

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

NÍVEL MESTRADO

BRUNA TREVISO CENCI

Efeitos da elevação do dióxido de carbono atmosférico e
da mudança climática na fixação de carbono em
Araucaria angustifolia

**São Leopoldo
2017**

BRUNA TREVISIO CENCI

Efeitos da elevação do dióxido de carbono atmosférico e
da mudança climática na fixação de carbono em
Araucaria angustifolia

Projeto de dissertação apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Biologia, pelo Programa de Pós-
Graduação em Biologia da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Dr. Juliano Morales de Oliveira

São Leopoldo

2017

C395e

Cenci, Bruna Treviso.

Efeitos da elevação do dióxido de carbono atmosférico e da mudança climática na fixação de carbono em *Araucaria angustifolia* / Bruna Treviso Cenci. – 2017.

51 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Biologia, 2017.

“Orientador: Dr. Juliano Morales de Oliveira.”

1. Produtividade primária. 2. Mudança global. 3. Fertilização de CO₂. 4. Dendrocronologia. 5. Dendrodensitometria. 6. Floresta subtropical. 7. Mata Atlântica. I. Título.

CDU 57

Dedico esse estudo ao meu maior bem: minha família.

AGRADECIMENTOS

“A gratidão é o único tesouro dos humildes” (William Shakespeare). Então nada mais justo do que usar dessa lauda para agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com minha caminhada acadêmica junto ao PPG em Biologia.

Inicialmente agradeço a Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em especial ao Programa de Pós-graduação em Biologia. Ao meu orientador Doutor Juliano Morales de Oliveira, pelo conhecimento, auxílio técnico e oportunidade. Ao CNPq pela de bolsa de estudos fornecida.

Dentre tantas pessoas a serem aqui descritas, deixo meus sinceros agradecimentos: à equipe do Laboratório de Anatomia e Densitometria de Raio X Esalq/USP, em especial ao Doutor Mario Tomazello Filho e ao Doutorando Alejandro Venegas-González; aos colegas e amigos que auxiliaram no trabalho de campo na Flona-SFP; ao auxílio junto ao laboratório de Ecologia Vegetal por todos os colegas, principalmente às amigas Gabriela Morais Olmedo e Claudia Fontana, que respectivamente, com juventude e maturidade possuem a força do verdadeiro conhecimento, aquele que pode ser compartilhado.

À minha família, agradeço a todos: pelo carinho, pela paciência e pelo incentivo. Como disse minha mãe por várias vezes: “Logo vamos nos formar filha!”. E ela estava certa, afinal, todos contribuíram de alguma forma. À tia Nilva e ao primo Cris, por terem me acolhido com muito carinho em sua casa durante o período das aulas.

Aos meus pais, acrescento ainda minha eterna gratidão pela VIDA, pois seja ela longa ou curta, tenho certeza que vivo da melhor forma graças a eles!

Ao meu namorado, amigo e confidente, agradeço por ter cruzado o meu caminho...agradeço por ter deixado meus dias mais felizes...agradeço simplesmente por ele existir. Como eu o amo!

E por fim, sou grata a mim...porque se não fosse por mim...

Obrigada!

Bruna Treviso Cenci

RESUMO

O aumento das concentrações de CO₂ atmosférico no último século deve impactar a produtividade primária dos ecossistemas. Esse efeito pode ser direto e positivo, devido a um mecanismo de fertilização, ou de modo indireto (positivo ou negativo) através de mudanças climáticas. Evidências sobre variação no balanço de carbono de florestas nas últimas décadas indicam respostas neutras em regiões boreais, positivas em regiões temperadas e negativas nos trópicos. Especificamente para florestas subtropicais há pouca evidência acerca de como a produtividade primária responde a esses fatores de mudança global. Nesse trabalho, investigamos como a produtividade primária de uma conífera arbórea dominante em florestas subtropicais úmidas do SE da América do Sul (*Araucaria angustifolia*) tem sido afetada ao longo do último século pelas concentrações de CO₂ e consequentes alterações climáticas. Para uma população dessa espécie, testamos a validade das seguintes hipóteses: (i) o incremento de CO₂ atmosférico afeta a taxa de fixação de carbono indiretamente, através do impacto do aquecimento global nos regimes regionais de temperatura e precipitação; e (ii) além desse efeito indireto, o incremento de CO₂ afeta diretamente a taxa de fixação de carbono através de um mecanismo de fertilização. Para uma amostra inicial de 25 árvores de *A. angustifolia* de 0,33 ha de floresta subtropical madura no sul do Brasil, estimamos séries de incremento anual de carbono no lenho de 14 árvores, a partir de séries dendrocronológicas codatadas de largura de anéis (de um estudo preexistente) e de densidade de anéis (por densitometria de Raios X); e equações hipsométrica (ajustada à população local) e volumétrica (geral para a espécie). As séries individuais foram combinadas numa série média de índices de incremento de carbono (vetor I), filtrando previamente tendências ontogenéticas (pela Curva Regional de Padronização) e autocorrelação temporal (por modelos autoregressivos). Comparando I à séries regionais de temperatura média e precipitação total (estimativas do CRU TS4), através de Função de Correlação, selecionamos variáveis climáticas relacionadas à fixação de carbono (matrizes P e T). Dados instrumentais de concentração de carbono atmosférico (NOAA EARL) e estimativas de temperatura global (CRU TEM4) compuseram as matrizes C e A , respectivamente. Finalmente, a validade dos modelos causais descrevendo as relações entre as matrizes I , T , P , A e C segundo as diferentes hipóteses de estudo, foi testada por Análise de Caminhos. A cronologia de índices residuais de incremento de carbono obtida cobriu o período 1890 a 2014, com médias de $r_{\text{bar}} = 0,27$ e $\text{EPS} = 0,77$. Nas análises subsequentes consideramos o período de 1901 a 2008 (período comum com as séries climáticas). Ambos modelos não foram rejeitados na Análise de Caminhos ($P > 0,1$), sendo o modelo que representa a hipótese i

considerado mais plausível pelo maior p-valor para a estatística C de Fisher (Fisher-C = 9,25, $gl = 10$, $P = 0,508$). Nesse modelo, o aquecimento global decorrente da elevação do CO₂ afeta negativamente o incremento de carbono em *A. angustifolia* através da elevação da temperatura de maio prévio na região. Além deste fator climático, as precipitações de março e junho prévios afetam a fixação de carbono de modo positivo, porém ambas não são influenciadas pelo CO₂ através do aquecimento global. Em conjunto, as variáveis climáticas explicaram 19% da variação temporal do incremento de carbono das árvores. Esses resultados demonstram que, apesar do conhecido impacto positivo do aumento do CO₂ na eficiência do uso água nessa espécie (e sítio) isso não se traduz em maior produtividade primária, possivelmente pelo carácter ombrófilo do clima regional. Por outro lado, a mudança para outonos com temperatura mais elevadas tem resultado em menor produtividade primária de *A. angustifolia* ao longo do último século. Sendo esta espécie dominante e com papel chave na estrutura trófica, este efeito negativo da mudança climática na sua produtividade, possivelmente, pode impactar indiretamente a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas em que insere.

Palavras-chave: Produtividade Primária; Mudança Global; Fertilização de CO₂; Dendrocronologia; Dendrodensitometria; Floresta Subtropical; Mata Atlântica.

ABSTRACT

The increase in the concentrations of atmospheric CO₂ in the last century must impact ecosystems primary productivity. This effect may be direct and positive, due to a fertilization mechanism, or indirect (positive or negative) through climate changes. Evidences on the variation of carbon balance in forests in the last decades indicate neutral responses in boreal regions, positive in temperate regions and negative in the tropics. There is little evidence about how primary productivity responds to these global changing factors in subtropical forests. In this study, we investigate how the primary productivity of a dominant conifer in subtropical moist forests of the Southeast region of South America (*Araucaria angustifolia*) has been affected throughout the last century by elevated CO₂ concentrations and consequent climate alterations. For a population of this species, we have tested the validity of the following hypothesis: (i) the increase of atmospheric CO₂ indirectly affects the rate of carbon fixation, through the impact of global warming in the local temperature and rainfall regimes; and (ii) besides this indirect effect, the increment in CO₂ directly affects the rate of carbon fixation through a fertilization mechanism. In an initial sample of 25 *A. angustifolia* trees from 0,33 ha of mature subtropical forest in the south of Brazil, we estimated annual series of wood carbon content for 14 trees using series of dendrochronologically dated growth-ring widths (from a preexisting study) and growth-ring densities (by X ray densitometry), and hypsometric (adjusted to local population) and volumetric (general for the species) equations. The individual series were combined in an average index series of carbon increment (*I* vector), previously removing ontogenetic tendencies (through Regional Curve Standardization) and time autocorrelation (by autoregressive models). By comparing *I* to regional series of mean temperature and total rainfall (estimations of CRU TS4) through a Correlation Function, we selected several climatic variables related to carbon fixation (*P* and *T* matrices). Instrumental data of atmospheric C concentration (NOAA EARL) and estimations of global temperature (CRU TEM4) composed matrices *C* and *A*, respectively. Finally, the validity of causal models describing the relations among matrices *I*, *T*, *P*, *A* e *C* according to the different hypothesis of the study, was tested through Path Analysis. The resulting chronology of residual indexes of carbon increment comprehended the period of 1890 to 2014, with averages of $\bar{r} = 0,27$ and $EPS = 0,77$. In the subsequent analysis, we considered the period of 1901 to 2008 (common period with the climate series). Both models were not rejected in the Path Analysis ($P > 0,1$), and the model which represents the *i* hypothesis was considered the most plausible by the greater p-value for the Fisher's C-statistic (Fisher-C = 9.25, gl = 10, $P = 0.508$). In this model,

global warmth comes from the elevation of CO₂ which negatively affects the increase in carbon content in *A. angustifolia* through regional temperature elevation (in previous) may. Besides this climatic factor, rainfalls in previous march and june affected carbon fixation in a positive way, although both are not influenced by CO₂ through global warming. In summary, climatic variables explained 19% of temporal variation of carbon increase in the trees. These results demonstrate that, despite the known positive impact of CO₂ in water use efficiency in this species (and site), this does not translate into a greater primary productivity, possibly by the ombrophilous character of the regional climate. On the other hand, the change into autumns with higher temperatures has resulted in lower primary productivity of *A. angustifolia* throughout the last century. As this is the dominant species and plays a key role in the trophic structure, this negative effect of the climatic change in its productivity may, possibly, indirectly impact the structure and the operation of the ecosystems in which it is inserted.

Key words: Primary Productivity; Global Changing; CO₂ Fertilization; Dendrochronology; Dendrodensitometry; Subtropical Forest; Atlantic Forest.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Elevação da concentração atmosférica de CO ₂ entre 1832 e 2016.	10
Figura 2. Anomalias de temperatura global (terra e oceanos) entre 1880 e 2016.	11
Figura 3. Modelos causais representando hipóteses alternativas sobre efeitos da elevação de CO ₂ atmosférico no incremento de carbono no lenho de <i>A. angustifolia</i>	15
Figura 4. Localização da Flona São Francisco de Paula no domínio Bioma Mata Atlântica. .	16
Figura 5. Temperatura e precipitação média na FLONA-SFP entre 1901 e 2008.	17
Figura 6. Sítio de estudo. Vista do dossel dominado por <i>A. angustifolia</i>	18
Figura 7. Coleta de amostras com sonda de Pressler.	18
Figura 8. Preparação das amostras para análise densitométrica. Colagem das amostras (A), corte em serra dupla circular (B) e secagem (C).	20
Figura 9. Leitura da densidade aparente do lenho de amostra no equipamento de densitometria QMS. Imagem do perfil de densidade da amostra durante varredura (A); Equipamento de densitometria de raio X (B).	21
Figura 10. Equipamento de raio X que gera imagens digitais e auxilia na identificação dos anéis de crescimento. Equipamento LX-60 FAXITRON (A); Imagem digital obtida pelo equipamento de raio X (B).	22
Figura 11. Polimento das amostras após análise densitométrica. Amostras coladas em suporte de madeira (A); Lixadeira (B); Lixas de polimento (C).	23
Figura 12. Ilustração de como a correlação entre identificação anatômica através da largura dos anéis e perfil de densidade é possível: Parte do perfil de densidade do lenho juntamente com a imagem de raio X obtida através do Faxitron.	24
Figura 13. Indicação de variações anatômicas na madeira (em vermelho) e período de desenvolvimento uniforme (em azul).	24
Figura 14. Estimativas de incremento de carbono em função da idade cambial em 14 árvores de <i>A. angustifolia</i> , baseados em séries codatadas de largura e densidade média de anéis de crescimento. As cores (verdes ou lilás) representam árvores com padrões ontogenéticos distintos (grupos 01 e 02).	31
Figura 15. Cronologia residual de 14 árvores de <i>A. angustifolia</i> a partir do incremento de carbono anual. O gráfico apresenta três cores de séries: preto, árvores do grupo 1; cinza, árvores do grupo 2; e vermelho, a média de todas as árvores (cronologia usada nos modelos).	34

Figura 16. Perfis de correlação entre as séries climáticas e a cronologia residual de incremento de carbono de árvores de <i>A. angustifolia</i> . Influências de temperatura (em vermelho) e de precipitação (em azul) na estação de crescimento prévia e na estação de crescimento corrente de crescimento das árvores. Em destaque os meses cujo coeficiente foi diferente de zero num intervalo de confiança de 95% (séries em preto).....	35
Figura 17. Hipótese 1 aceita no estudo. No esquema abaixo estão a hipótese aceita e suas siglas (para auxiliar na compreensão do resumo).....	36
Figura 18. Análise de caminhos para os principais parâmetros medidos, indicando os coeficientes de caminho associados a hipótese I. Abreviações dos sinais dendroclimáticos: temperatura maio prévio: T-5; temperatura junho prévio: T-6; precipitação março prévio: P-3; precipitação junho prévio: P-6; precipitação agosto prévio: P-8. Setas tracejadas indicam sinais sem significância estatística.	37
Figura 19. Resumo esquemático dos sinais climáticos locais significativos no ano prévio ao crescimento da espécie: indicação de sinal climático significativo para incremento de carbono; estação do ano correspondente; e período de dormência de <i>A. angustifolia</i>	41

