

Caren Lorensi

**“Resposta dos anéis de crescimento de  
*Araucaria angustifolia*(Bertol.)O.Kuntze da  
região sul do Brasil aos forçantes geofísicos e  
climáticos”**

**São José dos Campos**

**2016**

Caren Lorensi

**“Resposta dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*(Bertol.)O.Kuntze da região sul do Brasil aos forçantes geofísicos e climáticos”**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

Orientador: Dr. Alan Prestes

São José dos Campos

2016

Caren Lorensi

“Resposta dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*(Bertol.)O.Kuntze da região sul do Brasil aos forçantes geofísicos e climáticos”/ Caren Lorensi. – São José dos Campos, 2016-

106 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Alan Prestes

Tese (Doutorado) – Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, 2016.

1. Ciclo Solar. 2. Dendrocronologia. 2. *Araucaria angustifolia*. 3. Séries Temporais  
4. Enos I. Prestes, Alan, Orientador. II. Universidade do Vale do Paraíba. III. Título

Caren Lorensi

**“Resposta dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*(Bertol.)O.Kuntze da região sul do Brasil aos forçantes geofísicos e climáticos”**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Trabalho aprovado. São José dos Campos, 26 de Fevereiro de 2016:

---

**Dr. Alan Prestes**  
Orientador

---

**Dr. Francisco Carlos R. Fernandes**  
(UNIVAP)  
Convidado 1

---

**Dr. Caius Lucius Selhorst (UNIVAP)**  
Convidado 2

---

**Dr. Mario Tomazello Filho (USP)**  
Convidado 3

---

**Dr. Cristiano Max Wrasse (INPE)**  
Convidado 4

São José dos Campos

2016

*Em memória do Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo, por sua importante contribuição no campo da dendrocronologia e por ter me instigado a seguir por esse caminho.*

# Agradecimentos

À Deus, criador do universo e de todas as coisas, e que permitiu aos humanos, dentro dos limites de suas capacidades, o privilégio de compreenderem melhor o mundo. Sem Ele, nada seria possível.

Aos meus pais Maria Antônia e Vicente Lorensi que me educaram de maneira simples e exemplar e que, mesmo contrários à minha ausência, sempre apoiaram minhas escolhas. Junto deles estão meus irmãos: Clarice, Claudio, Mari, Carine e Greice, bem como meus sobrinhos: Juca, Elvis Lennon, Caetano Gil, Letícia, Lauren, Diogo e Alice que são meu porto seguro. Amo a todos vocês incondicionalmente.

Ao Thomas Kaufmann meu companheiro, amigo e incentivador. Obrigada pelo carinho, pela paciência para com minhas ausências e correrias durante o fechamento deste trabalho. E também pelas importantes contribuições no campo da climatologia e da programação.

À amiga de longa data Cledi Pereira, que torce por mim e sabe fazer o delicioso (e conhecido) bolo de chocolate. Obrigada.

Aos meus padrinhos Joana e Jorge Machado que desde sempre me incentivam e apoiam. Obrigada.

Minhas conquistas são também conquistas de vocês.

\*

Às famílias Spiering e Kaufmann pela amizade, carinho e o excelente acolhimento que recebo todas as vezes em que estou em Pelotas.

Às amigas de sempre e para todas as horas, Elisângela Brauner e Mirian Schalemborg pelo carinho e incentivo.

Aos amigos de longa data, Diogo Custódio e Nicole Nöthen pela amizade, incentivo e por serem sempre tão prestativos e solidários. Obrigada.

Ao meu orientador o Dr. Alan Prestes, uma pessoa simples, acessível e que não se afasta de suas origens. Obrigada pela sua confiança depositada em meu trabalho, pela dedicação e disponibilidade em me orientar, pelas trocas de conhecimento e, acima de tudo, pela amizade conquistada.

Ao Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes (Guga), uma pessoa incrivelmente humana e gentil. Obrigada por todo conhecimento que me transmitiu, pelo auxílio como coordenador da Pós-Graduação e por todas as gentilezas que me proporcionou durante minha passagem pelo IP & D. Serei sempre muito grata.

À Dr<sup>a</sup> Alessandra Abe Pacini, uma pessoa visionária e a grande incentivadora do meu trabalho. Obrigada por todas as contribuições, pelo tempo que dedicou em me auxiliar e, especialmente, pela nossa amizade.

Ao Dr. Mario Tomazello Filho pela excelente receptividade no período em que estive na ESALQ/USP em Piracicaba e por dividir comigo parte de seu grandioso conhecimento em Dendrocronologia. Obrigada.

Ao Dr. Cristiano Max Wrasse e ao Dr. Caius Lucius Selhorst, membros da banca, por suas contribuições com minha pesquisa e pelo tempo dedicado em me auxiliar. Obrigada.

Ao Dr. Valdir Gil Pillat pela paciência e gentileza em me "salvar" tantas vezes das enrolações com programação e também pelo auxílio para com os computadores do laboratório. Obrigada.

Ao Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho por ter me recebido tão bem quando demonstrei interesse em estudar na UNIVAP e por ser uma pessoa tão gentil. Obrigada.

Aos colegas de laboratório agradeço pelas companhias, trocas de experiências e amizades. Ao Pedro Golobovante pelos ensinamentos no manuseio da mesa de mensuração, à Aline Conceição e à Tayla Gabrielle pelos ensinamentos no tratamento das amostras e conceitos na parte de Fisiologia Vegetal.

Aos demais colegas da Pós-Graduação que, de alguma maneira, contribuíram com o meu trabalho, com o meu desenvolvimento profissional e também pessoal. Muito obrigada.

