi substituída pela intensidade de luz absorvida, visando facilitar a comparação com a densidade máxima da madeira (MXD) (Rydval et al., 2014).

Além disso, a introdução do conceito de delta BI, que se refere à diferença entre a intensidade do azul no lenho inicial e no lenho tardio, agora simplifica a análise de amostras de madeira histórica e morta (Björklund et al., 2014, 2015; Wilson et al., 2017). Diferentes técnicas de preparação da madeira e aquisição de imagens também foram exploradas para aprimorar a robustez do método (Rydval et al., 2014; Österreicher et al., 2015).

Atualmente, softwares são empregados para gerar medições de MXD (Dendro2003) e BI (CooRecorder), sendo essas medidas amplamente consideradas na dendroclimatologia e dendroecologia. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de cronologias robustas e, conseqüentemente, para a reconstrução de sinais climáticos e ambientais em diversas escalas espaço-temporais.

Diversos estudos têm sido conduzidos em árvores das regiões temperadas e, mais recentemente, nos trópicos e subtropicais (Kitzberger et al., 2000; Tomazello et al., 2000; Schöngart et al., 2017). Por muito tempo, houve um consenso entre os pesquisadores de que apenas as espécies de árvores de folhas caducas em climas temperados formavam anéis de crescimento anuais. Acreditava-se que as árvores nas regiões tropicais e subtropicais não apresentavam sazonalidade na atividade cambial devido às condições climáticas consideradas praticamente constantes ao longo do ano. Assim, não se esperava a formação de anéis de crescimento anuais nessas regiões (Tomazello Filho et al., 2000).

Entretanto, diversos estudos de pesquisa têm evidenciado a presença de anéis de crescimento anuais em espécies de árvores tropicais e subtropicais. Estes anéis são resultado de um ritmo de crescimento intermitente das árvores (Détienne, 1989, 1995; Worbes, 1989, 1995; Worbes & Junk, 1989; Vetter & Botosso, 1988, 1989a; Botosso & Vetter, 1991; Luchi, 1998; Mattos, 1999; Mattos et al., 1999; Botosso et al., 2000; Botosso & Tomazello Filho, 2001; Tomazello Filho et al., 2000; Ferreira, 2002; Dünisch, 2002). Essas descobertas desafiam concepções anteriores e enfatizam a importância de uma abordagem cuidadosa e abrangente na análise dos padrões de crescimento das árvores em diferentes ambientes climáticos.

A análise de séries temporais de anéis de crescimento de plantas, conhecida como dendrocronologia, e sua relação com condições ambientais, denominada dendroecologia, têm sido amplamente empregadas em estudos de ecologia, dinâmica de populações e reconstruções ambientais diversas (Schweingruber, 1996). Avanços no conhecimento da ecologia de *Araucaria angustifolia* e das formações vegetais onde estas ocorrem podem ser obtidos por meio de estudos dendroecológicos, em linha com pesquisas realizadas em outras espécies da família Araucariaceae (Burns, 1993).

A *A. angustifolia* apresenta camadas de crescimento notadas macroscopicamente, as quais, segundo Oliveira et al. (2009), são formadas entre a primavera e o outono devido a variações no comprimento do dia e da temperatura. Esses fatores são considerados os principais influenciadores na atividade cambial sazonal da araucária nas áreas estudadas pelos autores no Rio Grande do Sul. Lisi et al. (2001) encontraram uma forte associação entre variações temporais de $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico e de ^{14}C nos anéis de dois indivíduos de *A. angustifolia*. Considerando que a fixação de ^{14}C pelas plantas é proporcional às concentrações de $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico, esses resultados indicam que os anéis em *A. angustifolia* são formados

anualmente e fortemente influenciados por fatores climáticos, corroborando com pesquisas realizadas em outras regiões (Oliveira et al., 2009a, 2009b; Zanon, 2010; Cattaneo et al., 2013).

Em *A. angustifolia*, os anéis de crescimento são demarcados por uma fina camada de lenho tardio, caracterizado por traqueídes radialmente achatadas e paredes celulares espessas (Roig, 2000). O considerável potencial de uso da madeira, aliado à relevância alimentícia proporcionada por suas sementes, destaca a importância de informações sobre a ecologia e o crescimento dessa espécie. Tais dados são fundamentais para embasar práticas de reflorestamento, manejo sustentável, recomposição florestal e conservação dos remanescentes florestais.

Dessa forma, a investigação das camadas de crescimento do lenho emerge como uma alternativa crucial para a obtenção de informações precisas sobre o desenvolvimento histórico das árvores, constituindo-se em dados essenciais para compreender a evolução da espécie ao longo do tempo.

No contexto da dendrocronologia de *A. angustifolia*, destacam-se estudos como os realizados por Wehr e Tomazello-Filho (2000), que efetuaram a caracterização das camadas de crescimento por meio da microdensitometria de raios-X. Oliveira et al. (2009) contribuíram avaliando o tempo de formação das camadas de crescimento por meio de evidências anatômicas e dendrocronológicas, investigando também as relações entre as variações ambientais regionais e a formação intra-anual da madeira em diferentes localidades. Zanon & Finger (2010) analisaram a influência dos fatores meteorológicos no crescimento da espécie em uma floresta plantada em São Francisco de Paula, no Rio Grande do Sul. Adenesky-Filho (2014) abordou a dendroecologia de *A. angustifolia* na bacia do rio Tibagi, no Paraná, além de realizar uma comparação do incremento diametral da espécie em áreas de encosta e planície. Esses estudos contribuem significativamente para o entendimento da dinâmica de crescimento e ecologia da *A. angustifolia*, fornecendo subsídios valiosos para práticas de manejo e conservação.

No presente estudo, investigamos o impacto das variações climáticas interanuais no crescimento e na densidade dos anéis de crescimento da *A. angustifolia*, utilizando uma cronologia de largura de anel (RW) e de intensidade do azul (BI). Amostras para análise foram coletadas na cidade de Caxias do Sul. O objetivo geral deste trabalho é explorar o uso de cronologias na identificação de sinais climáticos presentes nos anéis de crescimento dessa espécie.

De forma mais específica, delineamos os seguintes objetivos:

a) Desenvolver uma cronologia de largura de anéis de crescimento, buscando compreender os padrões de crescimento e as respostas climáticas associadas. Essa abordagem visa estabelecer relações entre as características dos anéis e as condições climáticas ao longo do tempo.

b) Analisar como as variações climáticas interanuais impactam a densidade dos anéis de crescimento, utilizando uma cronologia de intensidade do azul como ferramenta analítica. Esta análise proporcionará insights significativos sobre como a *Araucaria angustifolia* responde às flutuações climáticas ao longo do tempo.

Esses objetivos específicos são fundamentais para uma compreensão mais aprofundada das relações entre o crescimento das árvores, a densidade dos anéis de crescimento e as condições climáticas, contribuindo assim para o avanço do conhecimento dendrocronológico e da ecologia da *Araucaria angustifolia*.

2.1 REFERÊNCIAS

- ADENESKY FILHO, Eduardo. Florística, fitossociologia e dendroecologia em encosta e planície do médio rio Tibagi, Telêmaco Borba, Paraná, Brasil. 2014.
- BARBER, Valerie A. et al. Reconstruction of summer temperatures in interior Alaska from tree-ring proxies: evidence for changing synoptic climate regimes. **Climatic Change**, v. 63, p. 91-120, 2004.
- BJÖRKLUND, J. A. et al. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. **Climate of the Past**, v. 10, n. 2, p. 877-885, 2014.
- BJÖRKLUND, Jesper et al. Using adjusted blue intensity data to attain high-quality summer temperature information: a case study from Central Scandinavia. **The Holocene**, v. 25, n. 3, p. 547-556, 2015.
- BOTOSSO, P. Periodicidade do crescimento e aspectos de formação da madeira de algumas espécies arbóreas ocorrendo em áreas de matas mesófilas semidecíduas da região sudeste do Estado de São Paulo: dendrocronologia e dendroecologia. **Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Florestais**, p. 85, 2000.
- BOTOSSO, Paulo Cesar; DE MATTOS, Patrícia Póvoa. Conhecer a idade das árvores: importância e aplicação. **Embrapa Florestas. Documentos**, v. 75, 2002.
- BOTOSSO, P. C.; VETTER, Roland Ernst. Alguns Aspectos Sobre A Periodicidade e Taxa de Crescimento Em 8 Espécies Arbóreas de Floresta de Terra Firme (Amazonia). **Volume 3, Número 2, Pags. 163-180**, 1991.
- BRANDES, Arno Fritz Neves; LISI, Claudio Sergio; BARROS, Cláudia Franca. Dendrochronology of lianas of the Leguminosae family from the Atlantic Forest, Brazil. **Trees**, v. 25, p. 133-144, 2011.
- BRIENEN, Roel JW; SCHÖNGART, Jochen; ZUIDEMA, Pieter A. Tree rings in the tropics: insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. **Tropical tree physiology: Adaptations and responses in a changing environment**, p. 439-461, 2016.
- BUCKLEY, Brendan M. et al. Dendrochronological investigations in Thailand. **Iawa Journal**, v. 16, n. 4, p. 393-409, 1995.
- BÜNTGEN, Ulf et al. Summer temperature variations in the European Alps, AD 755–2004. **Journal of Climate**, v. 19, n. 21, p. 5606-5623, 2006.