SUMÁRIO

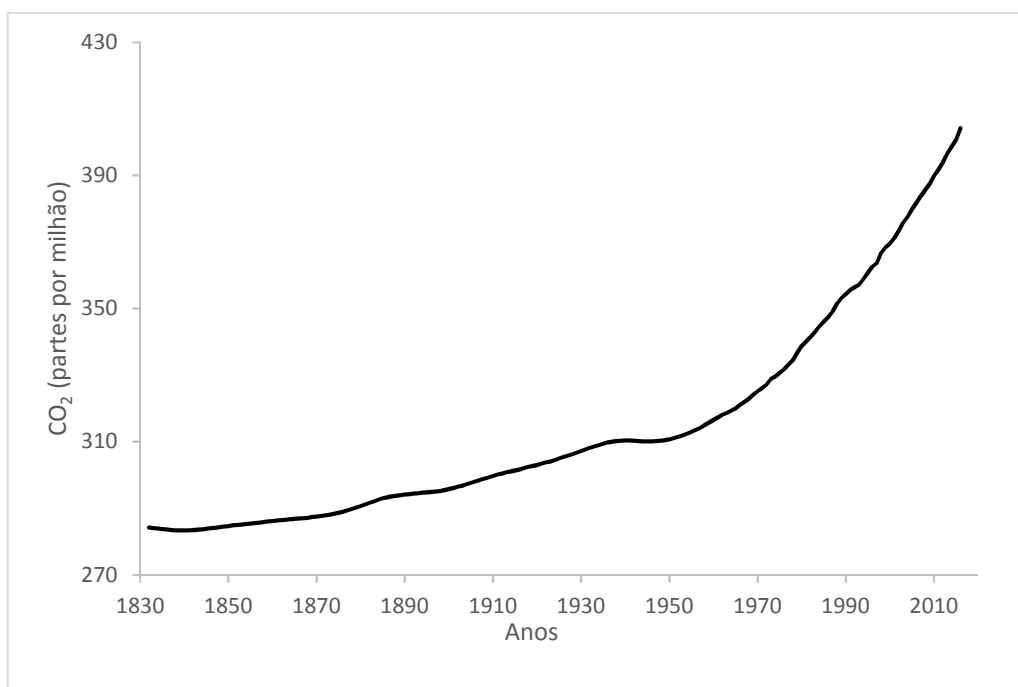
1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	Efeitos da elevação de carbono atmosférico na vegetação	10
1.2.	Estimando séries temporais de fixação de carbono através de dendrocronologia	13
1.3.	Objetivos e hipóteses	14
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.1.	Área de estudo	15
2.2.	Seleção, coleta e preparo de amostras	17
2.3.	Análise dendrocronológica: largura e densidade dos anéis de crescimento.....	20
2.4.	Séries de incremento de carbono	25
2.5.	Cronologia média de carbono.....	26
2.6.	Seleção de variáveis climáticas locais	27
2.7.	Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito.....	28
3.	RESULTADOS	29
3.1.	Codatação das amostras dendrocronológicas e séries de incremento de carbono	29
3.2.	Cronologia média de incremento de carbono e seleção de variáveis climáticas locais	34
3.3.	Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito	36
4.	DISCUSSÃO	39
4.1.	Validando as hipóteses.....	39
4.2.	Codatação das amostras dendrocronológicas e séries de incremento de carbono	39
4.3.	Cronologia média de incremento de carbono e seleção de variáveis climáticas locais	40
4.4.	Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito	42
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

1.1. Efeitos da elevação de carbono atmosférico na vegetação

As emissões contínuas de Gases de Efeito Estufa (GEE) vêm provocando mudanças climáticas e impactos negativos ao planeta (IPCC, 2014). Dentre os impactos, está o aquecimento global, consequência direta do aumento de emissões atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), o principal GEE. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) aponta em seus relatórios que as concentrações de CO₂ atmosféricas elevaram-se de 280 ppm (partes por milhão) - previamente a revolução industrial (década de 1950) - para 379 ppm em meados de 2005 (IPCC, 2007) (Figura 1).

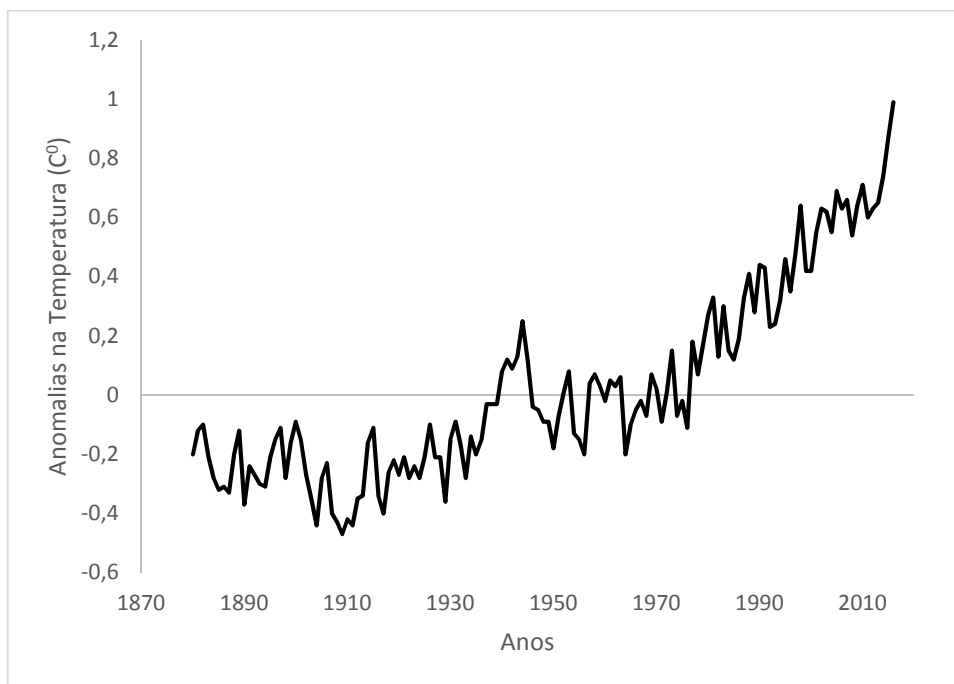
Figura 1. Elevação da concentração atmosférica de CO₂ entre 1832 e 2016.



Fonte: NOAA EARL, 2017.

A influência humana sobre as alterações climáticas advindas do aumento das emissões de GEE é evidente, sendo as emissões atmosféricas antrópicas as mais altas da história. Tanto é verdade que os aumentos dos GEE estão sendo refletidos diretamente em clima e oceanos mais aquecidos, quantidades de neve e gelo diminuídas e nível do mar elevado (IPCC, 2014). O reflexo direto de aumento do CO₂ atmosférico se dá na temperatura global que possui uma tendência de forte aumento a partir da década de 1930 (Figura 2).

Figura 2. Anomalias de temperatura global (terra e oceanos) entre 1880 e 2016.



Fonte: NASA/GISS, 2017.

Previsões climáticas para a América do Sul indicam eventos extremos com excesso ou escassez de chuvas para os próximos anos, bem como aumento de temperaturas (IPCC, 2012). Ademais, fenômenos climáticos de larga escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) podem ser intensificados. Na América do Sul esse fenômeno impacta de forma distinta o regime de chuvas, predominando em anos de El Niño condições secas ao norte, retardamento no início da estação chuvosa ao leste e chuvas acima da média ao sul, e vice-versa em anos de La Niña (MAIER et al., 2016). No Brasil, previsões indicam aumento de precipitação no Sul, períodos alternados de seca e de precipitações intensas no Sudeste, e secas mais intensas no Nordeste e Amazônia (IPCC, 2012). Poderão ainda, ocorrer eventos curtos e extremos relacionadas à precipitação (CERA, FERRAZ, 2015). Tais impactos refletem diretamente na segurança energética, hídrica e alimentar, fragilizando a sustentabilidade econômica e social do país (MARENGO, 2014).

Além de incidirem sobre a sociedade, impactos provenientes do aumento de CO₂ atmosférico também afetam processos ecológicos, como a produtividade primária líquida das florestas. A produtividade primária líquida (PPL) é a quantidade de matéria orgânica sintetizada pelas plantas no processo de fotossíntese, menos as perdas de carbono resultantes da respiração

autotrófica (KALLARACKAL; ROBY, 2012). O histórico da produtividade primária das plantas é refletido em sua biomassa lenhosa, composta por aproximadamente 50% de carbono (VARGAS, ALLEN, ALLEN, 2008).

O aumento de CO₂ atmosférico pode ter um impacto direto e positivo sobre as taxas de produção e de fixação de biomassa vegetal através de um processo de fertilização decorrente do aumento da eficiência intrínseca do uso da água pelas plantas, *ie.*, razão das taxas de assimilação de CO₂ e de perda de água por transpiração (ZISKA; BUNCE, 2008; BATTIPAGLIA et al. 2013). Por outro lado, a elevação de CO₂ pode resultar em efeitos indiretos na produtividade das plantas, através das mudanças climáticas, sendo a existência e o sinal desse efeito (se positivo ou negativo) variável espacialmente, dependendo da sensibilidade das plantas às alterações climáticas que se manifestam numa dada região (YAN, ZHONG, SHANGGUAN, 2017).

Uma metanálise comparando a quantidade de carbono florestal global em dois períodos (1990 a 1999 e 2000 a 2009) encontrou aumento de 17% em florestas temperadas, redução de 23% em florestas tropicais e estabilidade em florestas boreais (PAN et al., 2011). Esse padrão sugere que plantas tropicais estariam mais próximas de seus limites máximos de tolerância à temperatura (CLARK, 2004) ou à seca (PHILLIPS, 2009) do que plantas de regiões mais frias. Para florestas subtropicais, as evidências acerca de como a produtividade primária responde a esses fatores de mudança global ainda são escassos. Então, por tratar-se de uma região de transição climática, tais florestas responderiam de modo mais similar a florestas tropicais ou a florestas temperadas?

No Sudeste da América do Sul, condições mesotérmicas e de precipitação abundante ao longo do ano sustentam florestas subtropicais de elevada diversidade biológica associadas ao bioma Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO et al., 2013). Em regiões montanas essas florestas são formadas por comunidades mista de angiospermas e coníferas (Floresta Ombrófila Mista – FOM), caracterizadas pela ocorrência e dominância de *Araucaria angustifolia* Bertol. O. Kuntze (Leite e Klein, 1990), conífera longeva e de grande porte (SANQUETTA et al., 2014b) que totaliza cerca de dois terços do carbono estocado acima do solo (MOGNON et. al., 2014; ROSENFELD; SOUZA, 2014). Essa espécie forma anéis de crescimento anuais (SEITZ, KANNINEN, 1989; LISI et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2009), o que permite estimar sobre a

variações temporais na sua produtividade para investigar sobre a influência de mudanças globais.

1.2. Estimando séries temporais de fixação de carbono através de dendrocronologia

A madeira ou xilema secundário é o tecido das espécies arbóreas que detém função de sustentação, transformação, armazenamento e condução de água e nutrientes (ESAU, 1985). A anatomia da madeira possui características estruturais, os anéis de crescimento anuais, que permitem a interpretação dos fatores externos influenciando o desenvolvimento das árvores (FRITTS, 1976). Em coníferas, os anéis de crescimento anuais se dividem em lenho inicial e lenho tardio. O lenho inicial é formado no início do período de crescimento, quando a atividade cambial é intensa. Enquanto o lenho tardio forma-se no final do período de crescimento, quando da diminuição da atividade cambial. Suas estruturas se diferem basicamente na espessura das paredes celulares, densidade e tamanho das células (STOKES; SMILES, 1968).

Com base nos anéis de crescimento anuais, constituiu-se a dendrocronologia. Esta ciência possibilita a datação dos anéis de crescimento do lenho das árvores, incluindo a aplicação das informações registradas em sua estrutura para estudos ambientais e históricos (KAENNEL; SCHWEINGRUBER, 1995). A análise dendrocronológica oferece uma chave para o conhecimento das condições ambientais passadas, oportunizando compará-las com as do presente, e assim inferir sobre o futuro (SCHWEINGRUBER, 2007). Dentre as técnicas utilizadas na dendrocronologia citam-se aqui duas: (i) análise dos perfis de densidade do lenho, obtida através da técnica de densitometria de raio X; e (ii) análise dos perfis de largura dos anéis, obtida pela observação anatômica do lenho (SCHWEINGRUBER, et al., 1978; SCHWEINGRUBER, 2007). A técnica de análise dos perfis de densidade do lenho tem sido amplamente utilizada para investigar os impactos do ciclo do carbono e alterações climáticas em diferentes biomas. Porém em muitos casos, são necessárias técnicas adicionais para melhorar a acurácia das estimativas (BABST et al., 2014a; BOURIAUD et al., 2004).

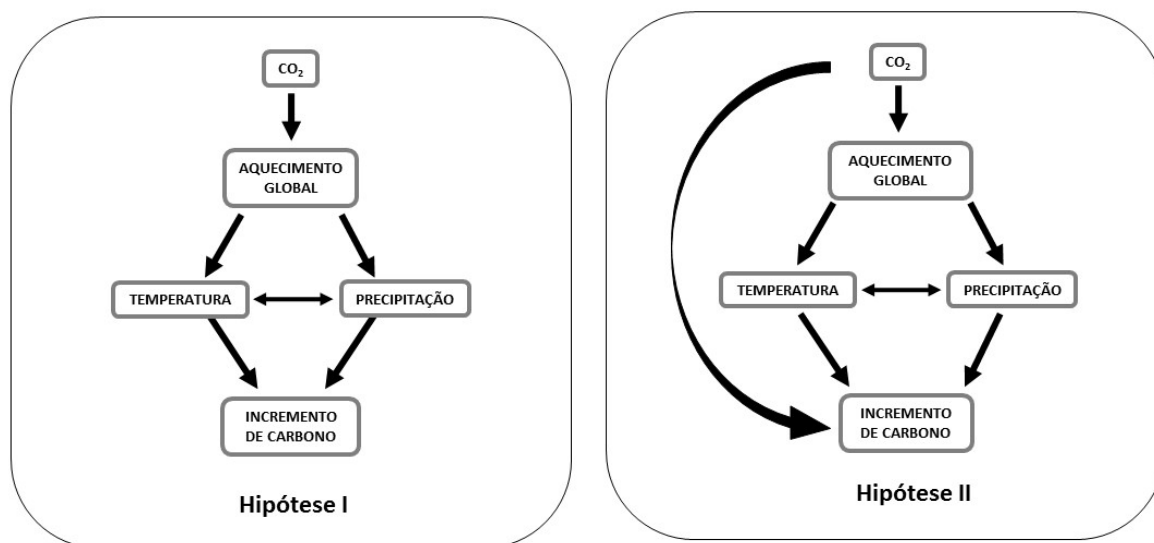
Os anéis de crescimento de *A. angustifolia* são formados entre os meses de primavera (outubro) e outono (maio), relacionados aos ciclos sazonais de fotoperíodo e temperatura (OLIVEIRA et al., 2009). Oliveira, Roig e Pillar (2010) desenvolveram cronologias de largura de anéis de *A. angustifolia* e observaram um sinal de crescimento comum, relacionado com temperatura e precipitação regional. Para as mesmas árvores, Silva e colaboradores (2009) analisaram variações temporais na eficiência intrínseca no uso da água (iEUA), encontrando que esta característica fisiológica tem respondido positivamente à elevação na concentração atmosférica de CO₂. Pesquisadores analisaram, com o uso da técnica de densitometria de raio X, se as larguras dos anéis de crescimento são passíveis de identificação com o uso dos perfis de densidade do lenho para a espécie *A. angustifolia*. O resultado foi positivo e permitiu avaliar a variação entre as densidades mínima, média e máxima; além de obter os valores de densidade média da madeira do pinheiro-brasileiro (WEHR; TOMAZELLO, 2000).