Às secretarias da Pós-Graduação, Valéria Maeda e Miriam Nunes pela dedicação e eficiência nas tarefas desenvolvidas.

À Alene Rangel pelo apoio na construção do abstract da tese e da versão em inglês do artigo.

Aos funcionários do IP & D que, de alguma maneira, auxiliaram no funcionamento do laboratório de Registros Naturais e, com isso, contribuíram com o meu trabalho. Muito obrigada.

Aos colegas que se tornaram amigos:

Zuleica Sodré e seu esposo Chico, Iuri Rojahn e sua esposa Jasmine e também Tayla Gabrielle e Deise Rosa que me permitiram a convivência com suas famílias fazendo com que amenizasse minha saudade de casa. Obrigada.

Ao casal da ciência, Flávia e Alexandre Tardelli, pelos tantos auxílios, pelo incentivo e pela amizade. Obrigada.

\*

À Fundação Valeparaibana de Ensino (FVE) pela bolsa de doutoramento concedida.

*"A neve e as tempestades matam as flores, mas nada podem contra as sementes.- Khalil Gibran*

# Resumo

Compreender eventos geofísicos e climáticos do passado auxilia no entendimento a respeito da evolução desses fenômenos no presente e também no futuro. Estudos desta natureza exigem que se conheça, ao menos, parte da história climática, desempenhando pesquisas diacrônicas sobre o clima. Para se ter acesso a essas características faz-se o uso dos registros naturais, pois eles podem ter grande alcance temporal, bem como substituir dados históricos faltantes ou pouco confiáveis. Estes registros são testemunhos do ambiente que experimentaram, pois acumulam informações das mais variadas formas, podendo essas ser lidas e interpretadas futuramente. Inúmeras ciências empregam os registros naturais como fonte de informação sobre o clima, atividade solar, poluentes e etc. Dentre os mais conhecidos, se destacam os anéis de crescimento de árvores por ser uma metodologia simples, de baixo custo e bastante eficaz no desenvolvimento de seu propósito. No presente estudo, fez-se o uso de amostras do lenho de árvores da espécie *Araucaria angustifolia*(Bertol.) O. Kuntze, coletadas nos Estados do Paraná e de Santa Catarina. Foram construídas séries dendrocronológicas para Fazenda Rio Grande/PR (1620-2009), General Carneiro/PR (1629-2009) e Irani/SC (1727- 2009). Estas séries foram utilizadas na investigação de indícios da influência da atividade solar e de eventos climáticos, em especial o El Niño Oscilação Sul (Enos), no crescimento das árvores. A presença de sinais, que podem estar relacionados aos eventos citados, foi investigada por meio de análise espectral clássica, wavelets cruzadas e filtros Passa-Banda. As séries apresentaram periodicidades relacionadas aos ciclos de 11, 22 e 58 anos da atividade solar. Sinais relacionados a eventos de Enos, cuja periodicidade varia entre 2 e 7 anos, também foram encontrados e incentivaram o estudo climatológico do local. Foram utilizadas séries de temperatura e de precipitação para Curitiba, e a série mensal do Índice de Oscilação Sul (IOS), que indica a fase e a intensidade do Enos. Devido à falta de séries climatológicas históricas para General Carneiro e Irani, utilizaram-se dados de reanálise. Um estudo climatológico, feito com amostras de Fazenda Rio Grande, permitiu a reconstrução do perfil de precipitação para a primavera-verão, feita com o uso de correlações e da regressão linear. A série de precipitação instrumental mostrou que os períodos com maior volume de precipitação estavam entre 1961-1977 e 1992-2000 e com menor volume entre 1978-1992 e entre 2000-2009. Esses perfis ficaram bem delineados pela série reconstruída. O perfil da precipitação para antes de 1961, dada pela série reconstruída, mostra que houve maior índice pluviométrico para os meses de setembro-março durante os períodos de 1907-1938 e 1939-1960, enquanto que o período de 1929-1937 registrou menor precipitação.

**Palavras-chave:** Ciclo solar. Dendrocronologia. *Araucaria angustifolia*. Séries temporais. Enos.

# Abstract

Knowledge about past geophysical and climatic events increases understanding about evolution of these phenomena in the present and the future. Studies of this nature require knowledge about at least part of the historical climate, through diachronic research about climate. To access these characteristics, it is necessary to use natural records, because they can have large temporal range and replace missing or unreliable historical data. This environmental evidence also accumulates information in many different ways that can be read and interpreted in the future. Many scientists have used natural records as an information source about climate, solar activity, pollutants, etc. Among these is tree ring growth, which stands out as a simple, inexpensive, and very effective methodology. The present study used wood samples from trees of the *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze species (Pinheiro do Paraná), collected at sites in Paraná and Santa Catarina. Tree ring chronology were constructed for Fazenda Rio Grande / PR (1620-2009), General Carneiro/ PR (1629-2009) and Irani / SC (1727- 2009). The dendrochronology series were used to investigate the evidence about the influence of solar activity and climate events, especially El Niño Southern Oscillation (Enos), on tree growth. The presence of these signals, which may be related to the events mentioned, was analyzed by classical spectral analysis, cross-wavelet and Pass Band filter. The series presented periodicities related to the 11- yrs cycle, 22- yrs cycle, and 58-yrs cycle of solar activity. Signs related to Enos events, whose periodicity varies between 2 and 7 years, were also found, which encouraged the climatological study of the site. For this study, the temperature and precipitation series from Curitiba (1961-2009) were used and monthly series SOI (1876-2009). Due to the lack of historical climatological series for General Carneiro and Irani, reanalysis data were used. A climatological study, done with some samples from Fazenda Rio Grande, was able to reconstruct of precipitation profile for spring-summer. The instrumental series of precipitation showed periods most rainfall between 1961-1977 and between 1992-2000 and less rainfall from 1978 to 1992 and from 2000 to 2009. These profiles were well represented by reconstructed series. The profile of precipitation before 1961, showed by reconstructed series, shows that there was more rainfall between September and March during 1907-1938 yrs and 1939-1960 yrs, while during 1929-1937 yrs there was a period lower precipitation.