- BURGER, L. M.; RLCHTER, H. G. Anatomía da madeira Sao Paulo: nobel, 154p. 1991.
- BURNS, Bruce R. Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana*-*Nothofagus antarctica* forest in the southern Andes. **Journal of biogeography**, p. 669-685, 1993.
- CAMPBELL, Rochelle et al. Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: developing a new palaeoclimate proxy. **The Holocene**, v. 17, n. 6, p. 821-828, 2007.
- CATTANEO, Nicolás et al. Sex-related, growth–climate association of *Araucaria angustifolia* in the neotropical ombrophilous woodlands of Argentina. **Dendrochronologia**, v. 31, n. 3, p. 147-152, 2013.
- COOK. A time-series analysis approach to tree ring standardization. **Ph. D. dissertation, University of Arizona**, 1985.
- CURREY, Donald R. An ancient bristlecone pine stand in eastern Nevada. **Ecology**, v. 46, n. 4, p. 564-566, 1965.
- D'ARRIGO, R. D.; VILLALBA, R. Review of dendroclimatic research at high latitudes in South America: indicators of atmosphere-ocean climate variability. **Dendrochronology in Latin America EDIUNC, Mendoza**, p. 271-282, 2000.
- DÉTIENNE, Pierre. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. **IAWA Journal**, v. 10, n. 2, p. 123-132, 1989.
- DÉTIENNE, Pierre. Nature et périodicité des cernes dans quelques bois guyanais. **BOIS & FORETS DES TROPIQUES**, v. 243, p. 65-75, 1995.
- DÜNISCH, O. Influence of the El-Niño southern oscillation on cambial growth of *Cedrela fissilis* Vell. in tropical and subtropical Brazil. 2005.
- COOK, E. R., & KAIRIUKSTIS, L. A. (Eds.). (2013). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science & Business Media.
- DÜNISCH, Oliver; BAUCH, Josef; GASPAROTTO, Luadir. Formation of increment zones and intraannual growth dynamics in the xylem of *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, and *Cedrela odorata* (Meliaceae). **Iawa Journal**, v. 23, n. 2, p. 101-119, 2002.
- SPEER, James H. **Fundamentals of tree-ring research**. University of Arizona Press, 2010.
- ECKSTEIN, D.; KRAUSE, Cornelia; BAUCH, J. Dendroecological Investigation of Spruce Trees (*Picea abies* (L.) Karst.) of Different Damage and Canopy Classes. 1989.

- ESPER, Jan et al. Trends and uncertainties in Siberian indicators of 20th century warming. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 386-398, 2010.
- ESPER, Jan et al. Orbital forcing of tree-ring data. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 12, p. 862-866, 2012.
- FERRAZ, Epaminondas Sansigolo de Barros; AGUIAR, O. Gamma-ray attenuation technique for determining density and water content of wood samples. **IPEF**, v. 30, p. 9-12, 1985.
- FERREIRA, Ligia et al. Periodicidade do crescimento e formação da madeira de algumas espécies arbóreas de Florestas Estacionais Semidecíduas da região sudeste do Estado de São Paulo. **Piracicaba: Universidade de São Paulo**, 2002.
- FO, Mario Tomazello; BOTOSSO, Paulo C.; LISI, Claudio S. Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. In: **Dendrocronología en América latina**. Ediunc, 2000. p. 381-431.
- FONTANA, Cláudia et al. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 13, n. 4, p. 321-333, 2018.
- FRITTS, H. C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London.
- GOURLAY, Ian D. Growth ring characteristics of some African Acacia species. **Journal of tropical ecology**, v. 11, n. 1, p. 121-140, 1995.
- GUNNARSON, Björn E.; LINDERHOLM, Hans W.; MOBERG, Anders. Improving a tree-ring reconstruction from west-central Scandinavia: 900 years of warm-season temperatures. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 97-108, 2011.
- HUGHES, M. K. et al. July–August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data. **Nature**, v. 308, n. 5957, p. 341-344, 1984.
- JACOBY, GC, Jr; D'ARRIGO, R. D. Teak (*Tectona grandis* LF), a tropical species of large-scale dendroclimatic potential. 1990.
- KITZBERGER, Thomas; STEINAKER, Diego F.; VEBLEN, Thomas T. Effects of climatic variability on facilitation of tree establishment in northern Patagonia. **Ecology**, v. 81, n. 7, p. 1914-1924, 2000.
- LISI, CLAUDIO S. et al. 14C bomb effect in tree rings of tropical and subtropical species of Brazil. **Tree-ring research**, v. 57, n. 2, p. 191-6, 2001.
- LUCHI, Agnes Elisete; ANGYALOSSY, Veronica. Periodicidade de crescimento em *Hymenaea courbaril* L. e anatomia ecológica do lenho de espécies de mata ciliar. 1998.

MATTOS, PP de; SEITZ, R. A.; MUNIZ, GIB de. Identification of annual growth rings based on periodical shoot growth. 1999.

DE MATTOS, Patricia Povia et al. A dendrocronologia e o manejo florestal sustentável em florestas tropicais. **Embrapa Florestas. Documentos, 218**;(Embrapa Pantanal. **Documentos**, v. 112, 2011.

MCCARROLL, Danny et al. A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe. **The Holocene**, v. 23, n. 4, p. 471-484, 2013.

MCCARROLL, D. et al. Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings. **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 34, n. 4, p. 450-453, 2002.

MELVIN, Thomas M.; GRUDD, Håkan; BRIFFA, Keith R. Potential bias in 'updating' tree-ring chronologies using regional curve standardisation: Re-processing 1500 years of Torneträsk density and ring-width data. **The Holocene**, v. 23, n. 3, p. 364-373, 2013.

OLIVEIRA, Juliano Morales; ROIG, Fidel Alejandro; PILLAR, Valerio Depatta. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. **Austral Ecology**, v. 35, n. 2, p. 134-147, 2010.

OLIVEIRA, Juliano Morales et al. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. **Trees**, v. 23, p. 107-115, 2009.

OLIVEIRA, Juliano Morales de. Anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: bases de dendroecologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil. 2007.

ÖSTERREICHER, A. et al. Exploring blue intensity-comparison of blue intensity and MXD data from Alpine spruce trees. **TRACE–Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**, v. 13, p. 56-61, 2015.

POLGE, Hubert. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois: l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. **Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Forestières**, v. 20, n. 4, p. 533-581, 1963.

ROIG, F. A. Dendrocronología en los bosques del Neotrópico: revisión y prospección futura. **Dendrocronología en América latina**, v. 307, p. 355, 2000.

RYDVAL, Miloš et al. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland. **Dendrochronologia**, v. 32, n. 3, p. 191-204, 2014.

SANDER, C. et al. The growth of spruce (*Picea abies* (L) Karst) in the Krkonoše-(Giant) Mountains as indicated by ring width and wood density. In: **Annales des Sciences forestières**. EDP Sciences, 1995. p. 401-410.

SCIPIONI, Marcelo Callegari et al. Effects of cold conditions on the growth rates of a subtropical conifer. **Dendrochronologia**, v. 68, p. 125858, 2021.

MARIAUX, Alain. FH Schweingruber 1988. Tree rings-basics and applications of dendrochronology. Kluwer Academic Publishers. ISBN 90277244 58. 276 pages. Price:£ 84.00. **Journal of Tropical Ecology**, v. 5, n. 3, p. 352-352, 1989.

SCHÖNGART, Jochen et al. Dendroecological studies in the neotropics: history, status and future challenges. **Dendroecology: tree-ring analyses applied to ecological studies**, p. 35-73, 2017.

SCHWEINGRUBER, Fritz Hans; LA NEIGE ET LE PAYSAGE (BIRMENSDORF) INSTITUT FÉDÉRAL DE RECHERCHES SUR LA FORÊT. **Tree rings and environment dendroecology**. Bern: Haupt, 1996.

SCHWEINGRUBER, F. H. Trees and wood in dendrochronology, Springer series in Wood Science. 1993.

SCHWEINGRUBER, Fritz Hans. **Wood structure and environment**. Springer Science & Business Media, 2007.

SHEPPARD, Paul R.; GRAUMLICH, Lisa J.; CONKEY, Laura E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. **The Holocene**, v. 6, n. 1, p. 62-68, 1996.

SPEER, James H. **Fundamentals of tree-ring research**. University of Arizona Press, 2010.

STOKES, Marvin A. **An introduction to tree-ring dating**. University of Arizona Press, 1996.

VENEGAS-GONZÁLEZ, Alejandro et al. Sensitivity of tree ring growth to local and large-scale climate variability in a region of Southeastern Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 123, p. 233-245, 2016.

VETTER, Roland Ernst. Growth periodicity and age of Amazonian tree species. Methods for their determination. **Dendrocronologia en America Latina**, pgs. 135-155, 2000.

VETTER, Roland E.; BOTOSSO, Paulo C. Remarks on age and growth rate determination of Amazonian trees. **Iawa Journal**, v. 10, n. 2, p. 133-145, 1989.

- VETTER, Roland Ernst; BOTOSSO, P. C. A idade de árvores da Amazônia. Bases Científicas Para Estratégias De Preservação E Desenvolvimento Da Amazonia. Volume 2, pgs. 405-417, 1993.
- VILLALBA, R. Métodos en dendrogeomorfología y su potencial uso en América del sur. **Roig, FA (comp.), Dendrogeomorfología en América Latina: Mendoza, Argentina, EDIUVIC**, p. 103-134, 2000.
- VILLALBA, R.; HOLMES, R. L.; BONINSEGNA, Jose A. Spatial patterns of climate and tree growth variations in subtropical northwestern Argentina. **Journal of Biogeography**, p. 631-649, 1992.
- WILES, Gregory C. et al. Surface air temperature variability reconstructed with tree rings for the Gulf of Alaska over the past 1200 years. **The Holocene**, v. 24, n. 2, p. 198-208, 2014.
- WILSON, Rob et al. A matter of divergence: tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D17, 2007.
- WILSON, Rob et al. Blue Intensity for dendroclimatology: The BC blues: A case study from British Columbia, Canada. **The Holocene**, v. 24, n. 11, p. 1428-1438, 2014.
- WORBES, Martin. How to measure growth dynamics in tropical trees a review. **IAWA journal**, v. 16, n. 4, p. 337-351, 1995.
- WORBES, Martin; JUNK, Wolfgang J. Dating tropical trees by means of $\delta^{14}\text{C}$ from bomb tests. **Ecology**, v. 70, n. 2, p. 503-507, 1989.
- ZANON, Magda Lea Bolzan; FINGER, César Augusto Guimarães. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 3, p. 467-476, 2010.
- ZHANG, P. et al. 1200 years of warm-season temperature variability in central Fennoscandia inferred from tree-ring density. **Climate of the Past Discussions**, v. 11, n. 1, 2015.