1.3. Objetivos e hipóteses

Considerando que (i) a espécie *A. angustifolia* possui potencial dendrocronológico; (ii) é possível estimar o carbono fixado na madeira com base nos anéis de crescimento das árvores (iii); e (iv) a FOM situa-se na região subtropical da América do Sul onde há carência de estudos relativos aos efeitos do aumento de CO₂ atmosférico e mudanças climáticas sobre a produtividade primária florestal; este estudo tem por objetivo:

Investigar como a elevação da concentração atmosférica de dióxido de carbono no último século e suas conseqüentes alterações climáticas têm afetado a taxa de fixação de carbono de *A. angustifolia*, testando a validade das seguintes hipóteses: (i) o incremento de CO₂ atmosférico afeta a taxa fixação de carbono indiretamente, através do impacto do aquecimento global nos regimes locais de temperatura e precipitação; e (ii) além desse efeito indireto, o incremento de CO₂ afeta diretamente a taxa fixação de carbono através de um mecanismo de fertilização (figura 3).

Figura 3. Modelos causais representando hipóteses alternativas sobre efeitos da elevação de CO₂ atmosférico no incremento de carbono no lenho de *A. angustifolia*.

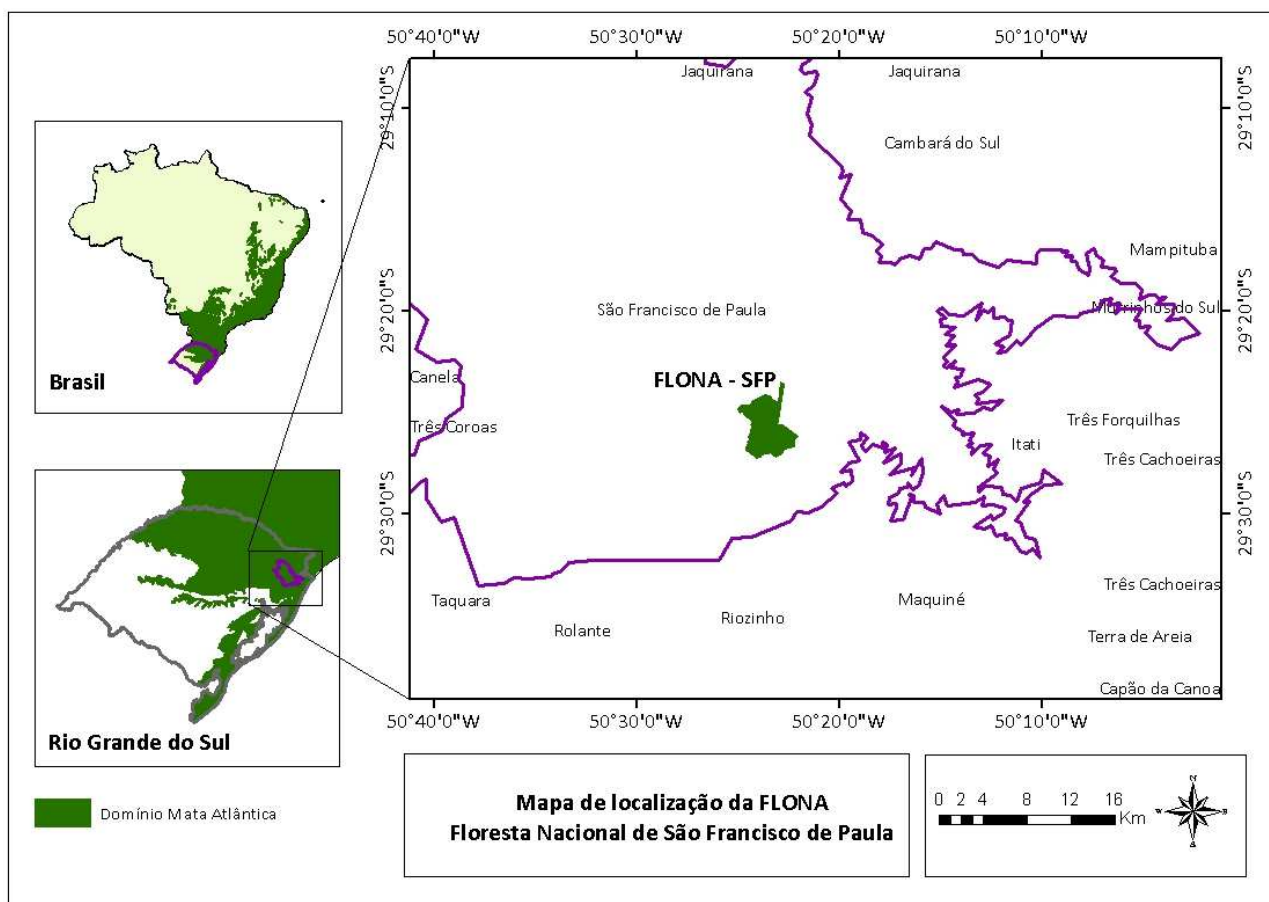


2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se no Município de São Francisco de Paula, sob a coordenada geográfica SIRGAS 2000 29°25'22,4''S; 50°23'11,2''W, no Estado do Rio Grande do Sul. O município abriga a Floresta Nacional de São Francisco de Paula (FLONA – SFP, RS). Administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO), trata-se de uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável. De acordo com a Lei 9.985/2000 (BRASIL, 2000), a Floresta Nacional é uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas.

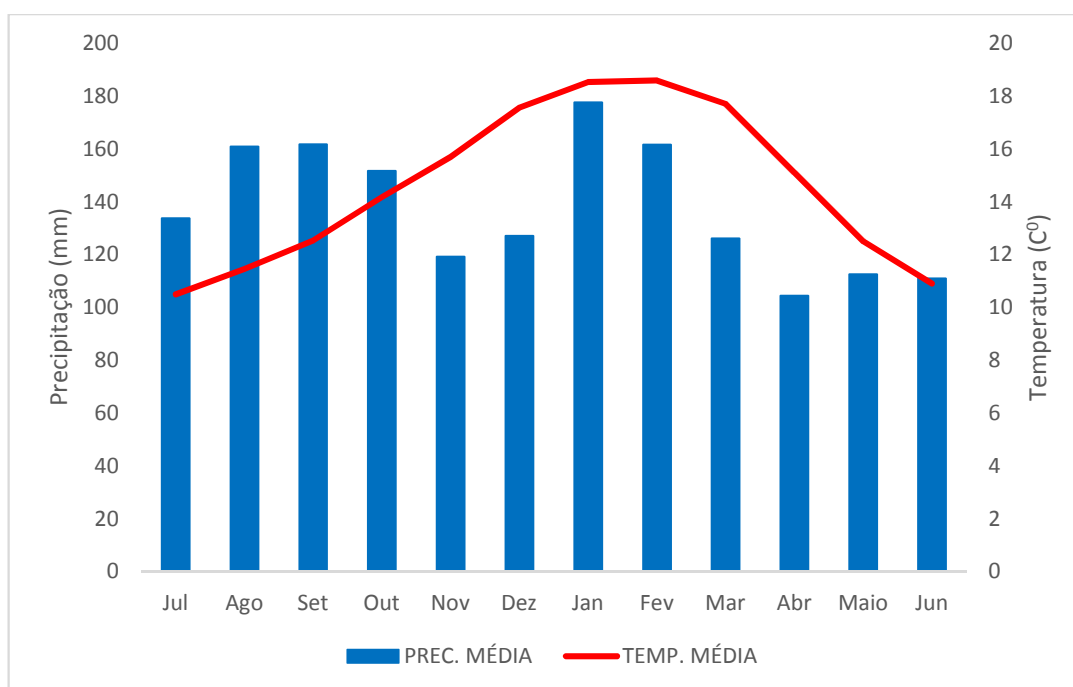
Figura 4. Localização da Flona São Francisco de Paula no domínio Bioma Mata Atlântica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O clima da região é do tipo Cfb no sistema de Köppen, mesotérmico, úmido, com precipitação uniformemente distribuída durante o ano e com verão brando. A região é uma das mais úmidas e frias do Estado do Rio Grande do Sul, com pluviosidade média anual de 2.468 milímetros e temperatura média anual de aproximadamente 18,5° C (MORENO, 1961). Temperaturas negativas podem ocorrer de abril a novembro, geadas são frequentes e nos invernos mais rigorosos ocorre formação de neve (NIMER, 1990; FERNANDES; BACKES, 1998). O solo na região da FLONA-SFP é do tipo Cambissolo Húmico Alumínico típico, com afloramentos rochosos indicando solos rasos (STRECK et al., 2002).

Figura 5. Temperatura e precipitação média na FLONA-SFP entre 1901 e 2008.



Fonte: CRU TS v4.00 para a quadrícula (0.5°x 0.5°) do sítio de estudo.

2.2. Seleção, coleta e preparo de amostras

A área selecionada para a coleta de amostras ocorreu numa área de FOM madura, na porção central da FLONA – SFP (Figura 6). As árvores amostradas estavam distribuídas numa área de aproximadamente 0,33 hectares, com coordenada central SIRGAS 2000 29°25'51.71"S e 50°23'35.22"O. Nesta área foram amostradas 25 árvores adultas de *A. angustifolia* selecionadas com base nos seguintes critérios: árvores que foram amostradas num estudo dendrocronológico prévio (OLIVEIRA, ROIG; PILLAR, 2010) e outras de menor diâmetro, para representar árvores mais jovens que as consideradas naquele estudo. De cada indivíduo registrou-se a coordenada geográfica com receptor GPS, mediu-se a altura total e a circunferência à altura do peito, e obteve-se duas amostras de secções transversais de tronco com uma sonda de Pressler (figura 7) (ROSS; BRASHAW; PELLERIN; 1998; LEDB, 2005). Os orifícios das sondagens foram vedados superficialmente com cera de abelha, a fim de reduzir a chance de infecção por patógenos e artrópodes.

Figura 6. Sítio de estudo. Vista do dossel dominado por *A. angustifolia*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7. Coleta de amostras com sonda de Pressler.



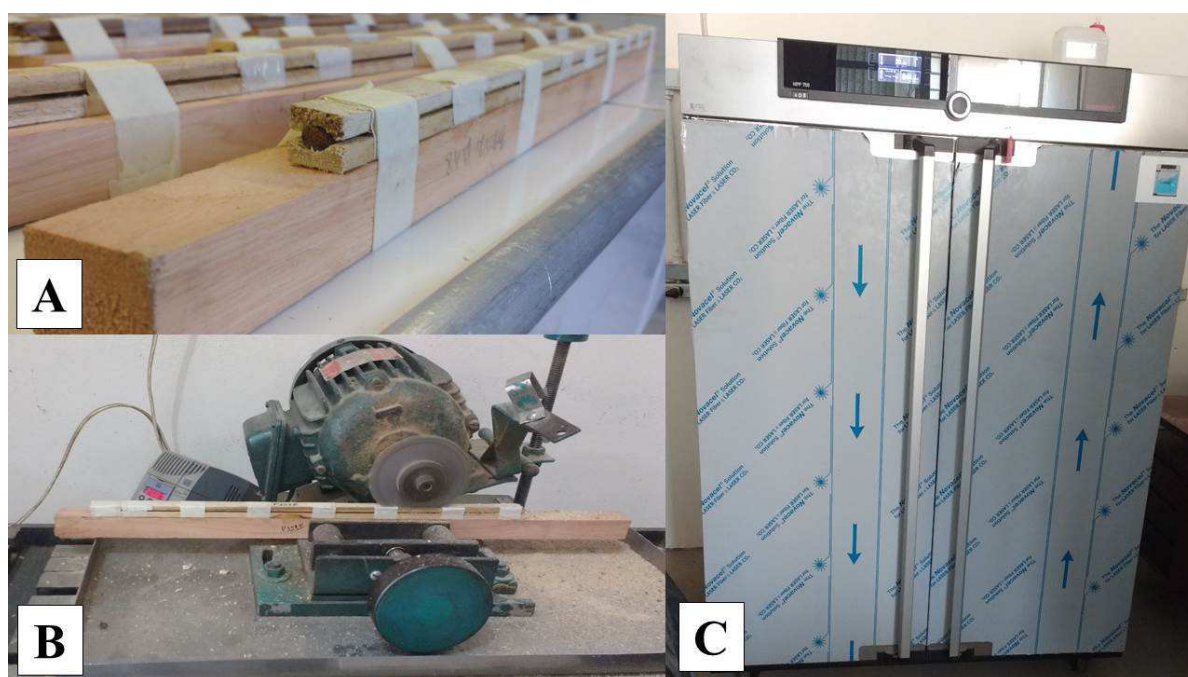
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Descrição dos indivíduos amostrados na FLONA-FSP. A idade estimada provém de estudo dendrocronológico prévio (OLIVEIRA, PILLAR, ROIG, 2010), exceto FSP202 e FSP203, cuja estimativa foi baseada na contagem dos anéis de crescimento estimado pelos perfis de densidade. Diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (H).