**Keywords:** Solar Cycle. Dendrochronology. *Araucaria angustifolia*. Time Series. Enso.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema ilustra, de maneira simplificada, como os radionuclídeos $^{14}\text{C}$ e $^{10}\text{Be}$ são produzidos e como se depositam na Terra. . . . .	24
Figura 2 – Linhas de campo magnético solar orientadas por norte (N) e sul (S) e o sentido da rotação solar (Oeste (O)-Leste (L)) indicada pela seta mais grossa. . . . .	25
Figura 3 – (A) Linhas de campo magnético solar distorcidas devido a rotação diferencial do astro, (B) campo magnético dipolar tomando forma toroidal devido a rotação diferencial do Sol. . . . .	25
Figura 4 – (A) De baixo para cima a evolução das linhas de campo magnético na direção da superfície solar, (B) formação de manchas solares. . . . .	26
Figura 5 – Linhas de campo magnético ao final do ciclo apresentam-se como campo poloidal e polaridades inversas à condição inicial. . . . .	26
Figura 6 – Os círculos menores indicam as manchas solares e as cores em branco e em preto ilustram as polaridades das manchas. . . . .	27
Figura 7 – Imagem da superfície solar na linha H-alfa apresentando a ocorrência de manchas solares. A ampliação da imagem mostra a estrutura da mancha solar. . . . .	28
Figura 8 – Ciclos solares derivados do número de grupos de manchas solares. Destacados, por retângulos em cinza, estão os períodos de atividade solar reduzida (Mínimo de Maunder, Mínimo de Dalton, Mínimo de 1900). . . . .	30
Figura 9 – Variação no tempo da duração dos ciclos solares. . . . .	30
Figura 10 – Ilustração sugere que o Rio Tâmis, em Londres, tenha passado por um período de congelamento durante a Pequena Era Glacial, no Século XVII. . . . .	31
Figura 11 – Climatologia anual da precipitação (em mm/a) sobre o Brasil entre 1961-1990. . . . .	33
Figura 12 – Variação sazonal de precipitação em todo país para o período de 1961-1990. . . . .	34
Figura 13 – Climatologia sazonal da Temperatura máxima (em °C) para o Brasil entre 1961 e 1990. . . . .	35
Figura 14 – Climatologia sazonal da Temperatura mínima (em °C) para o Brasil entre 1961 e 1990. . . . .	36
Figura 15 – Corte transversal do tronco de uma árvore. Os pontos indicam sinais do crescimento dos anéis seguindo períodos relacionados ao ciclo solar de 11 anos. . . . .	39
Figura 16 – Banco Internacional de dados de anéis de crescimento de árvores. . . . .	41
Figura 17 – Estrutura de um anel de crescimento anual. . . . .	42

Figura 18 – Corte transversal do tronco de uma <i>A. angustifolia</i> com (A) falsos anéis ou flutuação intra-anual de densidade e (B) anéis descontínuos (ou em cunha). . . . .	42
Figura 19 – Amostras de <i>A. angustifolia</i> exibindo manchas de resina e também grupos de anéis muito estreitos. . . . .	43
Figura 20 – (A) Trado de Pressler usado na extração de amostras pelo método não-destrutivo, (B) Trado perfurando o tronco e (C) filete de madeira que contém os anéis de crescimento. . . . .	44
Figura 21 – Ilustração do interior do tronco quando perfurado pelo Trado de Pressler.	45
Figura 22 – Amostra do tronco de uma conífera que se desenvolveu em terreno acidentado. . . . .	45
Figura 23 – Amostras extraídas de árvore viva pelo uso do Trado de Pressler. . . .	46
Figura 24 – Amostra do lenho de <i>Araucaria angustifolia</i> fixada em suporte de madeira para a secagem natural. . . . .	46
Figura 25 – Mapa com a localização dos sítios de coletas em Fazenda Rio Grande, General Carneiro e Irani. . . . .	47
Figura 26 – (A) Amostra bruta e (B) amostra tratada podendo ter seus anéis de crescimento contados e medidos. . . . .	48
Figura 27 – (A) Amostra fixada na morsa, (B) e (C) amostra sendo lixada/polida e (D) amostra com os anéis de crescimento visíveis após o tratamento. . .	48
Figura 28 – Amostras de <i>A. angustifolia</i> com anéis de crescimento marcados a lápis.	49
Figura 29 – Mesa de mensuração utilizada na contagem e na medição dos anéis de crescimento de árvores. . . . .	50
Figura 30 – Série anual do Número de Manchas Solares (SSN). . . . .	54
Figura 31 – Série temporal da precipitação média anual para Curitiba entre 1961-2009. Média obtida a partir dos valores mensais. . . . .	55
Figura 32 – Série de temperatura média mensal para Curitiba entre 1961-2009. . .	55
Figura 33 – Pontos em preto mostram a localização dos dados de precipitação e de temperatura. Em azul são os locais de coleta das amostras do lenho. . .	56
Figura 34 – Séries de precipitação média anual para as quatro coordenadas mostradas no mapa da Figura 29. . . . .	57
Figura 35 – Série de temperatura média mensal para cada mês correspondente à coordenada 25,75°S; 50,75°O (S3). . . . .	57
Figura 36 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 26,75°S; 50,75°O (S2). . . . .	58
Figura 37 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 26,75°S; 51,75°O (S1). . . . .	58
Figura 38 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 27,75°S; 51,75°O (S4). . . . .	59