3. ARTIGO: INTENSIDADE DO AZUL EM ANÉIS DE CRESCIMENTO DA CONÍFERA SUBTROPICAL *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

3.1 INTRODUÇÃO

Em coníferas de altas e médias latitudes do hemisfério Norte, onde os processos de divisão e diferenciação celular são fortemente limitados pela temperatura, séries de densidade máxima do lenho tardio (*MXD* - do inglês) apresentam correlações positivas elevadas com a temperatura do ar na estação de crescimento, com sinais usualmente mais fortes do que as tradicionais séries de largura de anéis (*RW* – do inglês), sendo um *proxy* de excelência para reconstruções climáticas de temperatura do verão em escala hemisférica (Briffa et al., 1988; Esper et al., 2018; Björklund et al., 2019). Nessas plantas, temperaturas elevadas estimulam o alongamento e o espessamento das paredes das células, resultando num aumento líquido do *MXD* (Björklund et al., 2017). Padrão contrário tem sido reportado em coníferas temperadas da Australásia, como em *Lagarostrobos franklinii* e *Athrotaxis cupressoides*, onde a *MXD* apresenta correlações negativas com a temperatura da estação de crescimento, sugerindo que temperaturas elevadas reduzem o espessamento das paredes celulares (Drew et al., 2013; O'Donnell et al., 2016). Apesar dos significativos avanços da dendrocronologia nos trópicos (Quesada-Román et al., 2022), estudos analisando densidade de anéis de árvores são raros nesses ecossistemas (Gonçalves et al., 2021).

A microdensitometria de raios-X, técnica usualmente empregada para desenvolver séries de densidade de anéis, requer equipamentos especializados, disponíveis em pouco mais de uma dezena de laboratórios em todo o mundo (Björklund et al., 2019; De Mil et al., 2024), restringindo a ampliação da cobertura espacial de séries dendrocronológicas de densidade. Nesse sentido, métodos baseados em análises de imagem, especialmente no comprimento de onda do azul, têm se tornado uma alternativa simples e de baixo custo, capazes de revelar sinais dendroclimáticos afins aos de densidade do lenho (Sheppard et al., 1996; McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014, 2015). A reflectância da luz azul apresenta uma correlação inversa com a densidade do lenho (McCarroll et al., 2002), sendo atualmente entendida como uma representação das dimensões das paredes das células em relação aos vazios dos seus lúmens (Björklund et al., 2024).

Para facilitar a interpretação dos resultados e integração de dados oriundos de análises deste tipo, é conveniente considerar o inverso dos valores de reflectância do azul (Rydval et al., 2014), utilizando para tal o termo intensidade do azul (*BI* – do inglês), e demais padronizações propostas em Björklund et al. (2024).

Cronologias de *BI* vêm sendo amplamente desenvolvidas com coníferas da América do Norte e Eurásia, e consideradas um relevante *proxy* para reconstruções de temperatura do verão no hemisfério Norte (McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Rydval et al., 2014; Björklund et al., 2014; Björklund et al., 2015). No hemisfério Sul, as pesquisas de *BI* estão em estágio de prospecção de espécies, principalmente com coníferas de clima frio da Australásia (Brookhouse et al., 2016; Blake et al., 2020; Wilson et al., 2021). Para essas espécies, as cronologias de *BI* têm revelado sinais climáticos mais consistentes do que as cronologias de *RW* correspondentes, e relacionados com variações da temperatura do verão. Contudo, o sinal dessas correlações climáticas apresentou considerável variação entre espécies e parâmetros de *BI* avaliados, indicando que a influência da temperatura de verão sobre a densidade do lenho é dependente da espécie e do período da estação de crescimento (lenhos inicial ou tardio). Estudos pioneiros foram realizados explorando cronologias de *BI* na América do Sul (Mundo et al., 2024) e nos trópicos (Buckley et al., 2018).

O estudo com *Araucaria araucana* (Araucariaceae), espécie de clima temperado do sul da América do Sul, representa a primeira cronologia de *BI* neste continente (Mundo et al., 2024). Seus resultados mostraram que, enquanto nenhum sinal climático foi detectado na cronologia de *RW*, correlações positivas com a temperatura de primavera e verão, e correlações negativas ainda mais fortes com o índice de severidade de seca foram detectadas nas cronologias de *BI* de *A. araucana*. O estudo com *Fokienia hodginsii* (Cupressaceae), espécie do Sudeste Asiático, representa a primeira cronologia de *BI* nos trópicos (Buckley et al., 2018). Nessa espécie, sinais climáticos mais fortes foram evidenciados pela *BI* do que pela *RW*, especialmente na mínima *BI* medida no lenho inicial, exibindo correlações espacialmente amplas e robustas com variáveis hidroclimáticas. Além de revelar um interessante *proxy* climático para a região tropical estudada, os resultados de Buckley et al. (2018) instigam a prospecção de cronologias de *BI* noutras coníferas tropicais.

Araucaria angustifolia, a outra Araucariaceae da atual flora sul-americana, vem sendo explorada para desenvolver registros dendrocronológicos na zona subtropical úmida do continente (Seitz e

Kanninen, 1989; Roig, 2000; Fontana et al., 2018; Arenhardt et al., 2024). Essa espécie é o elemento dominante e característico das florestas mistas de coníferas e angiospermas no bioma Mata Atlântica, que cobriam extensivamente os planaltos e serras do SE da América do Sul (Klein, 1960; Hueck, 1972). Apesar de ameaçada de extinção, pela exploração madeireira, perda e fragmentação do hábitat (Thomas, 2013; Martinelli e Moraes, 2013), *A. angustifolia* é ainda frequente e abundante em florestas secundárias ao longo de sua área de distribuição, com indivíduos gigantes e longevos sendo eventualmente encontrados (Scipioni et al., 2019). Essa é a espécie mais empregada em pesquisas dendrocronológicas no bioma Mata Atlântica (Olmedo et al., 2024), sobretudo para investigar sinais climáticos a partir de cronologias de *RW* (Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Lorensi and Prestes, 2016; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Lorensi and Prestes, 2018; Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Scipioni et al., 2021; Arenhardt et al., 2024). Em conjunto, esses estudos reportam uma grande variabilidade nas respostas de crescimento às condições climáticas em *A. angustifolia*, possivelmente causada por uma multiplicidade de estímulos climáticos atuando em diferentes épocas do ano, gerando sinais de difícil detecção e complexa interpretação (Arenhardt et al., 2024).

Algumas pesquisas têm prospectado outras variáveis em séries de anéis de crescimento de *A. angustifolia*. Séries de densidade de anéis em *A. angustifolia* foram investigadas em árvores jovens de um plantio, para descrever a variabilidade da densidade e da largura de anéis entre diferentes classes de altura, contudo não foram exploradas para averiguar sinais de alta-frequência entre árvores ou com variáveis climáticas (Wehr e Tomazello-Filho, 2000). Séries quinquenais de isótopo de carbono ^{13}C revelaram maior eficiência intrínseca do uso da água em árvores florestais do que campestres, e um aumento consistente e similar em ambos os habitats desde os anos 1950, diretamente proporcional ao aumento de CO_2 atmosférico e a variações regionais da temperatura do ar (Silva et al., 2009). Séries de isótopos de oxigênio ^{18}O em escalas intra-anual e interanual em anéis de *A. angustifolia*, demonstraram um marcado padrão sazonal de diminuição dos valores isotópicos, bem como um sinal interanual relacionado ao volume de precipitação, com potencial de ser explorado como *proxy* climático (Liu et al., 2023).

Este estudo obtiva desenvolver a primeira cronologia de *BI* para *A. angustifolia*, a fim de investigar sinais climáticos desta variável em relação aos sinais usualmente investigados através da *RW*. Para tanto, serão testadas as seguintes hipóteses: (i)

variações interanuais nas condições climáticas induzem respostas morfofisiológicas comuns entre indivíduos de *A. angustifolia*, resultando em padrões sincrônicos entre árvores descritas por séries de *RW* e *BI*; (ii) os sinais climáticos são mais fortes e sazonalmente mais restritos em séries de *BI* do que em séries de *RW* de *A. angustifolia*, pois enquanto *RW* integra estímulos climáticos ao longo da estação de crescimento corrente e/ou anterior, *BI* resulta de estímulos ao final da estação de crescimento corrente.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização do sítio de estudo

O sítio de estudo é formado por manchas de florestas secundárias, distribuídas numa área de 25 ha, na área onde foi instalado o Loteamento Terra Nobre, na cidade de Caxias do Sul/RS (-29.195458°; -51.157612°). Sua altitude média é de 730 metros acima do nível do mar, tendo relevo suavemente ondulado e solo do tipo Nitossolo (EMBRAPA, 2006) (Figura 2). O clima da região é do tipo Cfa (clima subtropical úmido) (Alvares *et al.* 2014). A temperatura média é de 20,8 °C no mês mais quente (janeiro) e de 12,3 °C no mês mais frio (junho). A precipitação é abundante durante todos os meses do ano, com uma média anual de 1810 mm (Harris *et al.* 2014) (Figura 3).