CÓDIGO ÁRVORE	DAP (cm)	H (m)	IDADE MÍNIMA ESTIMADA
FSP001	77,1	22,5	137
FSP002	75,3	22,3	149
FSP003	43,3	19,3	106
FSP004	76,8	22,4	147
FSP005	60,5	16,5	107
FSP006	55,5	20,7	135
FSP007	74,3	22,3	146
FSP008	44,2	19,4	127
FSP011	81,3	22,8	136
FSP013	71,3	22,0	129
FSP016	55,6	20,7	74
FSP018	82,5	13,0	120
FSP019	101,9	12,8	126
FSP112	65,9	21,6	131
FSP113	82,8	16,2	123
FSP114	17,9	14,4	44
FSP115	70,3	14,5	101
FSP118	20,6	15,2	50
FSP119	66,8	17,3	115
FSP121	49,4	20,0	129
FSP122	69,7	16,6	107
FSP123	44,9	14,8	117
FSP201	17,0	14,1	34
FSP202	46,5	11,7	87*
FSP203	63,7	15,0	56*

As amostras foram acondicionadas em tubos plásticos identificados com o código do indivíduo, e transportadas para o Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo, Piracicaba (ESALQ/USP). No laboratório, as amostras foram preparadas da seguinte forma: (i) colagem das amostras em suporte duplo de madeira com fibras dispostas no sentido horizontal (figura 8A); (ii) após secagem (12 horas), secção em sentido transversal (1,8 mm de espessura) em equipamento de dupla serra circular (figura 8B); e (iii) armazenamento em câmara de secagem com temperatura 20⁰C, umidade relativa de 65% e por 12 horas (figura 8C).

Figura 8. Preparação das amostras para análise densitométrica. Colagem das amostras (A), corte em serra dupla circular (B) e secagem (C).



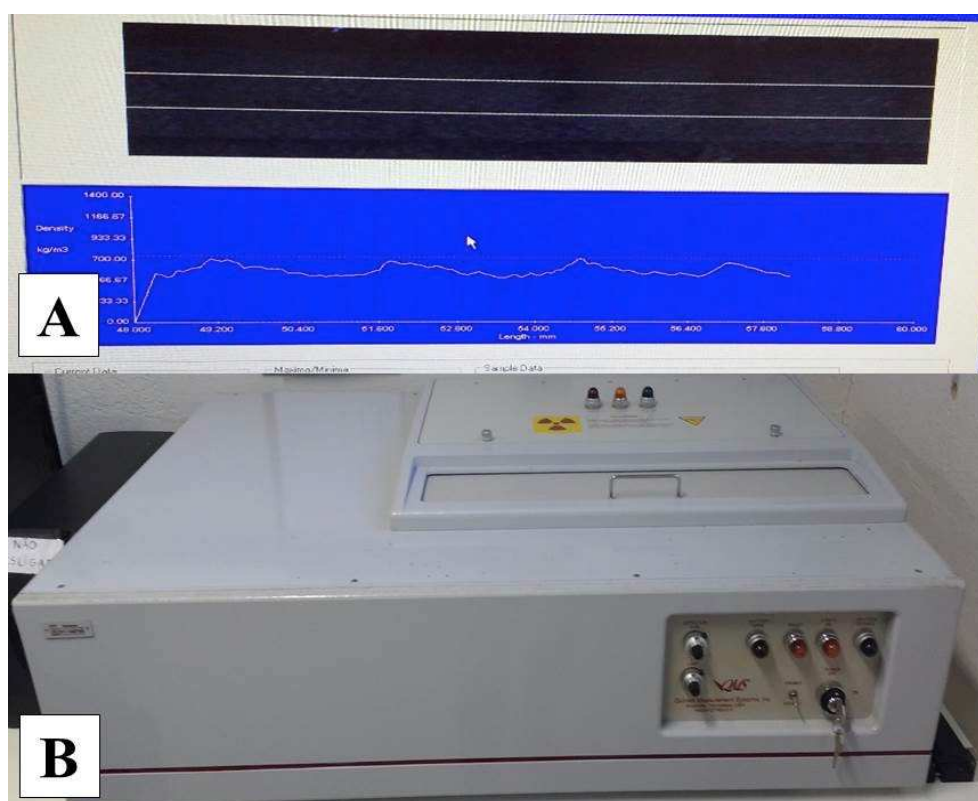
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3. Análise dendrocronológica: largura e densidade dos anéis de crescimento

Após preparação, cada amostra foi encaixada em suporte metálico e transferida para compartimento interno blindado do equipamento de densitometria QMS, modelo Qtrs-01X. Neste equipamento procedeu-se a calibração e varredura radial contínua das amostras por um feixe de raios X colimado com resolução linear de 0,08 milímetros, para estimar a variação

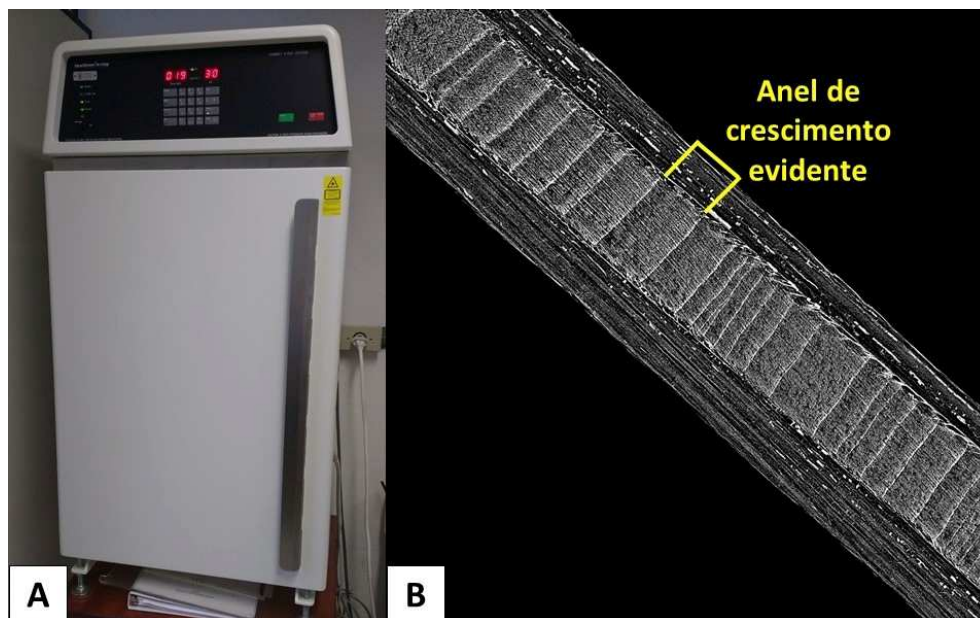
radial de densidade aparente de cada amostra (QMS, 1999; figura 9). As amostras também foram analisadas no equipamento de raios X digital modelo LX-60 FAXITRON, seguindo-se a operação de calibração e de leitura automática (FAXITRON, 2009), para gerar imagens digitais das amostras que pudessem auxiliar na datação dos perfis de densidade obtidos na etapa anterior (Figura 10).

Figura 9. Leitura da densidade aparente do lenho de amostra no equipamento de densitometria QMS. Imagem do perfil de densidade da amostra durante varredura (A); Equipamento de densitometria de raio X (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10. Equipamento de raio X que gera imagens digitais e auxilia na identificação dos anéis de crescimento. Equipamento LX-60 FAXITRON (A); Imagem digital obtida pelo equipamento de raio X (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo passo consistiu na análise dos anéis de crescimento da madeira, sendo para tal, necessária a colagem das mesmas amostras em suporte de madeira, para assim, realizar o polimento, melhorando a visualização dos elementos celulares. O polimento sucedeu com lixas de granulometrias crescentes (Figura 11).

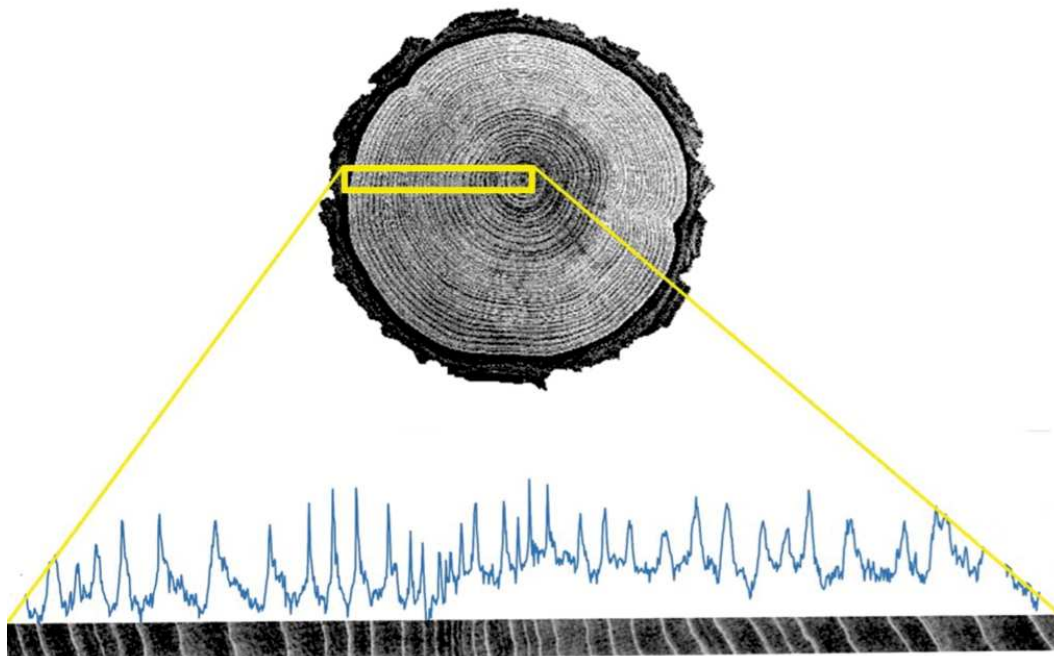
Figura 11. Polimento das amostras após análise densitométrica. Amostras coladas em suporte de madeira (A); Lixadeira (B); Lixas de polimento (C).



Fonte: Elaborado pelo autor.

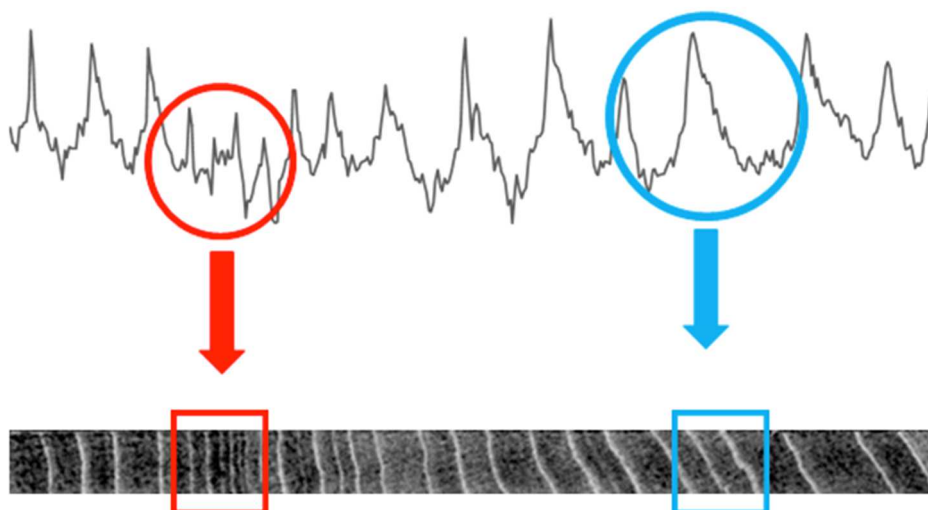
A datação cruzada das amostras (*crossdating*) (STOKES; SMILEY, 1968; HOLMES, 1983), sucedeu com análise das séries de larguras de anéis estimadas com base nos perfis de densidade, a partir da inspeção visual dos próprios perfis, das imagens de raios X e das amostras polidas (Figura 12). Ou seja, o contraste de densidade entre o lenho inicial e o lenho tardio permitem delinear o limite entre anéis de crescimento, e posteriormente estimar suas larguras. As séries de largura de anéis obtidas através dos perfis de densidade foram comparadas com séries de largura obtidas em estudo dendrocronológico anterior, baseado na inspeção anatômica macroscópica (OLIVEIRA, ROIG; PILLAR, 2010) das mesmas árvores (exceto duas; ver tabela 1). Para cada árvore, a datação dos perfis de densidade foi aferida através de Correlações de Person entre as séries de largura de anéis estimadas pelos métodos densitométrico e anatômico (OLIVEIRA, ROIG; PILLAR, 2010), com o auxílio do software COFECHA (HOLMES, 1983). Amostras ou segmentos de amostras que tiveram correlações baixas, sugerindo possíveis erros de datação, não foram consideradas em análises subsequentes. No decorrer da sincronização foram localizados e corrigidos erros ocasionados por variações anatômicas da madeira, como é o caso de anéis falsos (Figura 13).

Figura 12. Ilustração de como a correlação entre identificação anatômica através da largura dos anéis e perfil de densidade é possível: Parte do perfil de densidade do lenho juntamente com a imagem de raio X obtida através do Faxitron.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13. Indicação de variações anatômicas na madeira (em vermelho) e período de desenvolvimento uniforme (em azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4. Séries de incremento de carbono

No ato do trabalho de campo, as árvores foram mensuradas em DAP e altura, sendo considerados os resultados para o último ano de crescimento completo do organismo: o ano de 2015. A cronologia dos anéis de crescimento possibilitou estimar o diâmetro das árvores para cada ano calendário. Cabe salientar aqui, que os valores de casca foram descontados da medição total para que o diâmetro pudesse representar apenas a madeira (xilema secundário).

A variável altura fora obtida através de uma equação hipsométrica ajustada para a área de estudo. O ajuste da equação se deu a partir dos diâmetros a altura do peito de organismos de *A. angustifolia* inventariados na FLONA – SFP com base nos dados do Projeto Ecológico de Longa Duração – PELD/CNPq – “Conservação e Manejo Sustentável de Ecossistemas Florestais – Bioma Araucária e suas Transições”. Utilizamos dados de altura e diâmetro de 1006 indivíduos de *A. angustifolia*. A representação dos indivíduos variou de 2,3 a 143,6 centímetros de DAP e 2,8 a 31,8 metros de altura.

Para a variável diâmetro de cada ano calendário, utilizamos os dados de largura de anel, baseados nos perfis de densidade da madeira para inferir o DAP de cada ano, desde o ano mais externo (próximo a casca) até o último anel conhecido (próximo a medula). Com os valores de DAP e altura, o volume total de madeira de cada ano calendário da árvore foi alcançado com base no modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933).

Com os valores de volume total e densidade média (arranjada por meio da densitometria de raio X) obteve-se a biomassa de cada ano de crescimento das árvores em estudo. Watzlawick et al. (2003) realizaram estudos no município de General Carneiro, Paraná, em povoamento de *A. angustifolia* e, pelo método destrutivo, avaliaram os percentuais de biomassa e teores de carbono em cada porção da árvore. Seus resultados apontaram que 42,5% da biomassa da árvore corresponde a madeira do fuste, dos quais 44,1% representam o teor de carbono da madeira. Assim, o cálculo da estimativa de estoque de carbono do nosso estudo resultou da multiplicação da biomassa estimada pelo teor médio de carbono da espécie objeto de estudo, ou seja, 44,1%.