Figura 39 – Série temporal do Índice de Oscilação Sul (IOS) médio anual a partir da média entre os dados mensais. . . . .	59
Figura 40 – As espessuras de anéis de crescimento das 7 cronologias de GC (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho). . . . .	62
Figura 41 – As espessuras de anéis de crescimento das 6 cronologias de FRG (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho). . . . .	62
Figura 42 – As espessuras de anéis de crescimento das 6 cronologias de IR (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho). . . . .	63
Figura 43 – Cronologias de GC (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 7 cronologias. . . . .	63
Figura 44 – Cronologias de FRG (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 6 cronologias. . . . .	64
Figura 45 – Cronologias de IR (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 6 cronologias. . . . .	64
Figura 46 – Espectros para as 7 cronologias de GC e o espectro para a cronologia média. . . . .	67
Figura 47 – Espectros para a cronologia média de General Carneiro. . . . .	67
Figura 48 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de General Carneiro (GC). . . . .	68
Figura 49 – Espectros para as 6 cronologias de FRG e o espectro para a cronologia média. . . . .	69
Figura 50 – Espectros para a cronologia média de Fazenda Rio Grande. . . . .	69
Figura 51 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de Fazenda Rio Grande (FRG) . . . . .	70
Figura 52 – Espectros para as 6 cronologias de IR e o espectro para a cronologia média. . . . .	71
Figura 53 – Espectros para a cronologia média de Irani. São mostrados apenas os períodos que atingiram o nível de confiança de 95%. . . . .	71
Figura 54 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de Irani (IR) . . . . .	72
Figura 55 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de General Carneiro e a série do número de manchas solares (SSN) com o cone de influência (curva em branco) e nível de 95% de confiança (contorno em branco). . . . .	74
Figura 56 – (A) série de anéis de crescimento de GC, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de GC (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de GC (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos. . . . .	74

Figura 57 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e a série do número de manchas solares (SSN) com o cone de influência (curva em branco) e nível de 95% de confiança (contorno em branco). . . . .	75
Figura 58 – (A) série de anéis de crescimento de FRG, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de FRG (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de FRG (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos. . . . .	76
Figura 59 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de Irani e a série do número de manchas solares. . . . .	77
Figura 60 – (A) série de anéis de crescimento de IR, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de IR (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de IR (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos. . . . .	77
Figura 61 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de GC e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação com a precipitação média anual. O ponto em preto destaca a correlação acima do nível de 95% de confiança. . . . .	79
Figura 62 – Climatologia para as regiões vizinhas a General Carneiro/PR. . . . .	80
Figura 63 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação para a precipitação média anual. O ponto em preto destaca correlação acima do nível de 95% de confiança. . . . .	81
Figura 64 – Climatologia para Curitiba. . . . .	81
Figura 65 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de Irani e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação para a precipitação média anual. O ponto em preto destaca correlação acima do nível de 95% de confiança. . . . .	82
Figura 66 – Climatologia para as regiões vizinhas a Irani. . . . .	82
Figura 67 – Acumulado anual de precipitação para o período de 1901-2010 para as regiões onde foram feitas as coletas. . . . .	83



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Local das coletas, Altitude, Número de árvores, Número de amostras. . .	47
Tabela 2 – Quantidade amostral que compõe a cronologia de cada sítio. . . . .	61
Tabela 3 – Classificação dos eventos de El Niño/La Niña. . . . .	85
Tabela 4 – Coeficientes de correlação entre Temperatura Média Sazonal de 1961-2009 para os anos T e T-1 e os anéis de crescimento de árvores. Valores significativos ( $p < 0,05$ ) estão destacados em negrito. . . . .	91

# Lista de abreviaturas e siglas

Enos	El Niño Oscilação Sul.
GC	General Carneiro.
FRG	Fazenda Rio Grande.
IR	Irani.
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.
SSN	Série do Número de Manchas Solares (em inglês- Smoothed Sunspot Number).
TSI	Irradiância Solar Total (em inglês - Total Solar Irradiance).
TSM	Temperatura da Superfície do Mar.
IMF	Campo Magnético Interplanetário (em inglês- Interplanetary Magnetic Field).
RC	Raios cósmicos.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
	Introdução	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>22</b>
	Revisão Bibliográfica	22
<b>2.1</b>	<b>Relação Sol-Terra</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Atividade Solar</b>	<b>24</b>
2.2.1	Campos Magnéticos do Sol	25
2.2.2	Manchas Solares - Características	26
2.2.3	Observações do Sol e o Número de Manchas Solares	28
2.2.4	O Número de Manchas Solares	29
2.2.5	Atividade Solar e o Clima	31
<b>2.3</b>	<b>Clima da Região Sul do Brasil</b>	<b>32</b>
<b>2.4</b>	<b>El Niño Oscilação Sul (Enos)</b>	<b>36</b>
2.4.1	O Índice de Oscilação Sul (IOS)	37
<b>2.5</b>	<b>Estudo do Ciclo Solar por meio de Registros Naturais</b>	<b>38</b>
<b>2.6</b>	<b>Registros Naturais - Anéis de Crescimento de Árvores</b>	<b>40</b>
2.6.1	Datação por Anéis de Crescimento de Árvores	40
2.6.2	Estrutura do Tronco	41
2.6.3	A Espécie Estudada	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E DADOS</b>	<b>47</b>
	Metodologia e Dados	47
<b>3.1</b>	<b>Amostragem e local de coleta</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Tratamento das amostras</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Medição e Datação dos anéis de crescimento</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Construção das cronologias</b>	<b>50</b>
<b>3.5</b>	<b>Padronização</b>	<b>51</b>
<b>3.6</b>	<b>Métodos Matemáticos e Computacionais</b>	<b>52</b>
3.6.1	Análise espectral	52
3.6.2	Análise por Ondas (Wavelets) e o Filtro Passa-Banda	52
3.6.3	Correlação e Regressão Linear	53
<b>3.7</b>	<b>Séries Temporais</b>	<b>54</b>
3.7.1	Série do Número de Manchas Solares (SSN)	54