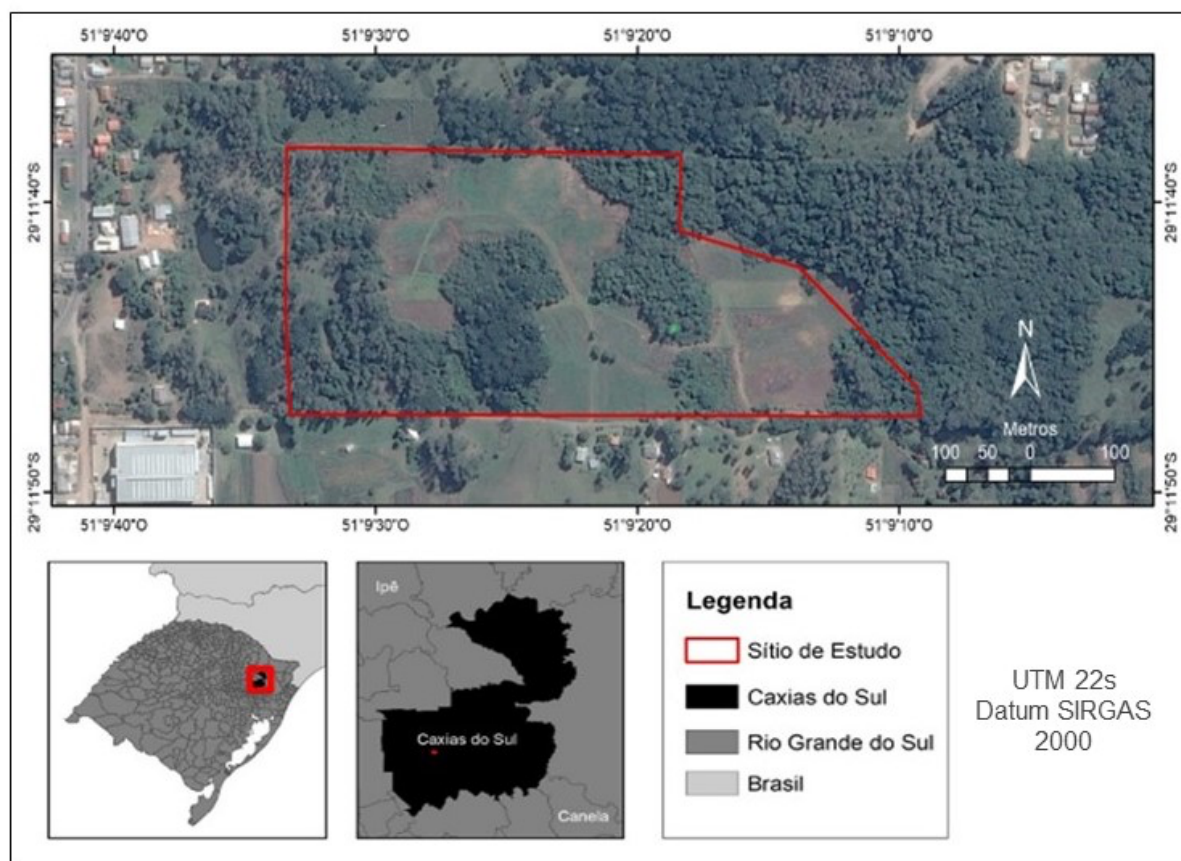


Figura 2. Localização e aspecto da paisagem do sítio de estudo, no Loteamento Terra Nobre, em Caxias do Sul/RS. A imagem de satélite, do ano de 2013, foi obtida na plataforma GoogleEarth (<https://earth.google.com/>).

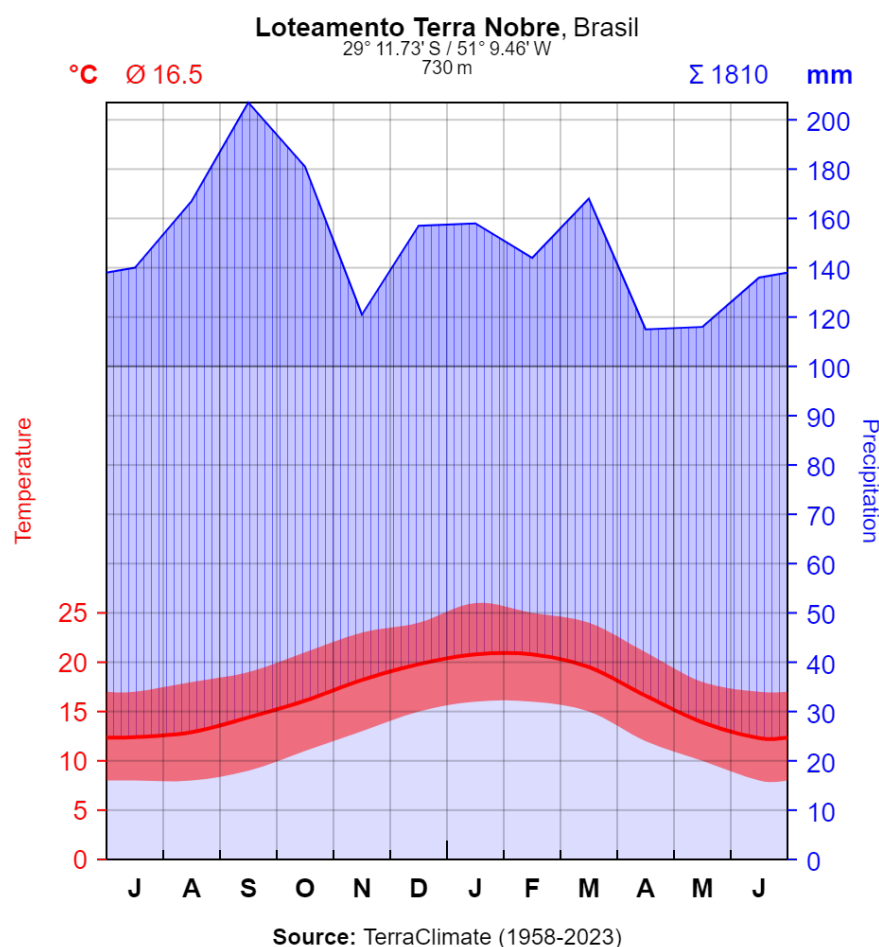


Figura 3. Diagrama climático, demonstrando a variação sazonal da temperatura e da precipitação para a região do sítio de estudo, Loteamento Terra Nobre (Caxias do Sul, Brasil) segundo estimativas da base de dados TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018), para o período de 1958 a 2023.

3.2.2 Obtenção e processamento das amostras

No verão de 2014 a vegetação do sítio de estudo foi suprimida para instalação do loteamento residencial. Nesta oportunidade, foram coletadas amostras de discos de 20 árvores de *Araucaria angustifolia*, tomadas com auxílio de motosserra a uma altura aproximada de 50 cm acima do solo. Após serem secas à temperatura ambiente, as superfícies dos discos foram polidas em lixadeira orbital, com uma série de lixas, do número 80 ao 2000. Ao final do polimento, era possível visualizar macroscopicamente os anéis de crescimento, e sob aumento, as estruturas anatômicas que delimitavam essas estruturas. Então, em cada disco foram marcados (com lápis 2B) de dois a quatro raios (medula-casca), para retirada de amostras

radiais, com 5 cm de espessura tangencial. Essas amostras foram imersas em Acetona (99%), por um período de 72 horas, para extração de resinas (Frith, 2009).

As amostras foram digitalizadas em imagens TIFF de 1200 dpi de resolução, para posterior análise e mensuração das séries de anéis de crescimento. A digitalização foi realizada com um scanner EPSON Perfection V700 Photo. A fim de impedir a entrada de luz externa e a reflexão da luz do scanner, que poderiam interferir na mensuração da intensidade do azul das amostras, durante a digitalização o scanner foi coberto com uma caixa de papelão, internamente pintada com tinta preta fosca (Rydval et al., 2014).

3.3.3 Datação e mensuração das séries de anéis

Como a formação do anel em *Araucaria angustifolia* ocorre da primavera ao outono (Oliveira et al. 2009), segundo o critério de Schulman (1956) o anel mais externo correspondeu ao ano calendário de 2013, estando ainda incompleto na época da amostragem (verão de 2014). Desta forma, as séries foram analisadas do anel de 2012 (último anel completo formado) ao anel mais interno de cada amostra. As imagens obtidas foram analisadas no software CooRecorder versão 7.8.1 (Larsson, 2014), para mensuração das séries de largura de anéis de cada amostra. Uma vez medidas e datadas primariamente, as séries de largura de anéis de crescimento foram codatadas, com o auxílio dos softwares COFECHA (Holmes 1983; 1986) e CDendro versão 7.8.1 (Larsson, 2014). Séries médias de largura de anéis por árvore foram obtidas, integrando as séries codatadas de cada árvore.

Para as amostras codatadas pelas séries de largura de anéis, procedeu-se a mensuração das séries de máxima intensidade do azul do lenho tardio (*MXBI*), também no software CooRecorder versão 7.8.1 (Larsson, 2014). Previamente, examinamos a sensibilidade da correlação das séries de intensidade do azul aos parâmetros de mensuração do software, e por fim, realizamos a mensuração conforme as configurações descritas na Tabela 1 e ilustradas no Apêndice 1. Como a reflectância do azul apresenta uma correlação inversa com a densidade máxima da madeira, os valores das séries foram invertidos para resultar em séries de *BI* com associação positiva com a densidade do lenho (Rydval et al., 2014; Björklund et al., 2024).

Tabela 1. Parâmetros e configurações utilizadas no software CooRecorder (Larsson, 2014) para mensuração da máxima intensidade do azul do lenho tardio (*MXBI*), em árvores de *Araucaria angustifolia* do sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil.

Parâmetro	Valor
Largura da janela de medição (w)	240 pixels
Fator limitante de deslocamento da largura da janela (wLimFact)	8 pixels
Posicionamento da janela em relação a borda do lenho inicial (f)	4 pixels
Profundidade máxima da janela junto ao lenho tardio (d)	37 pixels
Porcentagem de intensidade do azul aplicada	15 %

3.2.4 Cronologias médias e sinais climáticos

As séries codatadas foram previamente tratadas para filtrar tendências ontogenéticas e autocorrelação temporal, e então combinadas em duas cronologias médias para sítio, de índices de largura de anéis (*RW*) e de índices de máxima intensidade do azul do lenho tardio (*MXBI*) de anéis. Para filtrar tendências das séries brutas, um modelo de Spline Cúbico (50% da variação mantida em janelas de 2/3 do comprimento da série) foi ajustado para cada variável e árvore, e os valores observados foram divididos pelos valores preditos pelo modelo, gerando séries de índices. Na sequência, essas séries de índices foram novamente filtradas com um modelo autoregressivo, gerando séries residuais de índices (Cook 1985).

Finalmente, as séries residuais de índices foram incorporadas em cronologias robustas médias bponderadas (Cook, 1985), descrevendo a variação esperada das árvores do sítio para os índices residuais de *RW* e de *MXBI*. As cronologias foram estimadas apenas para o período representado por 5 ou mais árvores na amostragem. Para descrever a variabilidade comum entre as árvores em cada cronologia, séries (*r*-bar), o sinal expresso da população (EPS) e o índice de sensibilidade média (MSI) (Cook e Pederson, 2011).