Seguem equações utilizadas:

- Equação hipsométrica

$$H = 5,5174 \ln (\text{DAP}) - 1,5095$$

$$r^2 = 0,58348$$

- Equação de volume

$$V = \frac{\pi (\text{DAP})^2}{4} \times H \times \text{ff}$$

- Equação de biomassa

$$M = V \times D$$

- Equação de massa de carbono

$$C = M \times 44,1\%$$

Onde:

V= volume (m³)

π = constante 3,14159

DAP = diâmetro a altura do peito (m)

H = altura total (m)

ff = constante 0,7 para *A. angustifolia*

M = biomassa (kg)

D = densidade (kg/m³)

r^2 = ajuste do modelo logarítmico

C = carbono da madeira (kg)

2.5. Cronologia média de carbono

A proposta de uma cronologia média entre os organismos contemplados nesse estudo, visa uma previsão da performance de incremento de carbono para *A. angustifolia*. A eficiência do resultado depende da seleção de modelos e análises complacentes ao caso. A filtragem de tendências ontogenéticas é o primeiro passo, já que esta informação pode induzir resultados tendenciosos de incremento de carbono. Logo, aplicamos um filtro matemático que consistiu em:

- (i) **Agrupar as árvores de acordo com seus padrões ontogéticos de crescimento similares:** gráficos provenientes de incremento de carbono de cada árvore foram utilizados para categorizar os indivíduos de forma visual.
- (ii) **Aplicar o método “Regional Curve Standardization” (RCS):** desenvolvimento de uma relação fixação de carbono-idade entre a média do grupo com cada árvore do mesmo grupo (grupo 01 ou 02). Obtendo assim, índices de incremento de carbono que possibilitam maximizar o sinal comum de crescimento e preservar as

oscilações de baixa frequência nas séries de crescimento (HELAMA, MELVIN, BRIFFA, 2016).

- (iii) **Filtrar a auto correlação das séries cronológicas:** obtidos os índices, estes foram filtrados. A padronização do crescimento foi ajustada através de função autoregressiva das séries de índices incremento de carbono.

Neste processo pretende-se filtrar tendências não climáticas relacionadas com a idade das árvores; permitir que os valores padronizados de árvores individuais, com diferentes taxas anuais de crescimento, sejam calculados juntos a uma função média; e também, corrigir a heterogeneidade da variância dos dados de incremento de carbono, uma vez que o desvio padrão dos índices deixa de ser função da média, como ocorre antes da padronização (Chagas, 2009). Tal método se deu com o emprego do software ARSTAN (COOK; HOLMES, 1984) e resultou na cronologia residual de incremento de carbono.

- (iv) **Calcular o grau de sincronismo:** para quantificar a intensidade do sinal obtido pela cronologia residual, fez-se uso do Sinal Expresso da População (EPS). Tal sinal permite quantificar, através da divisão do sinal da cronologia média pelo hipotético sinal da cronologia perfeita, quanto da variância da cronologia ainda é afetada pelo ruído residual. Sugerem-se valores de $EPS > 0,85$ para estudos de reconstruções dendroclimáticas (LÓPEZ e VILLALBA, 2011).

2.6. Seleção de variáveis climáticas locais

Quanto aos sinais climáticos locais, nós investigamos os mesmos nas séries de incremento de carbono anual de *A. angustifolia*. As variáveis climáticas foram a temperatura média e a precipitação total estimadas mensalmente entre 1901 e 2008 para a quadrícula ($0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$) que representa o sítio em estudo (CRU TS v4,00; HARRIS et al., 2014).

Para examinar as relações entre clima e carbono utilizamos a cronologia residual como variável resposta nas funções de correlação (correlação de Pearson). As séries residuais de

incremento de carbono foram correlacionadas com cada uma das variáveis mensais, sendo combinadas com a estação de crescimento prévia e a estação de crescimento corrente.

Os meses que obtiveram significância com relação a fixação de carbono foram selecionadas como variáveis climáticas locais. A significância das correlações foi avaliada através de Testes de Aleatorização, considerando um limiar considerando intervalos de confiança de 95%, com auxílio do pacote BootRes – na plataforma R (ZANG; BIONDI; 2013).

2.7. Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito

Para testarmos a influência direta e indireta de CO₂ sobre a fixação de carbono, utilizamos a Análise de Caminhos (*Path Analysis*). Para tal selecionamos as variáveis operacionais a serem testadas.

A análise de caminhos é uma técnica que envolve as relações complexas e dinâmicas de causa-efeito. A proposta desta análise está em explicar os processos ecológicos através de um padrão geral de covariância de um conjunto de variáveis contínuas. Logo, cada modelo testado (ver figura 03) representa as relações causais entre as variáveis abordadas e a força de cada variável empregada (GOTELLI; ELLISON, 2011). As variáveis testadas estão descritas na tabela a seguir e foram estatisticamente analisadas pelo software Multiv.

Tabela 2. Descrição das variáveis teóricas e operacionais utilizadas no modelo.

VARIÁVEL TÉORICA	VARIÁVEL OPERACIONAL	FONTES
CO₂	Séries históricas de CO ₂ atmosférico	National Oceanic and Atmospheric Administration's Earth System Research Laboratory (NOAA ESRL) e Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), a partir das estações situadas no Havaí (dados atmosféricos a partir de 1958) e na Antártica (dados “Law dome” de 1901 a 1978).
AQUECIMENTO GLOBAL	Séries históricas de anomalia de temperatura global	Dados CRUTEM4.
CLIMA LOCAL	Séries históricas de temperatura média na região Séries históricas de pluviosidade total na região	CRU TS v4.00 para a quadrícula (0.5°x 0.5°) do sítio de estudo.
PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA	Série média residual de incremento de carbono	Esse estudo.

3. RESULTADOS

3.1. Codatação das amostras dendrocronológicas e séries de incremento de carbono

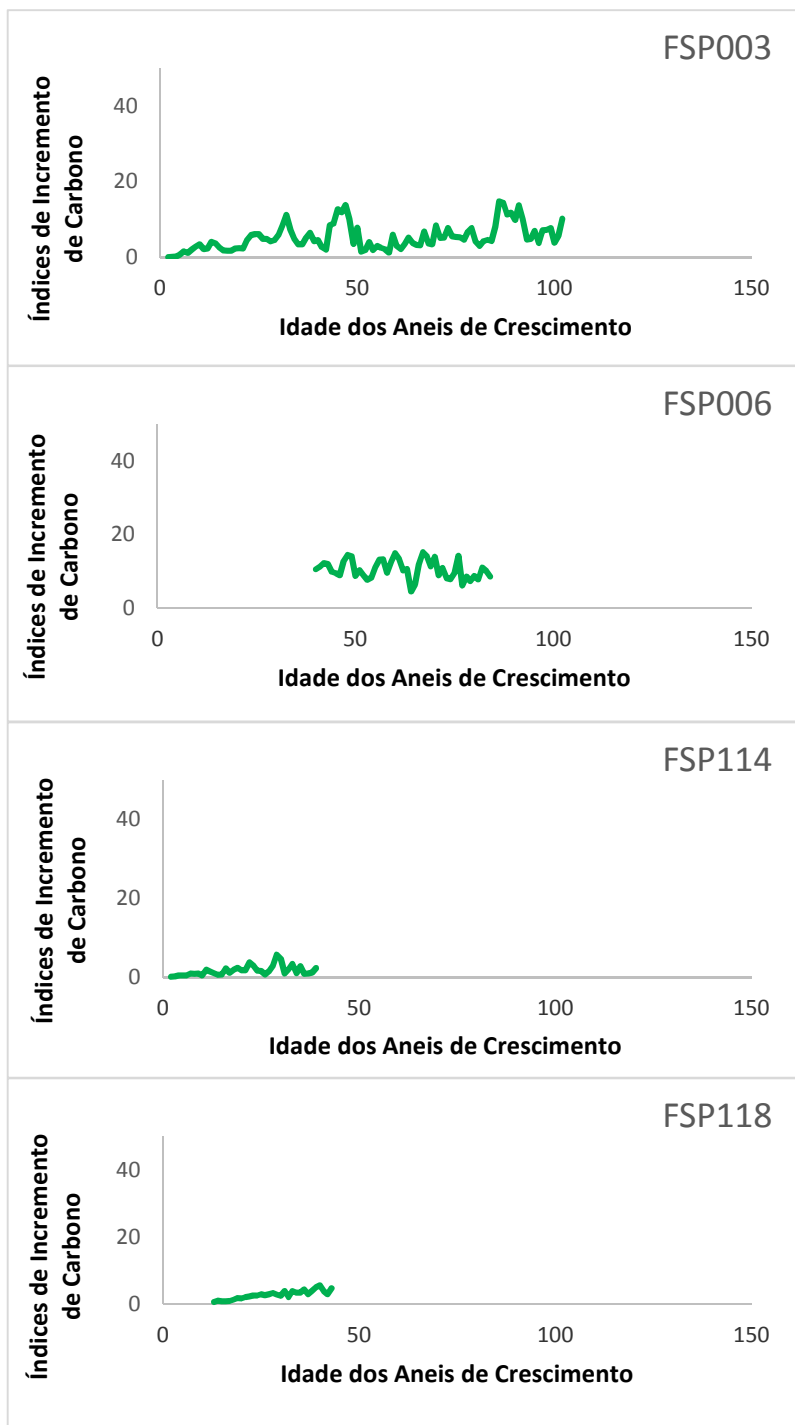
Das 25 árvores selecionadas para estudo, apenas 14 apresentaram amostras dendrocronológicas sincrônicas entre as séries de largura de anel estimadas pelas técnicas de densidade e de anatomia do lenho (a partir das amostras e datações de OLIVEIRA, ROIG; PILLAR, 2010). Para essas árvores a extensão média das séries foi de 70 anos (DP = 30 anos), e o valor médio das correlações $r = 0,4$ (DP = 0,13) (Tabela 3). Os gráficos de estimativa de incremento de carbono de cada um dos 14 organismos incluídos na pesquisa, resultaram em dois grupos distintos. Os grupos 01 e 02 indicam os padrões ontogênicos de cada árvore, ou seja,

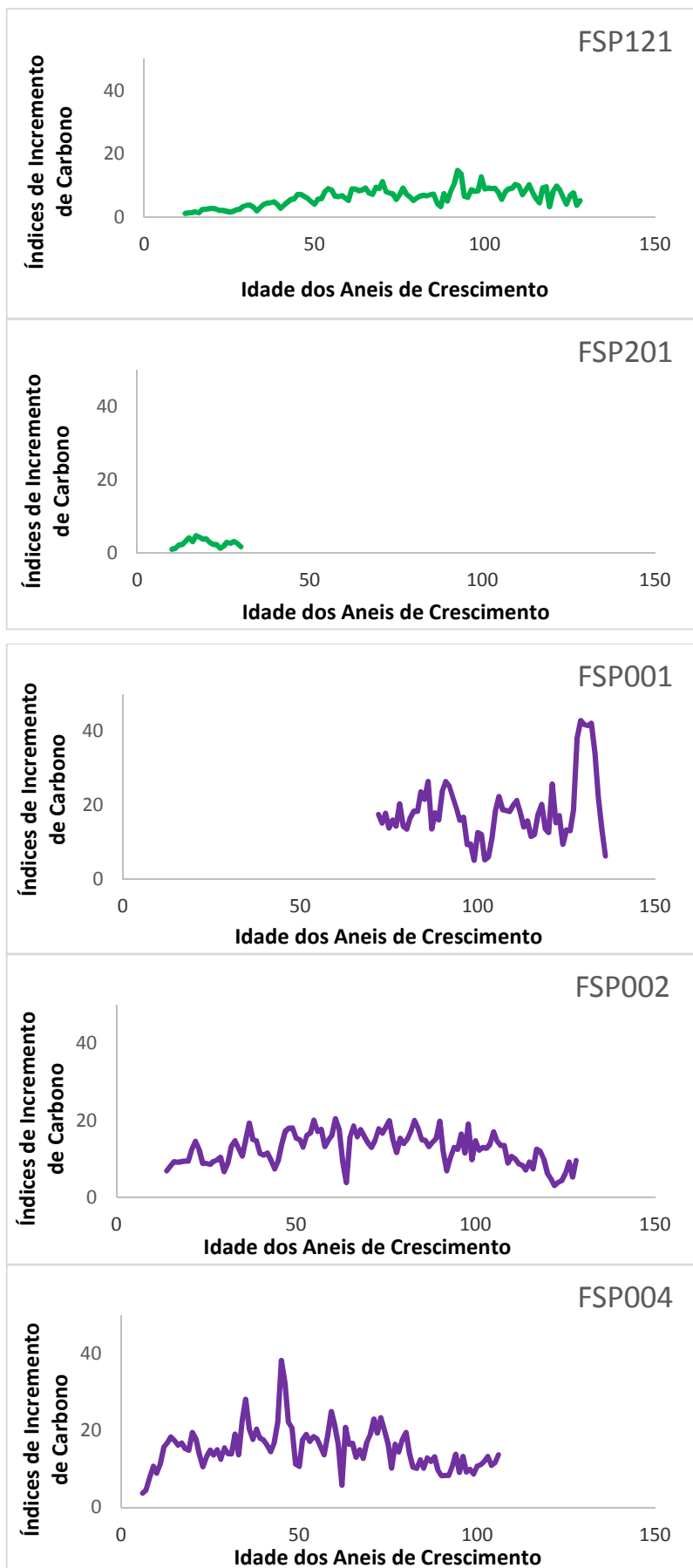
árvores com menores índices de incremento de carbono (grupo 01) e árvores com índices mais elevados (grupo 02). Os gráficos a seguir ilustram os agrupamentos 01 (árvores 03, 06, 114, 118, 121 e 201) em verde e 02 (árvores 01, 02, 04, 07, 11, 13, 16, 112) em lilás.