3.7.2	Precipitação e temperatura de Curitiba . . . . .	55
3.7.3	Precipitação e Temperatura de General Carneiro e de Irani . . . . .	56
3.7.4	Série temporal do Índice de Oscilação Sul (IOS) . . . . .	59
<b>3.8</b>	<b>Dendroclimatologia . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>3.9</b>	<b>Reconstrução da precipitação . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>Resultados e Discussões . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Construção das Cronologias . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise Espectral . . . . .</b>	<b>65</b>
4.2.1	Análise espectral para cada cronologia . . . . .	65
4.2.1.1	General Carneiro . . . . .	66
4.2.1.2	Fazenda Rio Grande . . . . .	68
4.2.1.3	Irani . . . . .	70
<b>4.3</b>	<b>Análise por <i>Wavelets</i> e Filtros Passa-Banda . . . . .</b>	<b>73</b>
4.3.1	General Carneiro . . . . .	73
4.3.2	Fazenda Rio Grande . . . . .	75
4.3.3	Irani . . . . .	76
<b>4.4</b>	<b>Dendroclimatologia . . . . .</b>	<b>79</b>
4.4.1	Anéis de crescimento e as variáveis climatológicas . . . . .	79
4.4.2	Anéis de crescimento e o El Niño Oscilação Sul . . . . .	84
<b>4.5</b>	<b>Reconstrução da Precipitação . . . . .</b>	<b>89</b>
4.5.1	Relação dos anéis de crescimento com as variáveis climatológicas para o ano (T) e ano (T-1) . . . . .	89
4.5.2	Regressão linear . . . . .	92
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>94</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>96</b>
	<b>Considerações . . . . .</b>	<b>96</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>97</b>

# 1 Introdução

A radiação vinda do sol não é constante, pois varia conforme a atividade solar cuja característica mais marcante está relacionada ao ciclo de 11 anos. Há uma variação percentual de 0,1% na irradiância do Sol durante o ciclo de 11 anos, com uma maior emissão durante o máximo solar e menor durante o mínimo solar (WILLSON; HUDSON, 1988). Uma das maneiras de acompanhar a evolução da atividade solar é pela contagem do número de manchas solares que ocorrem na fotosfera solar. Sobre esse fenômeno, registros com mais de 300 anos indicam que a cada ciclo de 11 anos aumenta e diminui o número médio de manchas solares conforme a evolução do ciclo (TAVARES, 2000). Essas manchas solares são geradas por campos magnéticos toroidais trazidos à superfície solar por efeito de empuxo (ECHER et al., 2003). Em períodos de dias ou de semanas, essas manchas se formam e se dissipam (TAVARES, 2000).

Pesquisadores da relação Sol-Terra procuram detectar a influência do ciclo solar sobre o clima terrestre e explicar essas relações de forma clara e precisa. Para Hoyt e Schatten (1997), indícios dessa relação são plausíveis, principalmente porque um dos grandes mínimos do número de manchas solares, o Mínimo de Maunder (1645-1715), coincidiu com o registro de baixas temperaturas no Hemisfério Norte. Este momento histórico ficou conhecido como *A Pequena Idade do Gelo*. Ao passo que o Máximo Medieval (1150-1200) coincidiu com anomalias positivas de temperatura no Hemisfério Norte. Houve outros períodos históricos que também registraram observação mínima no número de manchas solares: Mínimo de Oort (1090-1140 D.C.), Mínimo de Wolf (1300-1380 D.C.), Mínimo de Spörer (1410-1515) e Mínimo de Dalton (1790-1825) (ECHER et al., 2003).

O clima terrestre é suscetível a muitos fenômenos, os quais causam nele distúrbios e alterações de padrão. Dentre esses fenômenos está o El Niño Oscilação Sul (Enos), que por se tratar de um fenômeno de grande escala (oceano-atmosfera), altera os regimes de chuva em diversas partes do planeta. No Brasil, estas alterações se manifestam como anomalias positivas de precipitação na região Sul do Brasil durante a fase quente (El Niño) (PUCHALSKI, 2000) e anomalias negativas durante a fase fria (La Niña). Tal acontecimento é explicado pelo fato de que variações na temperatura da superfície do mar (TSM) das águas do Pacífico Equatorial acarretam em modificações da circulação de grande escala da atmosfera terrestre (ALVES; REPELLI, 1992). Logo, perturbações nessa circulação correspondem a anomalias nos regimes de chuvas em diversas partes do planeta, em um sistema conhecido como teleconexão. Uma maneira de se acompanhar a evolução do Enos, é pelo Índice de Oscilação Sul (IOS).