O grau de a associação entre as cronologias foi acessado através do coeficiente de correlação de Pearson. Os sinais climáticos das cronologias foram explorados por funções de correlação (Blasing *et. al.*, 1984), comparando cada cronologia com séries anuais de precipitação total (*PRE*), temperatura média (*TEM*) e

Índice de Severidade de Seca de Palmer (*PDSI*), extraídas da base de dados TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) para o quadrante em que está inserido o sítio de estudo. Os perfis de correlações foram computados com dados em escala trimestral, abrangendo da primavera (OND) da estação de crescimento anterior ao outono da estação de crescimento corrente (AMJ). A significância das correlações foi testada através de autoreamostragem ($\alpha = 0.05$), no software MULTIV versão 3.85b (Pillar, 2006).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Cronologias de anéis de crescimento

De modo geral, as árvores amostradas no sítio Loteamento Terra Nova (LTN) apresentavam anéis de crescimento bem definidos e concêntricos, sem casos notáveis de anéis parciais (em cunha) e lenho de reação. Das 20 árvores analisadas, 16 apresentaram um padrão sincrônico das séries de largura de anéis na etapa de codatação, sendo utilizadas nas cronologias médias de *RW* e de *MXBI*.

As amostras codatadas representaram integralmente os anéis formados em cada planta, *ie.* do ano do seu recrutamento (desde a medula, na altura de ~50 cm do solo) ao ano de 2012 (data do último anel completo), com comprimento variando entre 33 e 69 anos (média = 52 anos; desvio padrão = 11 anos). O período coberto por 5 ou mais árvores, considerado no cálculo e análise das cronologias médias, foi de 1955 a 2012 (58 anos). Estatísticas descritivas e representações gráficas das cronologias de largura de anéis e de intensidade do azul no lenho tardio ajustada, são mostradas na tabela 2, figuras 4 e 5.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das cronologias de largura de anel (*RW*) e de máxima intensidade de azul do lenho tardio (*MXBI*) para *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. As cronologias são baseadas em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Os valores são estimativas de médias e desvios padrão. MSI, *r*-int, *r*-bar e EPS foram calculados com séries de índices residuais.

Estatística	Largura do anel (<i>RW</i>)	Intensidade do Azul (<i>MXBI</i>)
Valor bruto	3.635 ± 0.687 mm	1.765 ± 0.082
Índice de Sensitividade Média (MSI)	0.267 ± 0.066	0.044 ± 0.011
Intercorrelação (<i>r</i> -int)	0.498 ± 0.122	0.372 ± 0.102
Correlação média (<i>r</i> -bar)	0.309 ± 0.158	0.199 ± 0.140
Sinal Expresso da População (EPS)	0.894	0.745

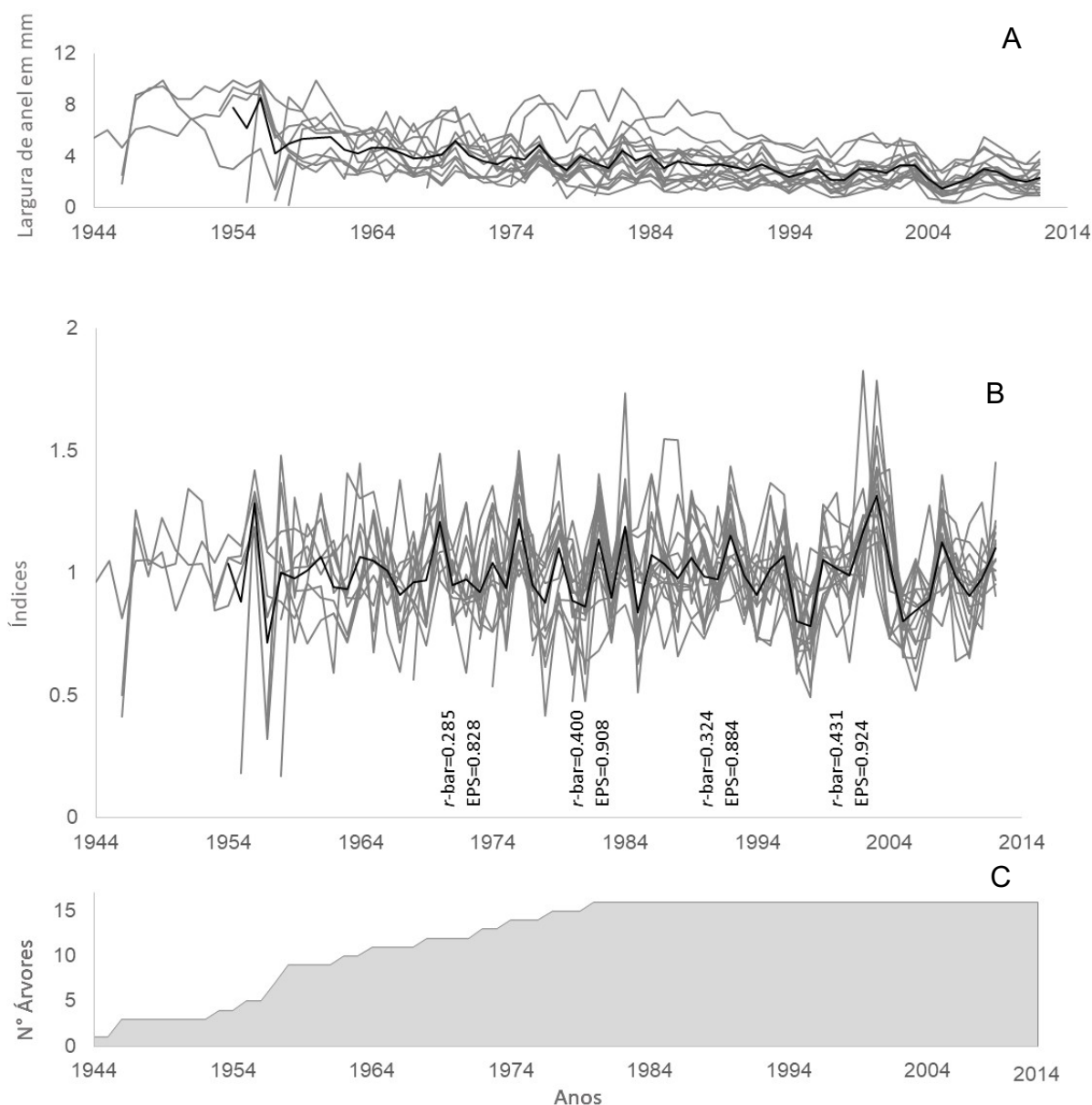


Figura 4. Cronologia de largura de anel (RW) para *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. A cronologia é baseada em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Em (A), séries brutas de RW por árvore. Em (B), séries de índices residuais de RW por árvore e média bponderada (em preto), valores de correlação média (\bar{r}) e Sinal Expresso da População (EPS) em janelas móveis de 20 anos. Em (C), número de séries de árvores por ano.

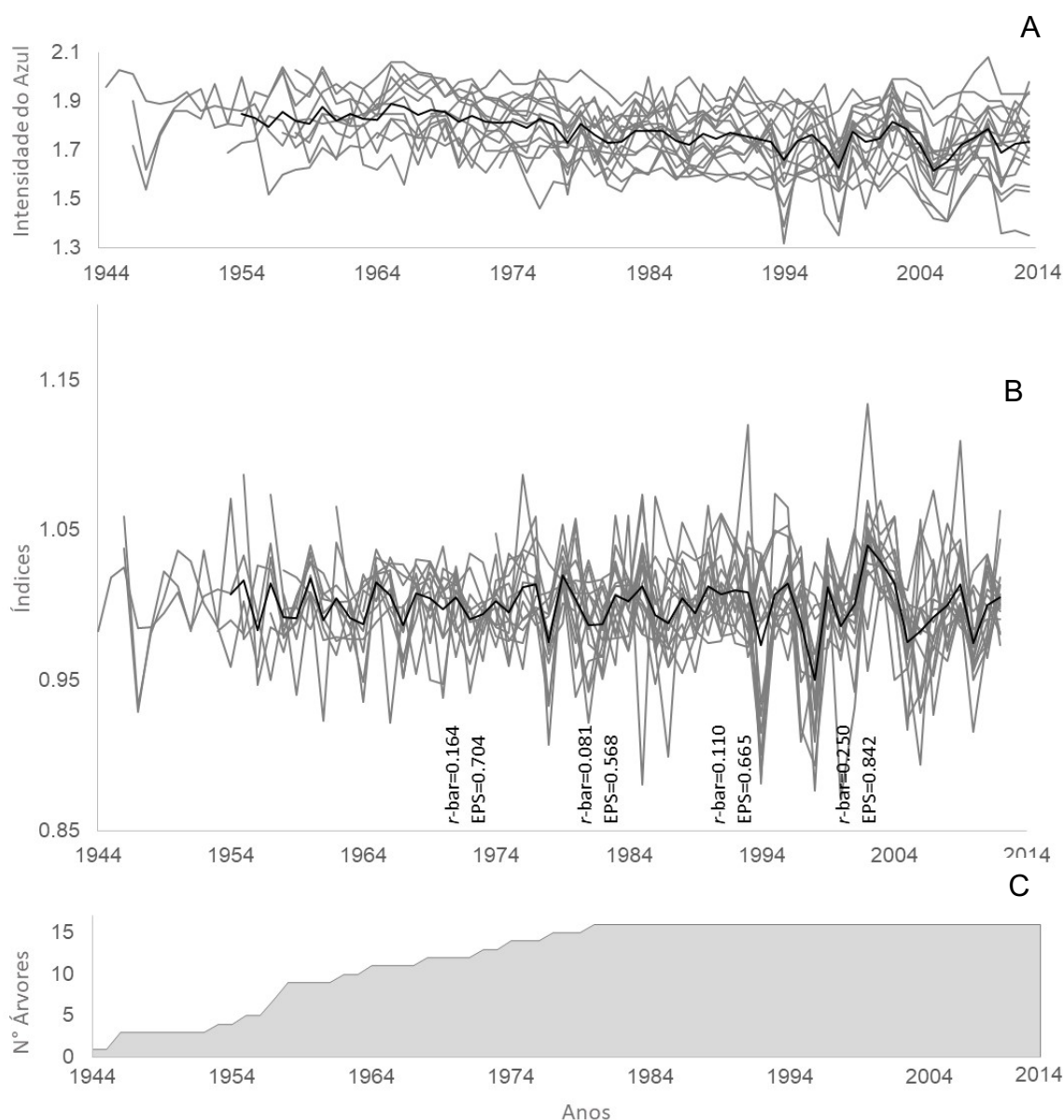


Figura 5. Cronologia de máxima intensidade do azul no lenho tardio (MXBI) para *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. A cronologia é baseada em séries de 16 árvores, previamente codatadas. Em (A), séries brutas de MXBI por árvore. Em (B), séries de índices residuais de MXBI por árvore e média bponderada (em preto), valores de correlação média (\bar{r}) e Sinal Expresso da População (EPS) em janelas móveis de 20 anos. Em (C), número de séries de árvores por ano.