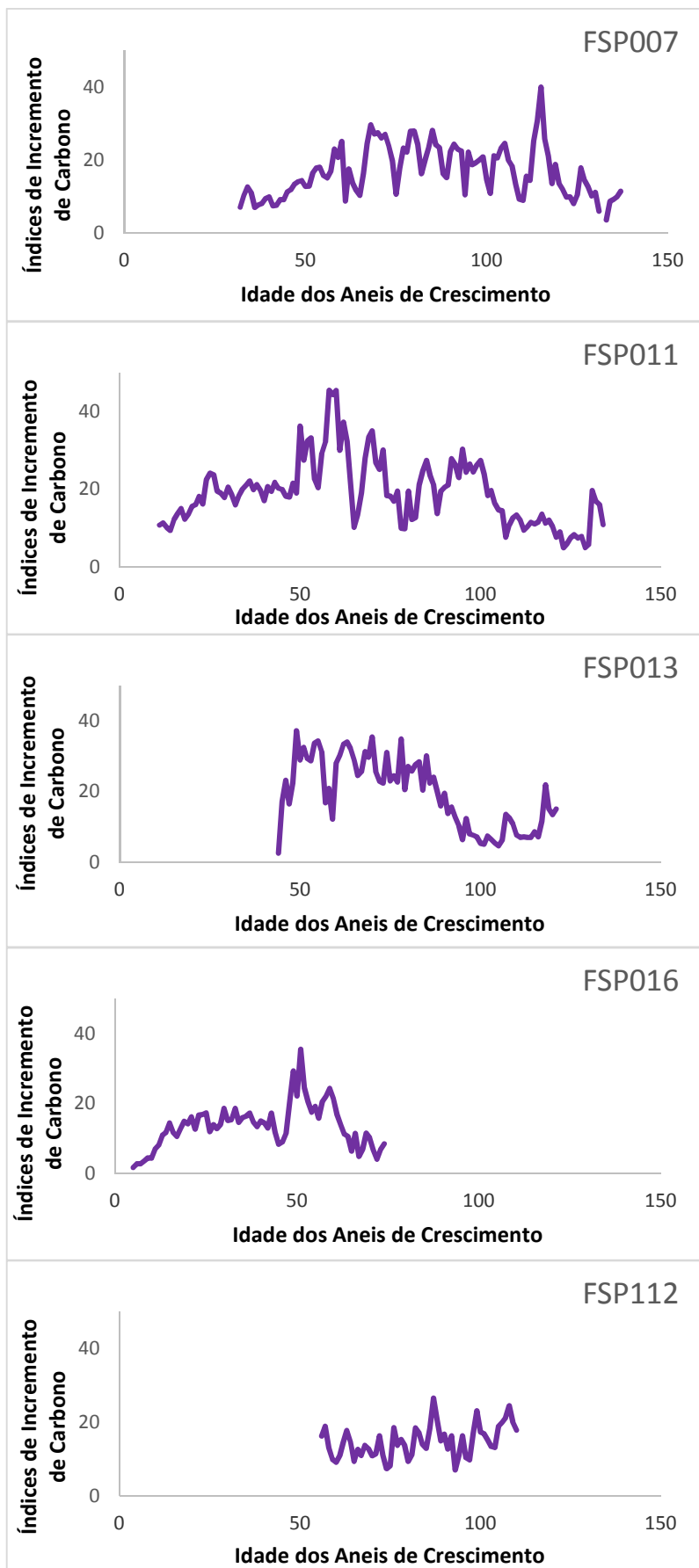
Tabela 3 Sumário das amostras dendrocronológicas codatadas. Para cada árvore é apresentado o período codatado (comprimento, ano calendário inicial e final, idade cambial inicial e final), a correlação (Pearson) entre séries de índices de largura de anéis, estimadas pelos métodos anatômico (OLIVEIRA et al. 2010) e densitométrico (este estudo).

Árvore	Período codatado			Correlação
	Comprimento	Ano calendário	Idade cambial	
FSP001	59 anéis	1950-2008	72-130	0,46
FSP002	94 anéis	1901-1994	35-128	0,66
FSP003	98 anéis	1911-2008	2-99	0,50
FSP004	74 anéis	1901-1974	33-106	0,65
FSP006	45 anéis	1920-1964	40-84	0,31
FSP007	106 anéis	1901-2006	32-137	0,49
FSP011	108 anéis	1901-2008	22-129	0,69
FSP013	78 anéis	1930-2007	44-121	0,29
FSP016	63 anéis	1946-2008	5-67	0,49
FSP112	55 anéis	1940-1994	56-110	0,30
FSP114	36 anéis	1973-2008	2-37	0,51
FSP118	31 anéis	1978-2008	13-43	0,54
FSP121	108 anéis	1901-2008	15-122	0,49
FSP201	18 anéis	1991-2008	10-27	0,45

Figura 14. Estimativas de incremento de carbono em função da idade cambial em 14 árvores de *A. angustifolia*, baseados em séries codatadas de largura e densidade média de anéis de crescimento. As cores (verdes ou lilás) representam árvores com índices de incremento de carbono distintos: grupos 01 (índices mais baixos) e 02 (índices mais elevados).





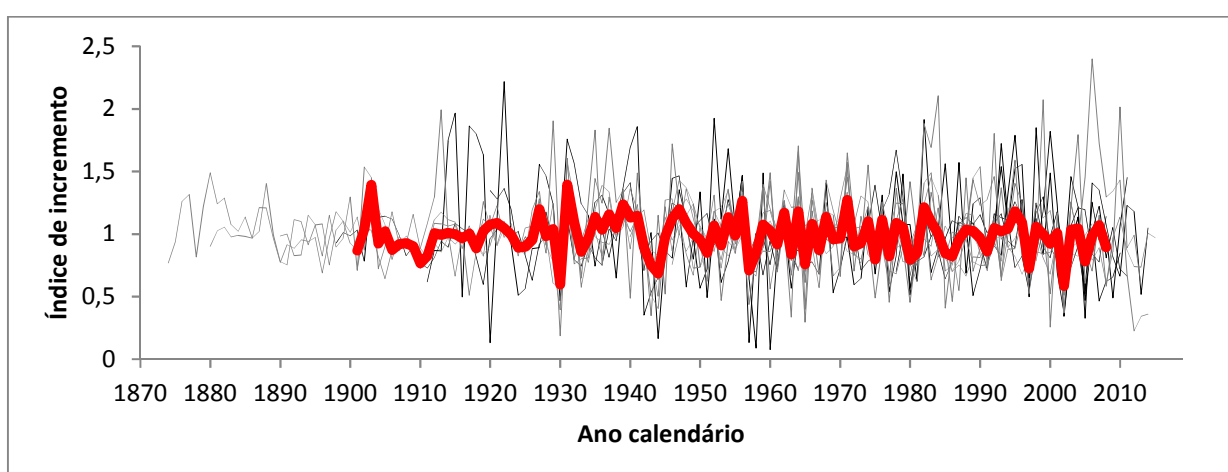


Com relação aos valores estimados para a espécie *A. angustifolia*, obtivemos: incremento radial médio de 2,44 mm por ano (DP 1,33); incremento volumétrico médio de 0,04 m³/ano (DP 0,02); incremento de carbono médio de 11,40 kg/ano (DP 4,71); densidade média de 0,613 g/cm³ (DP 42,29); além de densidades máxima e mínima de 0,792 g/cm³ e 0,423 g/cm³ respectivamente.

3.2. Cronologia média de incremento de carbono e seleção de variáveis climáticas locais

A cronologia residual de incremento de carbono gerada a partir das séries codatadas de 14 árvores, cobriu um período que se estende de 1890 a 2014, com variações temporais de r_{bar} entre 0,24 e 0,31, e de EPS entre 0,72 e 0,82 (Figura 15) e médias de $r_{bar} = 0,27$ e $EPS = 0,77$. Entretanto, o período entre 1890-1900 representa apenas 3 árvores e o período de 2009-2014 apenas 4 árvores, assim selecionamos o período de maior representatividade das séries estabelecido entre 1901-2008. Além do que, esse período de 108 anos concorda com o período onde dados climáticos regionais são conhecidos.

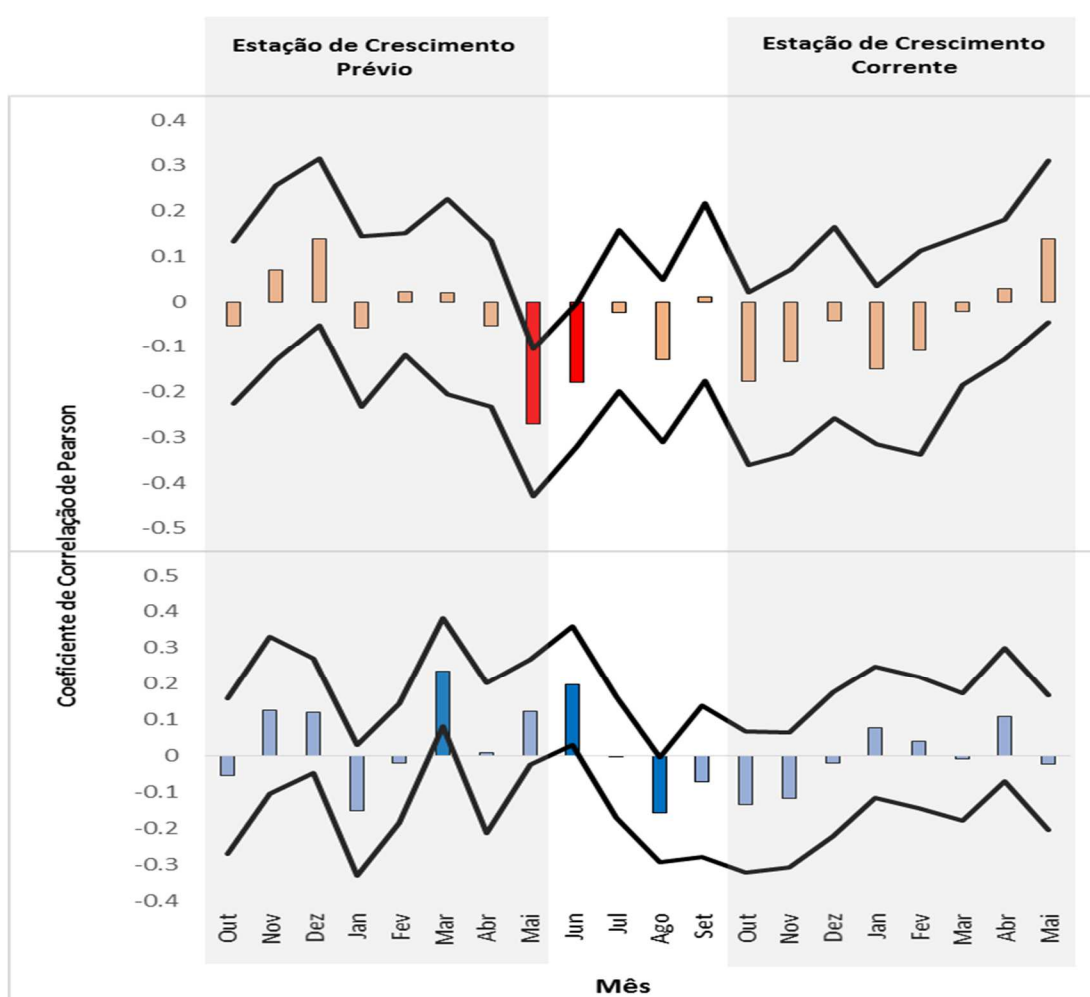
Figura 15. Cronologia residual de 14 árvores de *A. angustifolia* a partir do incremento de carbono anual. O gráfico apresenta três cores de séries: preto, árvores do grupo 1; cinza, árvores do grupo 2; e vermelho, a média de todas as árvores (cronologia usada nos modelos).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sinais dendroclimáticos demonstraram respostas de incremento de carbono negativos para temperatura de maio ($r=-0,27$) e junho prévios ($r=-0,18$). Já para precipitação os sinais foram positivos para março ($r=0,23$) e junho ($r=0,20$) prévios e negativo para agosto prévio ($r=-0,16$).

Figura 16. Perfis de correlação entre as séries climáticas e a cronologia residual de incremento de carbono de árvores de *A. angustifolia*. Influências de temperatura (em vermelho) e de precipitação (em azul) na estação de crescimento prévia e na estação de crescimento corrente de crescimento das árvores. Em destaque os meses cujo coeficiente foi diferente de zero num intervalo de confiança de 95% (séries em preto).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito

Segundo a Análise de Caminhos, tanto a hipótese I ($Fisher C = 9,25$, $gl = 10$, $P = 0,508$) quanto a hipótese II ($Fisher C = 7,43$, $gl = 6$, $P = 0,282$) foram aceitas como plausíveis, isto é, não foram rejeitadas e as relações de independência implicadas pelos modelos foram consideradas verdadeiras. Devido ao maior de p -valor do modelo 01, esse foi considerado como explicação mais cabível das relações avaliadas (Figura 17).

Neste modelo (Figura 18), o incremento de carbono de *A. angustifolia* foi fracamente determinado por condições climáticas ($u = 0,19$), respondendo positivamente às precipitações de março ($\beta = 0,20$; $P = 0,045$) e junho ($\beta = 0,24$; $P = 0,015$) prévios, e negativamente à temperatura de maio prévio ($\beta = -0,23$; $P = 0,029$). Dentre essas variáveis climáticas, somente a temperatura de maio demonstrou ser afetada pelo aquecimento global ($\beta = 0,20$; $P = 0,037$), que por sua vez foi fortemente influenciado pelo incremento de CO_2 ($\beta = 0,90$; $P = 0,001$).

Figura 17. Hipótese 1 aceita no estudo. No esquema abaixo estão a hipótese aceita e suas siglas (para auxiliar na compreensão do resumo).