As alterações longínquas e intensas nos padrões de precipitação representam uma grande preocupação, principalmente devido à importância que a água tem no desenvolvi-

mento e manutenção da vida na Terra. No campo da botânica, por exemplo, o excesso ou a escassez hídrica pode acarretar inúmeros problemas. Nas árvores, pode-se observar alterações no padrão de crescimento da planta e, entre outros processos fisiológicos, a deformação do seu tronco.

Evidências do clima no decorrer da vida das plantas pode ser entendida por meio da inspeção dos anéis de crescimento de árvores - Dendrocronologia. Estes anéis são estruturas anatômicas que se depositam, anualmente, em torno do tronco devido à atividade cambial periódica. Dependendo da disponibilidade de recursos que a planta obteve, os anéis podem se mostrar regulares ou então deformados, ausentes, com espessura irregular, etc. Para Worbes (1988), há influência das condições do solo no desenvolvimento da planta, com anéis largos se desenvolvendo em situação de solo fértil, enquanto que anéis estreitos se formam quando o indivíduo cresce em solo pobre.

A resposta que o desenvolvimento dos anéis de crescimento de árvores dá ao cenário climático a que a planta esteve exposta, faz da dendrocronologia uma fonte muito precisa para o estudo do clima do passado. Juntamente ao fato de ser essa uma metodologia simples, barata e com grande alcance temporal e espacial.

Partindo das premissas acima relatadas, o objetivo deste trabalho é estudar períodos relacionados à atividade solar e a eventos climáticos, presentes nas séries de anéis de crescimento de árvores, por meio de relações computacionais e matemáticas. A justificativa do estudo se dá pelo fato dos anéis de crescimento se portarem como registros naturais em que são capazes de reter informações sobre eventos climáticos, geofísicos, biológicos em um passado muito além do alcance dos registros instrumentais disponíveis. Assim, se torna possível inferir relações entre esses eventos e a evolução dos mesmos no tempo passado. A possibilidade de quantificar e qualificar os sinais encontrados nas séries dendrocronológicas permite um estudo mais detalhado do passado, bem como reconstruções de eventos climáticos e geofísicos.

Para esta pesquisa, utilizou-se séries de anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* coletadas em Fazenda Rio Grande e em General Carneiro, ambos os sítios localizados no estado do Paraná e também em Irani, no estado de Santa Catarina. As amostras passaram por diversos processos até se obter séries dendrocronológicas.

Posteriormente, essas séries foram analisadas, estudadas e seus resultados interpretados e discutidos com base na literatura disponível. Para a obtenção dos resultados foram utilizados métodos de análise espectral clássico (Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais - Arist), transformada cruzada de wavelet, filtros Passa-Banda, regressão linear e correlação de Pearson.

Além da série dendrocronológica, foram utilizadas também a série do número de manchas solares (SSN), séries climatológicas (precipitação e temperatura) para Curitiba, por meio do banco de dados históricos, e para as regiões de General Carneiro e Irani, por meio de reanálise e a série mensal do índice de Oscilação Sul (IOS).

Para um melhor entendimento e acompanhamento de todo o trabalho realizado, no **Capítulo 2**, é apresentada a revisão bibliográfica baseada em artigos e trabalhos disponíveis na literatura. Esta revisão inicia com a Relação Sol-Terra que tenta acoplar Sol-Terra-Clima seguindo por descrições de algumas características a respeito do Sol e também sobre as manchas solares. A seguir, descreveu-se os anéis de crescimento de árvores e a maneira com que os mesmos são utilizados como registros naturais. Para isso, foi necessário introduzir alguns conceitos sobre a fisiologia da espécie estudada e como esta pode ser relevante na dendrocronologia. Além de algumas técnicas de coleta.

Foi necessário o estudo da climatologia da região sul brasileira, especificamente os estados de Santa Catarina e Paraná, onde as coletas foram feitas. E estudo sobre eventos de El Niño Oscilação Sul (Enos), que tem importante atuação no clima sulista, e sobre o Índice de Oscilação Sul, que mede a fase e a intensidade do Enos. Por fim, relatos da relação Sol-Terra, como eventos solares afetariam a vida na Terra e como o uso dos registros naturais pode ser uma fonte confiável de pesquisa.

No **Capítulo 3**, é apresentada a metodologia empregada no estudo. São apresentadas séries temporais utilizadas na pesquisa, aquelas obtidas por meio do banco de dados (variáveis atmosféricas, oceânicas e geofísicas) e também àquelas obtidas por meio de reanálise. Para as séries de anéis de crescimento de árvores, são mostrados todos os tratamentos empregados nas amostras até a obtenção da cronologia representativa do local de estudo. Esses procedimentos incluem métodos que explicam como selecionar as melhores amostras, as técnicas aplicadas para que se obtenha a melhor cronologia possível, a importância da retirada de tendência nas séries temporais, a escolha dos métodos para obtenção das periodicidades nas séries dendrocronológicas, como a análise espectral, transformada de *wavelets* e a correlação de Pearson entre as séries de anéis de árvores e as séries climatológicas.

No **Capítulo 4**, são expostos e discutidos, com base na literatura, os resultados obtidos durante o trabalho. No **Capítulo 5**, são apresentadas as conclusões obtidas e no **Capítulo 6** estão as considerações finais, sugestões para trabalhos futuros, bem como o que ainda pode ser feito a partir dos resultados aqui apresentados.