3.3.2 Sinais entre as cronologias e com o clima

As cronologias de *RW* e *MXBI* tiveram entre si uma correlação positiva, de magnitude intermediária ($r = 0.45$; $n = 58$; $p = 0.002$). Ou seja, houve moderada tendência de que anéis mais largos que a média, tivessem uma densidade máxima do lenho tardio acima da média (Figura 6). Conforme as análises de Função de Correlação (Figura 7), as cronologias de *RW* e *BI* tiveram sinais climáticos significativos, respectivamente, com a precipitação total e a temperatura média do ar. Contudo, essas cronologias não tiveram sinais significativos com o Índice de Severidade de Seca de Palmer.

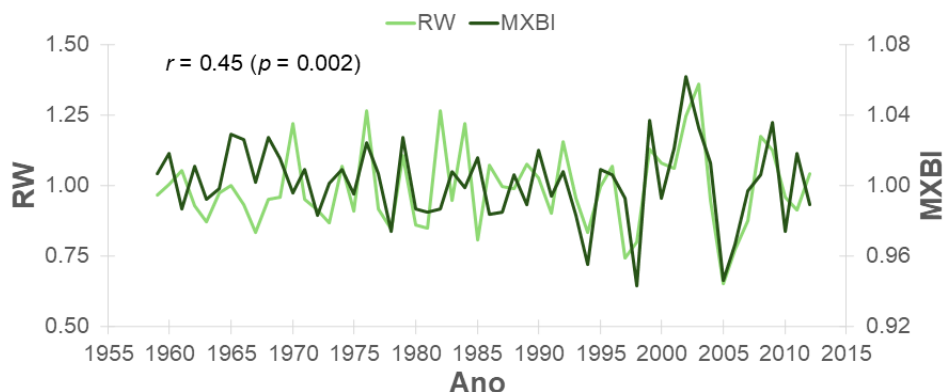


Figura 6. Associação entre as cronologias de largura de anéis (*RW*) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio de anéis (*MXBI*) de *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil.

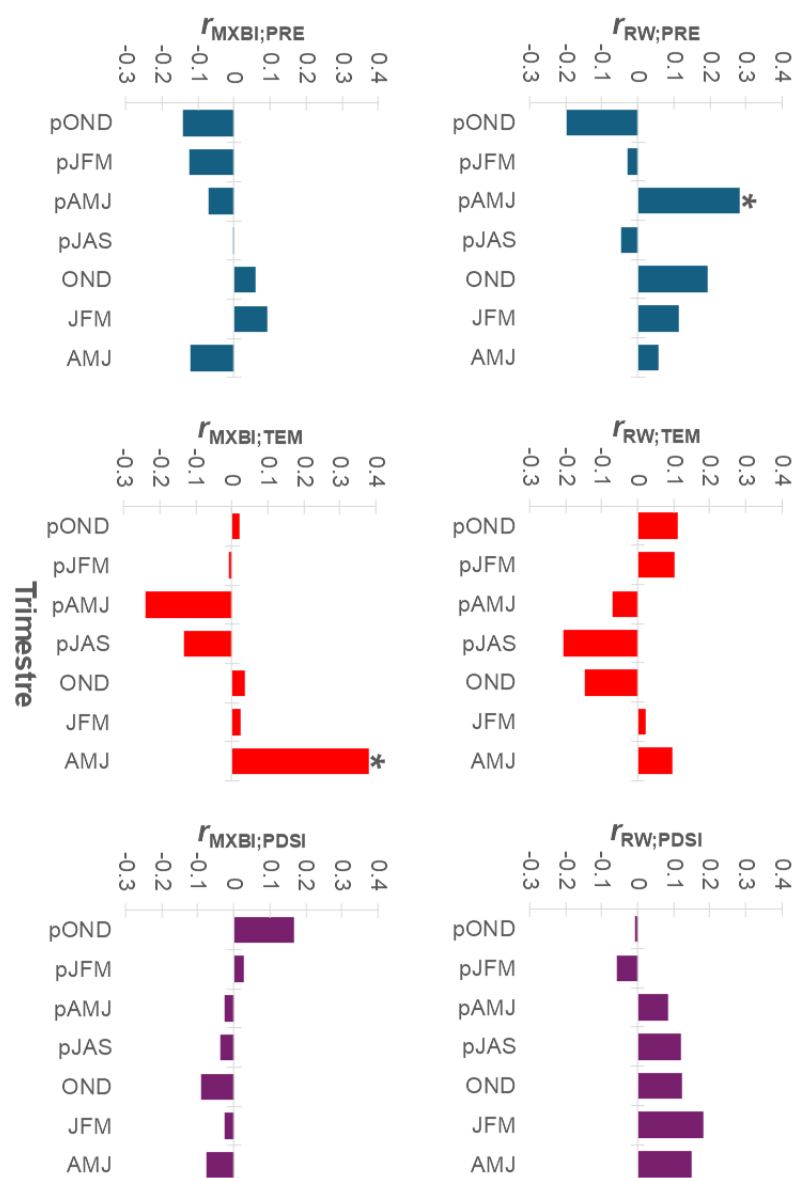


Figura 7. Funções de Correlação para as cronologias de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. Os gráficos representam coeficientes de correlação de Pearson das séries médias de largura (RW) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio ($MXBI$) com as séries de precipitação total (PRE), temperatura média do ar (TEM) e Índice de Severidade de Seca de Palmer ($PDSI$), para os trimestres abrangendo da primavera da estação de crescimento prévia (pOND) ao outono da estação de crescimento corrente (AMJ). Os coeficientes de correlação significativos ($\alpha = 0.05$) estão assinalados com asteriscos.

Na cronologia de *RW*, o sinal climático identificado correspondeu a uma fraca correlação positiva com a precipitação total no trimestre abril a junho da estação de crescimento prévia ($r = 0.28$; $n = 54$; $p = 0.029$; Figuras 7 e 8). Essa correlação indica que outonos com acumulados de chuva acima da média tiveram uma leve tendência de precederem a formação de anéis de crescimento mais largos que a média. Na cronologia de *MXBI*, o sinal climático detectado foi uma significativa correlação positiva com a temperatura média do ar para o trimestre abril a junho da estação de crescimento corrente ($r = 0.38$; $n = 54$; $p = 0.003$; Figuras 7 e 8). Essa correlação indica que outonos com temperatura atmosférica acima (abaixo) da média tiveram uma fraca tendência de coincidirem com a formação de anéis com máxima densidade do lenho tardio acima (abaixo) da média.

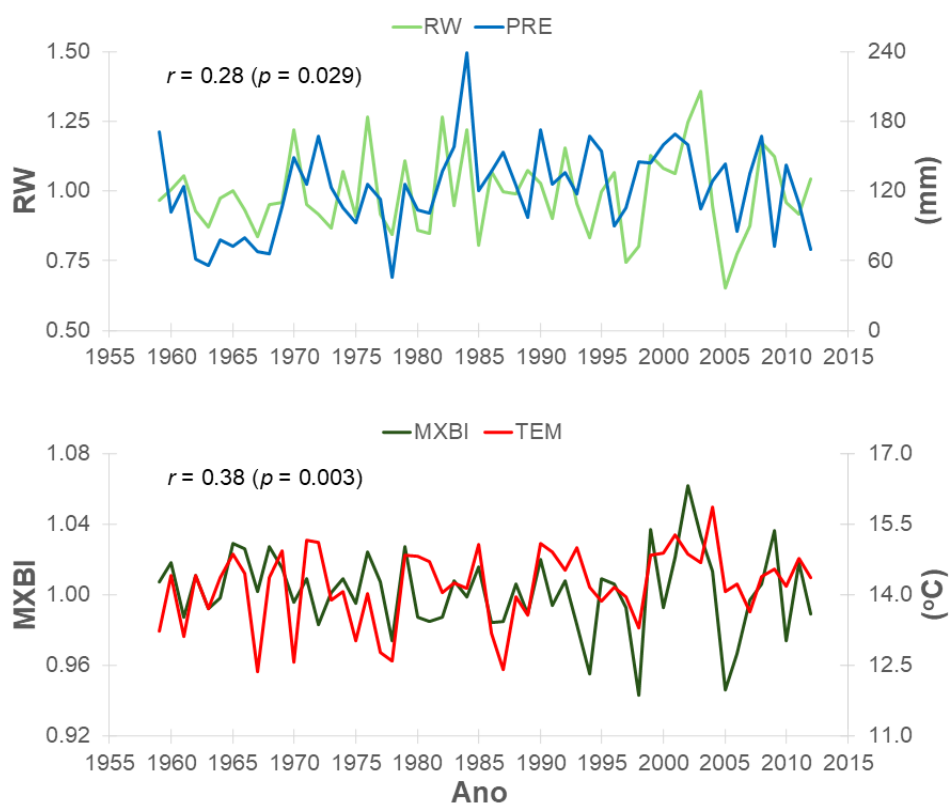


Figura 8. Sinais climáticos das cronologias de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, no sítio Loteamento Terra Nova (LTN), Caxias do Sul, RS, Brasil. Os gráficos mostram as séries médias de largura (*RW*) e de máxima intensidade do azul no lenho tardio (*MXBI*) com as séries climáticas que demonstraram correlações significativas nas análises de Função de Correlação, respectivamente, a de precipitação total do outono prévio (*PRE*) e a temperatura média do ar do outono corrente (*TEM*).