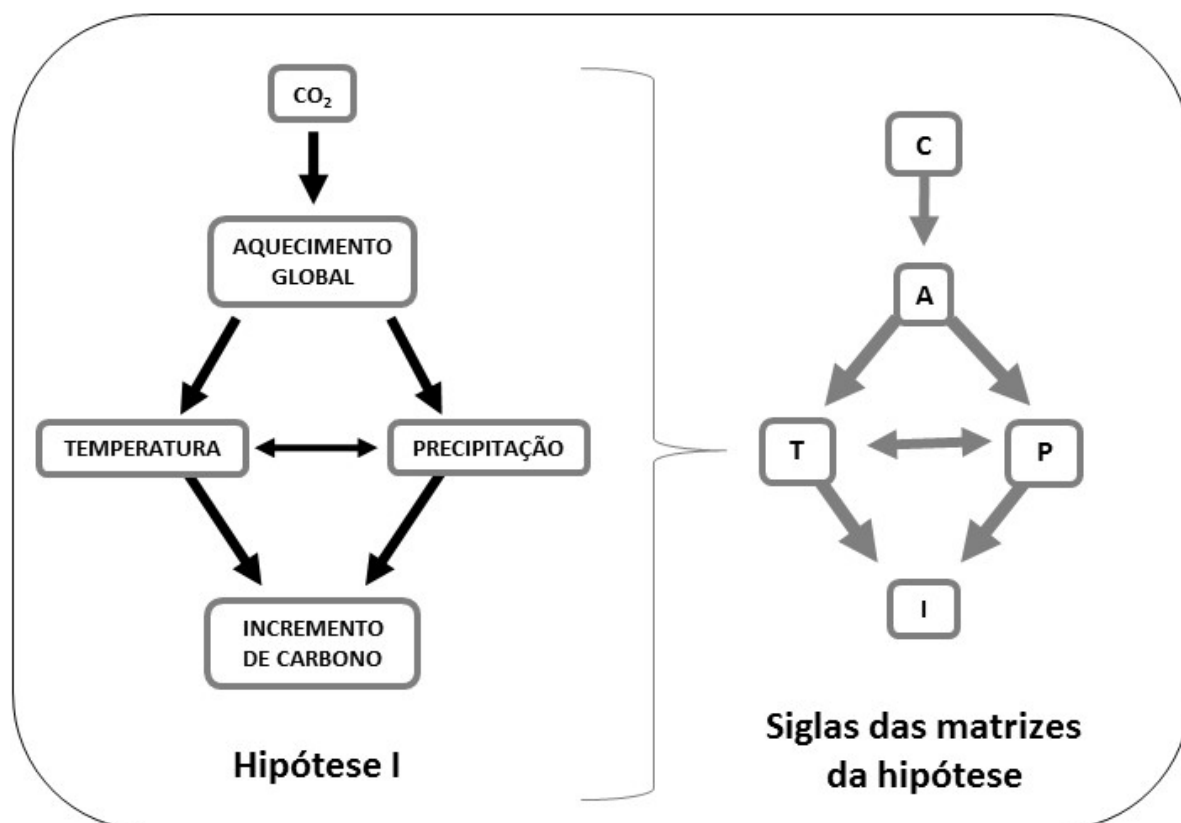
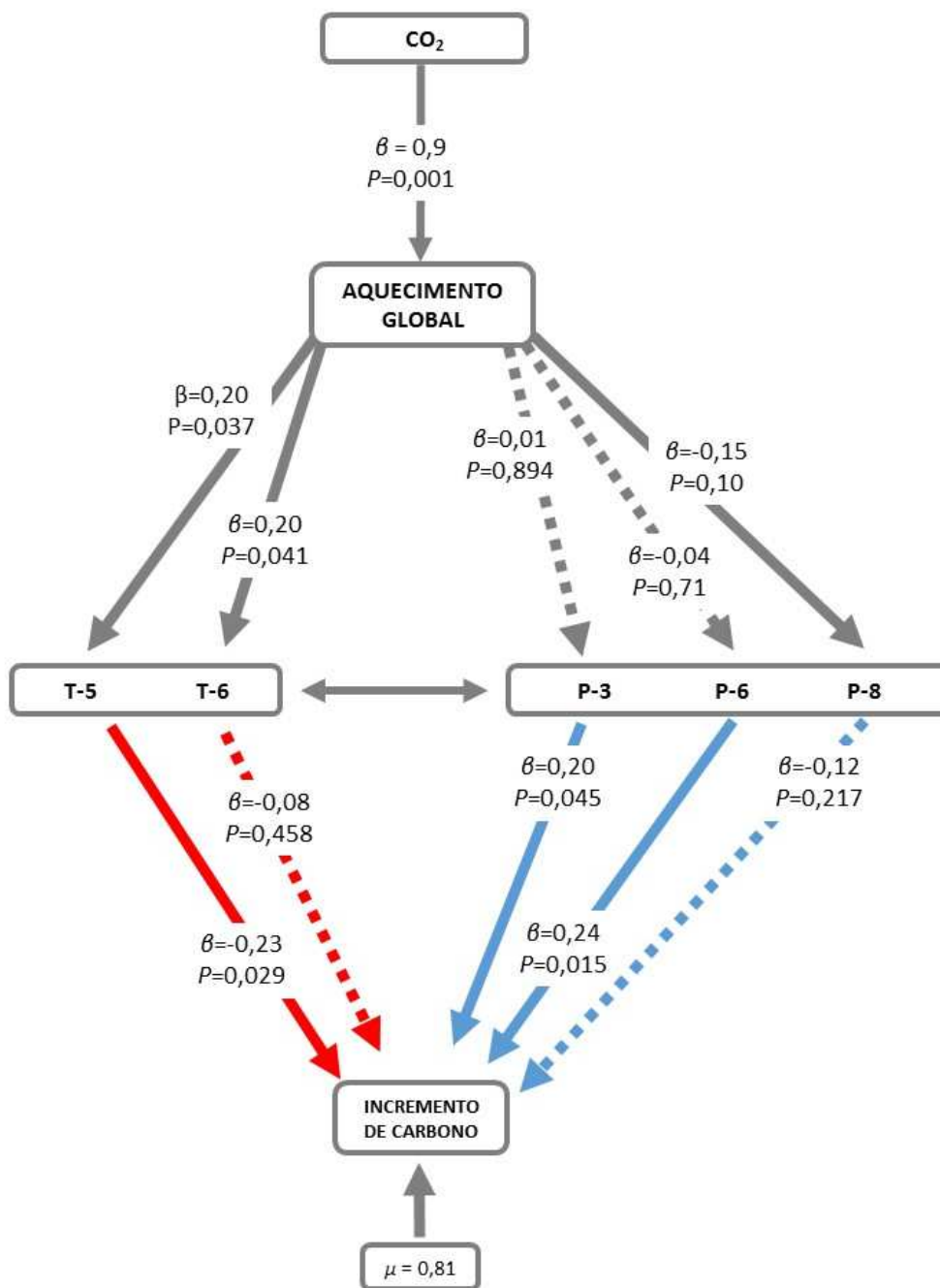


Figura 18. Análise de caminhos para os principais parâmetros medidos, indicando os coeficientes de caminho associados a hipótese I. Abreviações dos sinais dendroclimáticos: temperatura maio prévio: T-5; temperatura junho prévio: T-6; precipitação março prévio: P-3;

recipitação junho prévio: P-6; precipitação agosto prévio: P-8. Setas tracejadas indicam sinais sem significância estatística.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. DISCUSSÃO

4.1. Validando as hipóteses

As hipóteses propostas para responder o objetivo do presente estudo foram aceitas. Sendo a hipótese I mais cabível para explicar como a elevação da concentração atmosférica de dióxido de carbono no último século e suas conseqüentes alterações climáticas têm afetado a taxa de fixação de carbono de *A. angustifolia*. Indiretamente o incremento de CO₂ atmosférico afeta a taxa fixação de carbono, através do impacto do aquecimento global nos regimes locais de temperatura e precipitação; onde o mês de maio do ano anterior responde negativamente a temperatura local. Apesar do efeito indireto do CO₂ afetar a espécie *A. angustifolia* na FOM, 81% ainda permanecem desconhecidos.

4.2. Codatação das amostras dendrocronológicas e séries de incremento de carbono

A correlação obtida entre as técnicas de densitometria de raio X e análise anatômica da largura dos anéis resultou em um elevado grau de sincronismo entre métodos (mínima de $r = 0,29$ e máxima de $r = 0,69$). Nosso estudo revelou que a correlação entre as duas técnicas é significativa e permite a obtenção de dados complementares para a espécie, tais como volume, densidade, biomassa e conseqüentemente carbono estocado em cada ano calendário dos espécimes. O uso de métodos distintos para determinar anéis de crescimento de árvores, já fora testado por outros autores (BOURIAND, et al., 2004; ANDRADE, et al., 2017), entretanto nunca para a espécie *A. angustifolia* sobre um mesmo sítio. A possibilidade de utilizar métodos distintos para a formação de cronologia de lenho de árvores, sugere que outras espécies igualmente possam ser objeto de pesquisa dendrocronológica e suas respectivas áreas de aplicação (BABST, et al., 2014b), além de reforçar a eficiência do método adotado.

Além disso, o uso de árvores do mesmo sítio com idades distintas permitiu que as tendências ontogenéticas fossem facilmente observadas. Assim, efeitos internos do indivíduo puderam ser filtrados. Bouriaud e colaboradores (2004) testaram os mesmos métodos para *Fagus sylvatica* (Faia) na França com árvores entre 60 e 70 anos calendários (anéis). Os autores apontam como principal falha para o estudo, a não utilização de árvores com idades variadas. A angiosperma *F. sylvatica* mostrou-se menos variável ao longo do tempo para o método que envolve os perfis de densidade do lenho, do que pela análise anatômica da largura dos anéis. Os agrupamentos 01 e 02 apresentados no nosso estudo indicaram fortes tendências

ontogenéticas relacionadas a idade para a espécie *A. angustifolia*. Logo, o uso de organismos arbóreos de idades variadas nos permitiu resultados mais confiáveis.

Ao utilizar o método de densitometria de raio X para desenvolver o presente estudo em organismos de *A. angustifolia*, conseguimos obter resultados pioneiros com relação ao incremento anual de carbono da madeira da referida espécie. Estudos pretéritos obtiveram dados relativos a densidade do lenho (ROLIM; FERREIRA, 1974; WEHR, TOMAZELLO FILHO, 2000; MATTOS, et al., 2006) e a estimativa de carbono total da espécie (SANQUETTA, et al., 2014a). Nossos resultados fornecem informações relevantes acerca do crescimento anual da espécie e seu potencial ganho de biomassa em cada anel de crescimento. Os resultados de densidade do lenho de *A. angustifolia* com máxima de 0,792 g/cm³; mínima de 0,423 g/cm³ e média de 0,613 g/cm³ corroboram (ao considerar a idade calendário) com os resultados obtidos por outros autores. A saber: indivíduos com cerca de 38 aneis de idade - densidade média da madeira de 0,425g/cm³ (MATTOS, et al., 2006); indivíduos com cerca de 29 aneis de idade - densidade média da madeira varia entre 0,40-0,60 g/cm³ (WEHR; TOMAZELLO FILHO, 2000); e indivíduos com cerca de 15 aneis de idade - densidade média da madeira varia entre 0,37-0,52 g/cm³ (ROLIM; FERREIRA, 1974). Assim, além dos objetivos citados no estudo, nosso trabalho colabora com a informação de densidade da madeira para organismos jovens, intermediários e senis de *A. angustifolia*.

4.3. Cronologia média de incremento de carbono e seleção de variáveis climáticas locais

Os valores de r_{bar} (entre $r=0,24$ e $r=0,31$) conseguidos na cronologia de incremento de carbono são semelhantes aos resultados da cronologia de largura de aneis de *A. angustifolia* das mesmas árvores de estudo anterior - $r_{bar} = 0,25$ (OLIVEIRA, ROING e PILLAR, 2010). Para a espécie *Araucaria araucana* os resultados igualmente se aproximam - $r_{bar} = 0.188-0.328$ (MUNDO et al., 2012). Com relação ao EPS ($r=0,77$), apesar desse valor médio estar abaixo do indicado pela bibliografia ($r=0,85$) (WIGLEY; BRIFFA; JONES, 1984), seus valores oscilam entre $r=0,72$ e $r=0,82$ temporalmente, chegando a resultados muito próximos ao esperado. Além disso, Buras (2017), publicou discussões a respeito da interpretação do EPS. Segundo ele, o EPS não indica necessariamente se uma cronologia de árvores é adequada para fins de reconstrução climática, e sim ajuda a identificar períodos de reconstrução com baixo poder preditivo (baixo, porém não menos relevante).

Ao analisarmos os resultados dendroclimáticos de temperatura, verificamos que um outono (maio e junho) menos quente resulta em um aumento no incremento de carbono para *A. angustifolia* no ano seguinte. Assim como um outono prévio mais quente diminui o incremento de carbono. Para precipitação, um verão (março) e um outono (junho) mais chuvosos aumentam o incremento de carbono da planta no ano seguinte. E um inverno (agosto) menos chuvoso favorece o incremento de carbono no ano seguinte de crescimento da espécie (Figura 19).

Figura 19. Resumo esquemático dos sinais climáticos locais significativos no ano prévio ao crescimento da espécie: indicação de sinal climático significativo para incremento de carbono; estação do ano correspondente; e período de dormência de *A. angustifolia*.

Estação do Ano/Meses		Resposta negativa para <i>A. angustifolia</i> (Diminui o incremento de carbono)	
		Temperatura Prévia	Precipitação Prévia
PERÍODO DE DORMÊNCIA	VERÃO	jan	
		fev	
		mar	MENOS CHUVA
	OUTONO	abr	
		mai	MAIS QUENTE
		jun	MAIS QUENTE MENOS CHUVA
	INVERNO	jul	
		ago	MAIS CHUVA
		set	
	PRIMAVERA	out	
		nov	
		dez	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Acreditamos que a diminuição da temperatura no período de aclimação e entrada efetiva da dormência da espécie faz com que a mesma antecipe a interrupção da fase ativa. Ou mesmo, que o período mais frio crie uma parada abrupta do período de crescimento fazendo com que se inicie a fase de dormência sem o período de aclimação (ecodormência). Rohde e Bhalerao (2007) descrevem que possíveis evidências relacionadas com a ecodormência, como fotoperíodo, frio ou seca refletem em alterações (positivas ou negativas) no crescimento do ano seguinte. Para a espécie e sítio em questão, o sinal seria positivo.

A resposta obtida para temperatura de maio prévio corrobora com OLIVEIRA; ROING e PILLAR (2010), os quais sugerem que a temperatura do ano anterior determina o armazenamento de carboidratos na madeira para o ano de crescimento seguinte. Portanto, temperaturas mais elevadas antes da entrada do período de dormência no ano anterior diminuem o período de aclimação no inverno e assim a planta cresce menos. Schweingruber em 1996 afirmou que a temperatura é o principal fator regulador e limitante no crescimento das espécies arbóreas. Assim, mais uma vez, esse fato fora confirmado para a espécie *A. angustifolia* (esse estudo; SILVA et al., 2009; OLIVEIRA, ROING e PILLAR, 2010; ALBIERO JÚNIOR, 2014).

Mundo e colaboradores (2012) evidenciaram que a espécie *A. Araucana* está crescendo menos desde meados de 1970. Os dendroecólogos atribuíram evidências relacionadas ao aumento de temperaturas e diminuição das chuvas ao fato no norte da Patagônia. Nós acreditamos que o verão prévio mais chuvoso favoreça a produtividade da *A. angustifolia* que deve estar no ápice do crescimento, fazendo com que a mesma acumule reservas para o ano seguinte. Já o aumento das chuvas no início da dormência (junho) deixa o ambiente com menor incidência luminosa e, por conseguinte, o fotoperíodo, o que favorece o início da dormência.