Por fim, estão à disposição para pesquisas futuras todas as referências citadas durante o texto, as quais serviram como embasamento teórico para a construção desta pesquisa e para a discussão dos resultados.

## 2 Revisão Bibliográfica

Esse capítulo apresenta, de maneira sucinta, o desenvolvimento teórico que serviu como base para a realização da pesquisa. A construção do texto se deu por meio de leituras de livros, análises de artigos, teses, notas de aula disponíveis na literatura.

### 2.1 Relação Sol-Terra

A relação Sol-Terra refere-se à influência do Sol no ambiente terrestre. De maneira geral, essa influência se apoia na ejeção de partículas e radiação oriundas da atividade solar no espaço próximo à Terra (SILVA, 2006).

O Sol tem, aproximadamente, 4,5 bilhões de anos e sua composição é estimada por 90% de hidrogênio e 10% de hélio (KIVELSON; RUSSEL, 1995). Estima-se que, desde a sua origem, a luminosidade do Sol tem gradualmente aumentado aproximadamente 30% e que essa energia se deve a uma cadeia de reações nucleares ocorrendo em seu interior (HOYT; SCHATTEN, 1997).

Sem a existência do Sol, a Terra seria um planeta inóspito para a vida humana, pois a temperatura estaria em torno de  $-238^{\circ}\text{C}$  e a água só existiria no estado sólido. A radiação solar é a maior fonte de energia para a Terra e um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Além disso, é o complemento principal para os processos físicos (aquecimento/evaporação), biofísicos (transpiração das plantas) e biológicos (fotossíntese). Logo, deve-se à energia solar o ciclo hidrológico, a diversidade climática, a biodiversidade, etc. O clima na Terra é o resultado entre do balanço da radiação solar que é absorvida com a que é redistribuída e também reemitida para o espaço (SVENSMARK; FRISS-CHRISTENSEN, 1997).

A radiação solar interceptada pela Terra é sujeita a variações em escala temporal e espacial. Essas variações ocorrem ao longo do dia, o que define períodos de dia e noite, nas diferentes latitudes, com maior radiação em latitudes baixas, e diminuição dessa radiação na direção das altas latitudes. Além da participação na composição da sazonalidade a partir da distribuição desigual dessa energia no globo ao longo do ano. O monitoramento da energia solar nessas escalas ajuda a compreender o tempo e o clima no planeta, assim como construir previsões meteorológicas e alertas de catástrofes.

Além das variações da radiação solar interceptada pela Terra, que são comuns e pertinentes à vida no planeta, existem alterações periódicas causadas por ciclos da atividade solar. O estudo e a compreensão desses ciclos são de grande importância, pois tendo a vida na Terra dependência da energia solar, é esperado que alterações no fluxo de energia solar causem possíveis distúrbios em sistemas que dependem desse fluxo. Mani-

festações do ciclo solar no clima terrestre podem ser explicadas por diversos mecanismos. Alguns deles referem-se à variabilidade da irradiância solar total que causa mudanças na energia interceptada pela Terra tendo impacto direto na temperatura da superfície e no ciclo hidrológico, variações no espectro de radiação na banda do ultravioleta afetando os constituintes da camada de ozônio, entre outros (MARQUES, 2010; PRESTES et al., 2013). Raios cósmicos, que são modulados pela atividade solar, podem ter relação com a cobertura global de nuvens baixas (até 3 km acima do solo) e estas no balanço térmico da superfície da Terra (SVENSMARK, 1998; FRIIS-CHRISTENSEN, 2000; SVENSMARK, 2007). Segundo Svensmark (2007), variações em torno de 2% em nuvens baixas durante um ciclo solar podem causar variações em torno de  $1,2 \text{ W m}^{-2}$  da entrada de calor para a superfície do planeta.

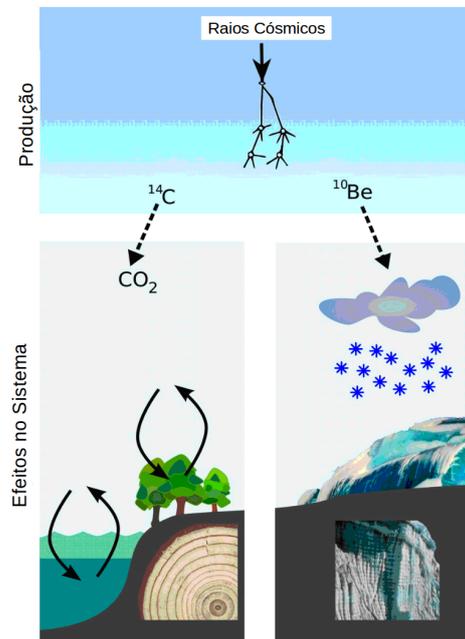
Raios cósmicos são partículas altamente energéticas que, a partir de seu espectro de energia, tem sua origem em diversas regiões do espaço podendo ser raio cósmico galáctico (GCR — sigla em inglês), solar (SCR) ou anômalo (ACR) (ler mais em Oliveira, Rockenbach e Pacini (2014)). O fluxo de raios cósmicos pode ser modulado pelo ciclo solar sob uma relação inversa (USOSKIN et al., 1997). Durante o máximo solar, estende-se pelo meio interplanetário uma espécie de escudo que bloqueia a penetração dos raios cósmicos (SVENSMARK; FRIIS-CHRISTENSEN, 1997). Dessa forma, raios cósmicos também podem ser usados como registros da atividade solar.