3.4 DISCUSSÃO

Este estudo é pioneiro ao explorar séries de intensidade do azul em anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*, desenvolvendo uma cronologia de *MXBI* sensível ao clima. Os resultados encontrados dão suporte para a primeira hipótese estudada, relacionada à existência de sinais dendroclimáticos nas séries de *RW* e *MXBI*, e suporte parcial para a hipótese subsequente, relativa à magnitude e amplitude temporal desses sinais. Os padrões revelados, além de instigarem novas ideias sobre a influência do clima na autoecologia da espécie, especialmente no entendimento de como o clima influencia diferentes aspectos do crescimento. Essa nova cronologia de *MXBI* nos trópicos da América do Sul contribui de forma especial para a ampliação da cobertura territorial dos registros de intensidade do azul. A extensão da cronologia e a magnitude dos sinais encontrados, embora não sejam suficientes para embasar uma reconstrução climática, indicam um promissor potencial a ser explorado. A seguir, ampliamos o debate acerca das descobertas deste estudo.

Os anéis de crescimento das árvores de *A. angustifolia* do sítio Loteamento Terra Nobre demonstraram um sinal comum nas séries de *MXBI* (Figura 5), positivamente associado a variações interanuais da temperatura do outono corrente (Figuras 7 e 8). Da mesma forma, para as séries de *RW* verificou-se um sinal comum (Figura 4), positivamente associado a variações na precipitação de outono da estação anterior (Figuras 7 e 8). Essas evidências dão suporte para a hipótese de que variações interanuais nas condições climáticas induzem respostas morfofisiológicas comuns entre as árvores de *A. angustifolia*, que tem sido amplamente corroborada para *RW* (Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Lorensi and Prestes, 2016; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Lorensi and Prestes, 2018; Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Scipioni et al., 2021; Arenhardt et al., 2024), e também em estudos pioneiros para isótopos de carbono (Silva et al., 2009) e de oxigênio (Liu et al., 2023). Nossos resultados demonstram pela primeira vez a validade dessa hipótese para séries de *MXBI* em *A. angustifolia*.

Considerando a relação proporcional entre *BI* e densidade do lenho (McCarroll et al., 2002; Björklund et al., 2024), o sinal climático evidenciado nas séries de *MXBI* indica que a densidade máxima do lenho tardio em *A. angustifolia* tende a ser moderadamente maior em anéis que se desenvolveram durante outonos mais quentes

(Figura 7). Coníferas austrais têm revelado ampla variabilidade de sinais climáticos em séries de densidade (Drew et al., 2013; O'Donnell et al., 2016) e de intensidade do azul (Brookhouse et al., 2016; Buckley et al., 2018; Blake et al., 2020; Wilson et al., 2021; Mundo et al., 2024), contrastando com a resposta relativamente uniforme das coníferas de climas frios do hemisfério Norte (Björklund et al., 2017). De forma combinada, os estudos com *Agathis australis* (Wilson et al., 2021), *A. araucana* (Mundo et al., 2024) e este com *A. angustifolia*, sugerem que uma correlação positiva com a temperatura de outono corrente seja um padrão de resposta em Araucariaceae. Este padrão é afim ao das coníferas setentrionais temperadas e boreais, cujas cronologias de densidade máxima (Briffa et al., 1988; Esper et al., 2018; Björklund et al., 2019) e de *MXBI* (Sheppard et al., 1996; McCarroll et al., 2002; Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014, 2015) têm sinal tipicamente positivo com a temperatura do verão corrente.

Na cronologia de *RW*, o sinal climático detectado revela uma leve tendência de anéis mais largos precederem anos com outonos mais chuvosos (Figura 8). Sinal semelhante não é comum noutras cronologias de *RW* de *A. angustifolia*, mas foi previamente identificado em um sítio no norte de sua área de distribuição (Brandes et al., 2021). Este sinal positivo com precipitação de outono pode ser indicativo de que a disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento seja influenciada pela recarga de água no solo durante o outono, desta forma favorecendo o crescimento das árvores a partir da primavera. Contudo, o padrão de precipitação elevada e bem distribuída ao longo do ano no sítio LTN (Figura 3), bem como a ausência de sinais com o índice de severidade de seca de Palmer nesta cronologia de *RW* (Figura 7), não dão suporte a ideia de limitação hídrica decorrente de baixa precipitação no local. Alternativamente, precipitações acima da média no outono poderiam causar estresse fisiológico devido a excesso de água no solo e/ou baixa irradiância, encurtando a duração da estação de crescimento. Em linha com a explicação proposta para sinais negativos com a temperatura de outono prévio em cronologias de *RW* no Sul do Brasil (Oliveira et al., 2010), o encurtamento da estação de crescimento por estresse fisiológico no outono (excesso de chuvas e/ou baixas temperaturas) resultaria em acúmulo de carboidratos não estruturais, que impactariam positivamente no crescimento da estação subsequente.

A segunda hipótese testada neste estudo foi parcialmente corroborada, de que *RW* integraria estímulos climáticos ao longo da estação de crescimento corrente e/ou

anterior, ao passo que *BI* responderia a estímulos ao final da estação de crescimento. De fato, a variação interanual de *MXBI* demonstrou ser afetada apenas por condições térmicas do outono corrente. Contudo, a cronologia de *RW* não demonstrou integrar sinais climáticos por um período sazonal mais longo que a cronologia de *MXBI*, tampouco teve magnitude do sinal climático marcadamente menor que a de *MXBI*. As respostas dendroclimáticas em *A. angustifolia* são mais complexas do que o inicialmente proposto, possivelmente refletindo dinâmicas multifatoriais que incluem interações entre o clima, características ambientais locais, e processos fisiológicos específicos das árvores (Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Arenhardt et al., 2024).

A moderada correlação existente entre as séries de *MXBI* e de *RW* (Figura 6) sugere uma ligação entre processos fisiológicos que regulam essas características do crescimento secundário em *A. angustifolia*, indicando uma interação entre parâmetros anatômicos e ópticos no registro das condições climáticas (Björklund et al., 2017; Buckley et al., 2018). A correlação entre *MXBI* e de *RW* no presente estudo não deve resultar da influência da precipitação de outono anterior e da temperatura de outono corrente, uma vez que esses fatores exercerem influência exclusiva nas cronologias, e não mútua. Esses sinais climáticos distintos e relacionados a diferentes fases do ciclo de crescimento em *A. angustifolia*, reforçam a complementaridade entre cronologias de *MXBI* e *RW* (McCarroll et al., 2002; Blake et al., 2020).

A cronologia de *MXBI* de *A. angustifolia* teve extensão significativamente mais curta e com sinal-comum mais fraco que os resultados reportados para espécies afins. A cronologia deste estudo, desenvolvida com árvores em sítio de florestas secundárias, cobriu o período de 1955 a 2012, com índices de sincronismo entre árvores que revelam níveis relativamente elevados de ruído (Tabela 2). Essas características contrastam com as cronologias seculares e de sinal comum robusto, desenvolvidas para sua espécie-irmã de clima temperado - *A. araucana* (Mundo et al., 2024), e para uma conífera de clima tropical - *Fokienia hodginsii* (Buckley et al., 2018). Os elevados índices da cronologia de *RW* (Tabela 2) indicam que o ruído da cronologia de *MXBI* de *A. angustifolia* não deve ser causado por erros de datação, mas por uma real maior variabilidade entre árvores nesta variável. De fato, cronologias de *BI* costumam apresentar sinais mais fracos do que cronologias correspondentes de *RW* (Campbell et al., 2007; Björklund et al., 2014).

As cronologias de *A. angustifolia* têm sido usualmente construídas com *RW*, e raramente alcançam extensão secular ou maior mantendo robustez de sinal comum (Oliveira et al., 2010; Brandes et al., 2021), seja por tratarem de árvores relativamente jovens (Cattaneo et al., 2013; Albiero-Júnior et al., 2020; Arenhardt et al., 2024) ou pela dificuldade de codatação de árvores antigas (Oliveira et al., 2010; Brandes et al., 2021). Todavia, a existência de remanescentes com árvores alcançando idades potencialmente multisseculares (Scipioni et al., 2019), a ampliação da rede de estudos (Arenhardt et al., 2024) e resultados promissores com novas abordagens metodológicas (Silva et al., 2009; Liu et al., 2023), justificam futuros esforços visando desenvolver *proxies* dendroclimáticos robustos e extensos com *A. angustifolia*.

Os resultados deste estudo pioneiro sobre *BI* em *A. angustifolia* devem ser encarados como o início de uma linha de investigação, de promissor potencial. O passo seguinte desse processo de pesquisa seria explorar outras medidas de *BI* nas árvores deste estudo. Especialmente em coníferas austrais, sinais dendroclimáticos interessantes têm sido encontrados em cronologias de mínima densidade do lenho inicial (*MNBI*, do inglês) e/ou de diferença entre *MXBI* e *MNBI* (do inglês, ΔBI) (Björklund et al., 2014; Buckley et al., 2018). Na sequência, se poderia explorar a variabilidade espacial de cronologias de *BI*. Para tanto, amostras utilizadas em cronologias de *RW* preexistentes poderiam ser revisitadas (Oliveira et al., 2010; Cattaneo et al., 2013; Lorensi and Prestes, 2016; Oliveira et al., 2017; Marcon et al., 2018; Lorensi and Prestes, 2018; Albiero-Júnior et al., 2020; Brandes et al., 2021; Scipioni et al., 2021; Arenhardt et al., 2024), o que seria facilitado pela simplicidade e baixo custo das análises de *BI* (Björklund et al., 2014; Rydval et al., 2014; Blake et al., 2020). Se cronologias de *BI* de *A. angustifolia* apresentarem sinais regionais robustos e sensíveis ao clima, diferente da grande variabilidade espacial das cronologias de *RW* (Fontana et al., 2018; Brandes et al., 2021; Arenhardt et al., 2024), se justificariam esforços de maior investimento no desenvolvimento de cronologias extensas o bastante para serem utilizadas com *proxy* climático.