4.4. Análise de caminhos: testando modelos de causa-efeito

Nosso resultado aponta que o CO₂ atmosférico afeta indiretamente a produtividade primária de *A. angustifolia*, por meio da fixação de carbono. Dentre as variáveis climáticas locais selecionadas, a temperatura mais alta no mês de maio prévio afetada pelo aquecimento global, através do CO₂, diminui o incremento de carbono de *A. angustifolia*. E 19% da fixação de carbono de *A. angustifolia* é reflexo desse efeito indireto, o que remete a outros fatores ecológicos os 81% da fixação restante. Silva e colaboradores (2009) ao estudar a eficiência intrínseca no uso da água (iEUA) nas mesmas árvores do presente trabalho, concluíram que o CO₂ tem efeito sobre a iEUA, porém segundo eles, esse gás não tem efeito sobre a fertilização da espécie, possivelmente pelo fato da FOM possuir um elevado volume de chuvas (caráter ombrófilo), sendo as limitações hídricas um evento raro.

Semelhante ao nosso estudo, Pinto e colaboradores (2016) investigaram a possível influência do aumento de CO₂ atmosférico na densidade da madeira de *A. araucana* no Chile e concluíram ausência desse efeito. Os autores atribuíram a ausência de respostas na densidade da madeira ao fato da área onde incidiram as pesquisas ser livre de ações antropogênicas

regionais e de distúrbios de manejo. Contrário ao que poderia ocorrer em áreas fortemente antropizadas. Seria possível então, que a fertilização do CO₂ no nosso sítio de estudo detenha um sinal mais ameno devido ao mesmo fato. Já que se trata de uma unidade de conservação com uma ampla faixa de não intervenção humana significativa.

Outro fato a ser mencionado refere-se ao histórico de corte seletivo de *A. angustifolia* na década de 1950 na FLONA-FSP. A retirada das árvores dominantes diminui a competição por luz e nutrientes na floresta, estimulando o crescimento de árvores de sub-bosque e o estabelecimento de novos recrutas. Contudo, o local selecionado para coleta das amostras de lenho da pesquisa, possui raros vestígios de corte seletivo (durante o levantamento de campo, foram observados possíveis indícios como rebrote de caule e clareiras). Logo, acredita-se que o corte seletivo não influenciou no crescimento das árvores amostradas contrariamente ao que ocorreu com Oliveira (2010). Além do que, o método “detrending” utilizado buscou filtrar possíveis efeitos relacionados a distúrbios locais.

Ademais o aumento da precipitação de março e junho prévios também refletem no aumento do incremento de carbono no ano seguinte. Entretanto, tais fatores climáticos não são influenciados pelo CO₂ atmosférico, sendo um processo natural do ecossistema.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Araucaria angustifolia responde ao aumento do CO₂ atmosférico indiretamente por meio de temperaturas mais baixas do outono do ano anterior. A espécie objeto da pesquisa detém importância na estrutura da floresta, seja pela biomassa fornecida (2/3 do total da FOM) (WATZLAWICK et al., 2003), seja pelas relações com a fauna (alimento, abrigo) reforçando seu caráter em destaque na FOM. A espécie *A. angustifolia* mostrou-se potencial para estudos ecológicos relacionados ao clima e ao ciclo de carbono, através da dendrocronologia, o que sugere o uso da mesma para estudos futuros focados ao Ecossistema Floresta Ombrófila Mista.

Estudos dendroclimáticos têm sido intensificados na América do Sul, o que fornece informações acerca das tendências passadas e futuras do quadro climático. Vários desses estudos localizam-se em regiões subtropicais (BONINSEGNA et al., 2009). Entendemos, portanto, que nosso estudo foi promissor para que outras espécies possam ser estudadas com foco no efeito do dióxido de carbono atmosférico e da mudança climática sobre a árvore com o

uso da técnica de dendrocronologia. A proposta pretendida a longo prazo é que compreendendo os efeitos do CO₂ sobre as árvores da zona subtropical do planeta, seja possível realizar previsões futuras acerca do aumento do CO₂ no ecossistema dessa região.

A correlação obtida entre as técnicas de densitometria de raio X e análise anatômica da largura dos anéis foi promissora para a espécie, viabilizando uma nova forma de descobertas científicas para o ecossistema de inserção de *A. angustifolia*. Porém, buscar soluções para as lacunas ainda existentes no uso da dendrocronologia para aplicação na elevação do CO₂ atmosférico e nas mudanças climáticas são inevitáveis para a melhoria e implementação efetiva da técnica no universo científico.

A relação efetiva de causa-efeito entre CO₂ atmosférico e fixação de carbono de uma espécie chave da FOM sugere que a Floresta tende a crescer de acordo com a resposta do clima local influenciado pelo CO₂ global. Surge, entretanto, a dúvida acerca das demais espécies que compõem o ecossistema, bem como a resposta das demais espécies que compõem o subtrópico. Informações essas, fundamentais para inferir se a FOM tende a agir como sumidouro ou fonte de carbono no futuro.

REFERÊNCIAS

ALBIERO JUNIOR, Alci. Estrutura populacional e dendroecologia de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes condições de crescimento no Parque Nacional do Iguaçu/PR: interior e borda de floresta natural. Dissertação (Mestrado em Botânica) PPG em Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ANDRADE, Eva Santos de et al. Growth ring analysis of *Euxylophora paraensis* through x-ray microdensitometry. *Ciência Rural*, v. 47, n. 4, 2017.

BABST, Flurin; et al. Above-ground woody carbon sequestration measured from tree rings is coherent with net ecosystem productivity at five eddy-covariance sites. *New Phytologist*, v. 201, n. 4, p. 1289-1303, 2014a.

BABST, Flurin; et al. A tree-ring perspective on the terrestrial carbon cycle. *Oecologia*, v. 176, p 307–322, 2014b.

BATTIPAGLIA, Giovanna et al. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. *New Phytologist*, v. 197: p 544–554, 2013.

BONINSEGNA, J. Argollo et al. Dendroclimatological reconstructions in South America: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 281, n. 3, p. 210-228, 2009.

BOURIAUD, Olivier; et al. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees-Structure and Function*, v. 18, n. 3, p. 264-276, 2004.

BRASIL. 2000. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), 2000.

BURAS, Allan. A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, v. 44, p. 130-132, 2017.

CERA, Jossana Ceolin; FERRAZ, Simone Erotildes Teleginski. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, 2015.

CHAGAS, Matheus Peres. Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CLARK, Deborah, A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 359, n. 1443, p. 477-491, 2004.

COOK, Edward. R.; HOLMES, Richard. L. Program ARSTAN users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. USA, 1984.

ESAU, Katherine. Anatomía vegetal. Barcelona. Omega, 3ª ed. 1985.

FAXITRON. User Manual Faxitron DX Radiography System. 2009. 95 p.

FERNANDES, Andréa. V.; BACKES, Albano. Produtividade primária em floresta com *Araucaria angustifolia* no Rio Grande do Sul. *Iheringia, Série Botânica*, v. 51, n. 1, p. 63-78, 1998.

FRITTS, Harold, C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.

GOTELLI, Nicholas J.; ELLISON, Aaron M. *Princípios de Estatística em Ecologia*. 1ª ed. Artmed Editora, 2011. p. 528.

HARRIS, I., JONES, P.D., OSBORN, T.J. AND LISTER, D.H., Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34: 623–642, 2014 e CRU TS v4.00. Climatic Research Unit - University of East Anglia (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>).

HELAMA, Samuli; MELVIN, Thomas M; BRIFFA Keith R. Regional curve standardization: State of the art. *The Holocene*. v. 27, p. 172 – 177.

HOLMES, Richard L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, v. 43, n. 1, p. 69-78, 1983.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate. Mitigation of climate change. Summary for Policymakers*, v. 10, n. 5.4, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press, 2014.

KAENNEL, Michele; SCHWEINGRUBER, Fritz Hans. *Multilingual glossary of dendrochronology*. Paul Haupt AG Bern, 1995.

KALLARACKAL, Jose; ROBY, T. J. Responses of trees to elevated carbon dioxide and climate change. *Biodiversity and Conservation*, v. 21, n. 5, p. 1327-1342, 2012.

LEDB - LABORATOIRE EVALUATION ET DIVERSITÉ BIOLOGIQUE. *Measuring wood density for tropical forest trees: a field manual for the CTFS sites*. Université Paul Sabatier, Toulouse, French, 2005.

LEITE, Pedro Furtado.; KLEIN, Roberto Miguel. *Vegetação*. In: *Geografia do Brasil: Região Sul*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. v. 2, p.113-150.

LISI, Claudio S. et al. ^{14}C Bomb Effect in Tree Rings of Tropical and Subtropical Species of Brazil. Tree-ring research, 2001.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R. Climate Influences on the Radial Growth of *Centrolobium microchaete*, a Valuable Timber Species from the Tropical Dry Forests in Bolivia. Biotropica, v. 43, n. 1, p. 41-49, 2011.

MAIER, Éder Leandro et al. Precipitação na América do Sul: Médias Climáticas e Padrões da Variabilidade no Período entre 1979 e 2008 (Precipitation in South America: climatic means and variability patterns from 1979 to 2008). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 1, p. 032-046, 2016.

MARENGO, José A. O future clima do Brasil. Revista USP. São Paulo. n. 103. p. 25-32, 2014.

MATTOS, Patrícia Póvoa et al. Caracterização Física, Química e Anatômica da Madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. 2006.

MOGNON, Francelo et al. Estoque de carbono e geração de serviços ambientais na floresta com Araucária capítulo 9. In: SANQUETTA, Carlos Roberto, et al. Org. Floresta com araucária e suas transições: pesquisas ecológicas de longa duração. Curitiba: MultiGraphic, 296 p., 2014. p. 185-206.

MORENO, José Alberto. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 42p., 1961.

MUNDO, Ignacio A. et al. *Araucaria araucana* tree-ring chronologies in Argentina: spatial growth variations and climate influences. Trees, v. 26, n. 2, p. 443-458, 2012.

NASA/GISS. NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS). Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. Acesso em jun 2017.

NIMER, Edmon. Clima. p. 151-187. In: Geografia do Brasil: região Sul. Rio de Janeiro, IBGE, 1990.

NOAA. National Oceanic & Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. Mauna Loa CO₂ annual mean data from NOAA. Disponível em: <http://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>. Acesso em jan 2017.

OLIVEIRA-FILHO, Ary T. et al. Delving into the variations in tree species composition and richness across South American subtropical Atlantic and Pampean forests. Journal of Plant Ecology, v. 8, n. 3, p. 242-260, 2013.

OLIVEIRA, Juliano Morales et al. Seasonal cambium activity in the subtropical rain forest tree *Araucaria angustifolia*. *Trees*, v. 23, n. 1, p. 107-115, 2009.

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

OLIVEIRA, Juliano Morales. Sinais dendroclimáticos e dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze em ecótonos campo-floresta no Sul do Brasil. In: Maria L. Absy, Francisca D. A. Matos & Iêda L. do Amaral. (Org.). *Diversidade Vegetal Brasileira: Conhecimento, Conservação e Uso*. Manaus: Sociedade Botânica do Brasil, p. 217-221, 2010.

PAN, Yude et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011.

PHILLIPS, Oliver L. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, v. 323, n. 5919, p. 1344-1347, 2009.

PINTO, Paulina E. et al. Investigating the possible impact of atmospheric CO₂ increase on *Araucaria araucana* wood density. *European journal of forest research*, v. 135, n. 2, p. 389, 2016.

QMS - QMS Tree Ring Analyzer Model QTRS- 01X. Users Guide. Quintek Measurement Systems, Knoxville, TN. 1999.

ROHDE, Antje; BHALERAO, Rishikesh P. Plant dormancy in the perennial context. *Trends in plant science*, v. 12, n. 5, p. 217-223, 2007.

ROLIM, Mário Bogdol; FERREIRA, Mário. Variação da densidade básica da madeira produzida pela *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze em função dos anéis de crescimento. *IPEF*, Piracicaba, n. 9, p. 47-55, 1974.

ROSENFELD, Milena Fermina; SOUZA, Alexandre F. Forest biomass variation in Southernmost Brazil: the impact of *Araucaria* trees. *Revista de Biología Tropical*, v. 62, n. 1, p. 335-348, 2014.

ROSS, Robert J.; BRASHAW, Brian K.; PELLERIN, Roy F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, v. 48, n. 1, p. 14, 1998.

SANQUETTA, Carlos Roberto et al. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 01-08, 2014a.

_____ Floresta com Araucária e suas transições. Capítulo 2. In: SANQUETTA, Carlos Roberto, et al. Org.. Floresta com araucária e suas transições: pesquisas ecológicas de longa duração. Curitiba: MultiGraphic, 296 p., 2014b. p. 17-31.

SCHUMACHER, Francis X.; HALL, Francisco Dos Santos. Logarithmic Expression of Timber-Tree Volume. 1933.

SCHWEINGRUBER, Fritz Hans et al. The X-ray technique as applied to dendroclimatology. Tree-Ring Bulletin, 1978.

_____ Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt AG Bern, 1996.

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

SEITZ, Rudi A.; KANNINEN, Markku. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil: preliminary results. IAWA Journal, v. 10, n. 2, p. 170-174, 1989.

SILVA, Lucas C.R. 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.

STOKES, Marvin A.; SMILEY, Terah L. Tree-ring dating. Tree-ring dating, 1968.

STRECK, Edemar Valdir. et al. Principais classes de solo identificadas no Rio Grande do Sul. Solos do Rio Grande do Sul, v. 1, 2002.

VARGAS, Rodrigo; ALLEN, Michael F.; ALLEN, Edith B. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. Global Change Biology, v. 14, n. 1, p. 109-124, 2008.

WATZLAWICK, Luciano Farinha et al. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Kuntze no sul do Estado do Paraná, Brasil. Revista Acadêmica, p. 63-68, 2003.

WEHR, Nils Joachim; TOMAZELLO FILHO, Mario. Caracterização dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdentometria de raios X. Scientia Forestalis (IPEF), Piracicaba, v. 58, n.53, p. 161-170, 2000.

WIGLEY, Thomas ML; BRIFFA, Keith R.; JONES, Phillip D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of climate and Applied Meteorology, v. 23, n. 2, p. 201-213, 1984.

ZANG, Christian; BIONDI, Franco. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, v. 31, p. 68–74, 2013.

ZISKA, Lewis. H.; BUNCE, James A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: MORISON, James IL; MORECROFT, Michael D. Ed. *Plant growth and climate change*. John Wiley & Sons, 2008. p. 17-47.

YAN, Weiming; ZHONG, Yangquanwei; SHANGGUAN, Zhouping. Contrasting responses of leaf stomatal characteristics to climate change: a considerable challenge to predict carbon and water cycles. *Global Change Biology*, 2017.