3.5 CONCLUSÃO

A cronologia de *MXBI* de *A. angustifolia* aqui apresentada é a segunda deste tipo na América do Sul (ver Mundo et al., 2024) e nos trópicos (ver Buckley et al., 2018), contribuindo de forma especial para a ampliação global dos registros de

intensidade do azul (Kaczka et al., 2021). A correlação positiva com a temperatura de outono corrente detectada nessa cronologia é coerente com o reportado noutras *Araucariaceae* (Wilson et al., 2021; Mundo et al., 2024), e afim ao padrão das coníferas setentrionais (Björklund et. al., 2017), indicando que novas cronologias robustas e longevas de *BI* de *Araucariaceae* poderiam contribuir em reconstruções globais de temperatura. A continuidade das pesquisas aqui iniciadas é necessária para validar o potencial paleoclimático de cronologias de *BI* com *A. angustifolia*.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, John T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.
- ALBIERO-JÚNIOR, Alci et al. Edge effects modify the growth dynamics and climate sensitivity of *Araucaria angustifolia* trees. **Tree-Ring Research**, v. 76, n. 1, p. 11-26, 2020.
- ARENHARDT, Bruna Borne et al. Dendroclimatology of *Araucaria angustifolia*: Assessing climatic responses in sites under similar ecological conditions. **Dendrochronologia**, v. 85, p. 126216, 2024.
- BJÖRKLUND, J. A. et al. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. **Climate of the Past**, v. 10, n. 2, p. 877-885, 2014.
- BJÖRKLUND, Jesper et al. Using adjusted blue intensity data to attain high-quality summer temperature information: a case study from Central Scandinavia. **The Holocene**, v. 25, n. 3, p. 547-556, 2015.
- BJÖRKLUND, Jesper et al. A definition and standardised terminology for Blue Intensity from Conifers. **Dendrochronologia**, v. 85, p. 126200, 2024.
- BJÖRKLUND, Jesper et al. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. **New Phytologist**, v. 216, n. 3, p. 728-740, 2017.
- BJÖRKLUND, Jesper et al. Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 4, p. 1224-1264, 2019.

- BLAKE, Stephanie AP et al. Palaeoclimate potential of New Zealand *Manoao colensoi* (silver pine) tree rings using Blue-Intensity (BI). **Dendrochronologia**, v. 60, p. 125664, 2020.
- BLASING, T. J.; SOLOMON, A. M.; DUVICK, D. N. Response functions revisited. 1984.
- BRANDES, Arno Fritz et al. The growth responses of *Araucaria angustifolia* to climate are adjusted both spatially and temporally at its northern distribution limit. **Forest Ecology and Management**, v. 487, p. 119024, 2021.
- BRIFFA, Keith R.; JONES, Philip D.; SCHWEINGRUBER, Fritz H. Summer temperature patterns over Europe: a reconstruction from 1750 AD based on maximum latewood density indices of conifers. **Quaternary Research**, v. 30, n. 1, p. 36-52, 1988.
- BUCKLEY, Brendan M. et al. Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: an ecophysiological perspective. **Dendrochronologia**, v. 50, p. 10-22, 2018.
- CAMPBELL, Rochelle et al. Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: developing a new palaeoclimate proxy. *The Holocene*, v. 17, n. 6, p. 821-828, 2007.
- CATTANEO, Nicolás et al. Sex-related, growth–climate association of *Araucaria angustifolia* in the neotropical ombrophilous woodlands of Argentina. **Dendrochronologia**, v. 31, n. 3, p. 147-152, 2013.
- COOK. A time-series analysis approach to tree ring standardization. **Ph. D. dissertation, University of Arizona**, 1985.
- COOK, Edward R.; PEDERSON, Neil. Uncertainty, emergence, and statistics in dendrochronology. **Dendroclimatology: progress and prospects**, p. 77-112, 2011.
- DE MIL, Tom et al. Bristlecone pine maximum latewood density as a superior proxy for millennium-length temperature reconstructions. **Geophysical Research Letters**, v. 51, n. 15, p. e2024GL109799, 2024.
- ESPER, Jan et al. Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings. **Dendrochronologia**, v. 50, p. 81-90, 2018.
- FONTANA, Cláudia et al. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 13, n. 4, p. 321-333, 2018.
- FRITH, A., (Unpublished undergraduate dissertation project) 2009. Exploring Methods of Blue Intensity in Dendrochronology. University of St Andrews, UK

GONÇALVES, Janaína Quixabeira et al. Minimum temperature and evapotranspiration in Central Amazonian floodplains limit tree growth of *Nectandra amazonum* (Lauraceae). **Trees**, v. 35, p. 1367-1384, 2021.

HOLMES RL (1986) Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. In: Holmes RL, Adams RK, Fritts HC. (eds.) Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including user's manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN. Tucson, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. 41-49 pp.

HOLMES RL (1993) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletins* 43: 69-78.

HUECK, Kurt; REICHARDT, Hans. As florestas da América do Sul Ecologia, composição e importância econômica. 1972.

KACZKA, Ryszard J.; WILSON, Rob. I-BIND: International Blue intensity network development working group. **Dendrochronologia**, v. 68, p. 125859, 2021.

KLEIN, Roberto M. O aspecto dinâmico do pinheiro brasileiro. **Sellowia**, v. 12, n. 12, p. 17-44, 1960.

LARSSON, L. (2014). Cybis CooRecord. Saltsjöbaden: Cybis Elektronik & Data AB.

Drew, D. M., Allen, K., Downes, G. M., Evans, R., Battaglia, M., & Baker, P. (2013). Wood properties in a long-lived conifer reveal strong climate signals where ring-width series do not. *Tree physiology*, 33(1), 37-47.

LIU, Sainan et al. Monthly Precipitation Reconstruction in Subtropical South America Using Seasonal Tree-Ring Oxygen Isotopes. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 128, n. 12, p. e2023JG007490, 2023.

LORENSI, Caren; PRESTES, Alan. Dendroclimatological reconstruction of spring-summer precipitation for Fazenda Rio Grande, PR, with samples of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 347-354, 2016.

LORENSI, Caren; PRESTES, Alan. Dendroclimatologia com amostras de *Araucaria angustifolia* coletadas em Santa Catarina. **Revista Univap**, v. 24, n. 44, p. 1-12, 2018.

MARCON, A. K. et al. Alteração ambiental e crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na região centro-sul do Paraná, Brasil. 2018.

MARTINELLI, Gustavo; MORAES, Miguel Avila. Livro vermelho da flora do Brasil. 2013.

- MCCARROLL, D. et al. Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings. **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 34, n. 4, p. 450-453, 2002.
- MUNDO, Ignacio A. et al. Blue intensity measurements in a South American conifer: evaluation of different methodological approaches for *Araucaria araucana*. **Dendrochronologia**, v. 84, p. 126177, 2024.
- O'DONNELL, Alison J. et al. Wood density provides new opportunities for reconstructing past temperature variability from southeastern Australian trees. **Global and Planetary Change**, v. 141, p. 1-11, 2016.
- OLIVEIRA, Juliano Morales; ROIG, Fidel Alejandro; PILLAR, Valerio Depatta. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. **Austral Ecology**, v. 35, n. 2, p. 134-147, 2010.
- OLIVEIRA, Juliano Morales et al. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. **Trees**, v. 23, p. 107-115, 2009.
- OLMEDO, Gabriela Morais; DE OLIVEIRA, Juliano Morales; TOMAZELLO-FILHO, Mario. What do tree-growth archives tell us about anthropogenic pressures and their mitigations in the Atlantic Forest?. **Environmental Reviews**, v. 33, p. 1-20, 2024.
- PILLAR, V. D. (2006). MULTIV: multivariate exploratory analysis, randomization testing and bootstrap resampling.
- QUESADA-ROMÁN, Adolfo et al. Tropical and subtropical dendrochronology: Approaches, applications, and prospects. **Ecological Indicators**, v. 144, p. 109506, 2022.
- ROIG, F. A. Dendrocronología en los bosques del Neotrópico: revisión y prospección futura. **Dendrocronología en América latina**, v. 307, p. 355, 2000.
- RYDVAL, Miloš et al. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland. **Dendrochronologia**, v. 32, n. 3, p. 191-204, 2014.
- SCIPIONI, Marcelo Callegari et al. The last giant *Araucaria* trees in southern Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 76, n. 3, p. 220-226, 2019.
- SCIPIONI, Marcelo Callegari et al. Effects of cold conditions on the growth rates of a subtropical conifer. **Dendrochronologia**, v. 68, p. 125858, 2021.
- SEITZ, Rudi A.; KANNINEN, Markku. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil: Preliminary results. 1989.

SHEPPARD, Paul R.; GRAUMLICH, Lisa J.; CONKEY, Laura E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. **The Holocene**, v. 6, n. 1, p. 62-68, 1996.

SCHULMAN, Edmund. Dendroclimatic changes in semiarid America. 1956.

SILVA, Lucas CR et al. Past century changes in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze water use efficiency and growth in forest and grassland ecosystems of southern Brazil: implications for forest expansion. **Global Change Biology**, v. 15, n. 10, p. 2387-2396, 2009.

SPEER, James H. **Fundamentals of tree-ring research**. University of Arizona Press, 2010.

Thomas, P. (2013). *Araucaria angustifolia*. **The IUCN red list of threatened species 2013**: e. T32975A2829141.

WEHR, N. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Tree-ring characterization of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze trees, applying the X-ray microdensitometry. 2000.

WILSON, Rob et al. Evaluating the dendroclimatological potential of blue intensity on multiple conifer species from Australasia. **Biogeosciences Discussions**, v. 2021, p. 1-41, 2021.

APÊNDICES

Apêndice 1. Janelas de mensuração da intensidade do azul (MXBI) de uma amostra de *Araucaria angustifolia*, no software Coorecorder.