O fluxo de raios cósmicos ao atingir a atmosfera terrestre interage com os constituintes atmosféricos oxigênio e nitrogênio produzindo radionuclídeos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  (STEINHILBER et al., 2012). Posteriormente, o  $^{14}\text{C}$  será armazenado no lenho das árvores (STUIVER; BRAZIUNAS, 1993) e em ossos enquanto que o  $^{10}\text{Be}$  em rochas e núcleos de gelo. Análises criteriosas desses materiais podem inferir respostas sobre a variabilidade solar quando ainda não havia monitoramento direto do fluxo de raios cósmicos.

O  $^{14}\text{C}$ , após oxidar-se em  $^{14}\text{CO}_2$ , mistura-se com o gás carbônico atmosférico. As plantas absorvem dióxido de carbono e incorporam o  $^{14}\text{C}$  através da fotossíntese e, posteriormente, organismos vivos como animais e pessoas ingerem o  $^{14}\text{C}$  das plantas. A ocorrência de  $^{10}\text{Be}$  está vinculada à precipitação, sendo o  $^{10}\text{Be}$  transportado pelas chuvas e pela neve acumulando-se no gelo das regiões polares ou montanhosas. Esse gelo, sujeito à pouca interferência do meio ambiente, retém as informações a respeito do acúmulo do  $^{10}\text{Be}$ , servindo posteriormente como fonte de registro histórico (RIGOZO; NORDEMANN, 1998).

A Figura 1 mostra o caminho dos radionuclídeos produzidos a partir das interações cósmicas. Embora a assinatura dos raios cósmicos nos anéis de árvores não seja o foco principal da pesquisa, é interessante essa pequena ressalva sobre outras maneiras de se fazer o estudo da atividade solar no passado por meio de registros naturais.

Figura 1 – Esquema ilustra, de maneira simplificada, como os radionuclídeos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  são produzidos e como se depositam na Terra.



Fonte: Modificada de Steinhilber et al. (2012)

## 2.2 Atividade Solar

O Sol é uma estrela cuja radiação apresenta uma variabilidade estabelecida em ciclos, sendo que o mais conhecido é o de 11 anos (Ciclo de Schwabe). Este ciclo se caracteriza pela inversão do campo magnético solar, provocando maior emissão de partículas e de radiação conforme aumenta a atividade solar (RIGOZO; NORDEMANN, 2000). Segundo Beer, Mende e Stellmacher (2000), Silva (2006), o fluxo de radiação do Sol varia em torno de 0,1% em fase com a atividade solar, o que sugere que a "constante" solar não é rigorosamente constante.

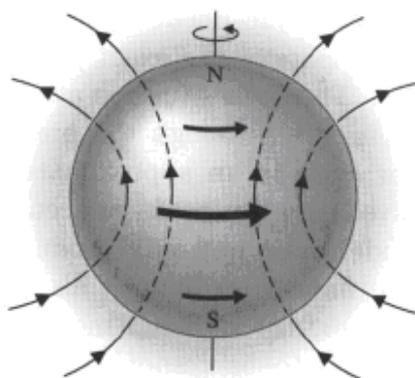
A constante solar é o fluxo de radiação luminosa do Sol (em todos os comprimentos de onda) recebido na Terra. Seu valor é, aproximadamente,  $1365 \text{ W/m}^2$ , tem dimensão de potência e área, pois relaciona a quantidade de energia recebida por unidade de tempo e de área a uma distância média da Terra-Sol na ausência da atmosfera terrestre. Como há variações nesse fluxo de energia conforme a atividade solar, o termo Irradiância Solar Total (TSI— em inglês) é mais utilizado (FROHLICH, 2012). A TSI é a energia eletromagnética total integrada ao longo de todo o espectro e sua variação em fase com a SSN é devido à existência de áreas brilhantes no entorno das manchas solares, chamadas fáculas. Além disso, a atividade solar determina o comportamento do campo magnético interplanetário (IMF — em inglês) devido às perturbações causadas pelas variações que ocorrem no fluxo de vento solar (MARQUES, 2010).

### 2.2.1 Campos Magnéticos do Sol

A causa mais clara para a existência das manchas solares é o campo magnético solar. Babcock (1961) foi o primeiro a propor que o campo magnético solar se estende de um polo ao outro assemelhando-se a um dipolo tradicional e que a rotação específica do Sol acarreta na distorção de suas linhas de campo magnético.

No início de um ciclo de atividade, o campo magnético solar é basicamente bipolar com seus polos coincidentes com os polos heliográficos como ilustra a Figura 2.

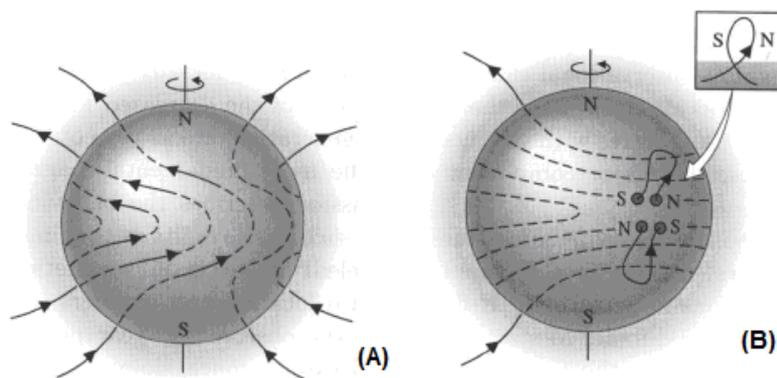
Figura 2 – Linhas de campo magnético solar orientadas por norte (N) e sul (S) e o sentido da rotação solar (Oeste (O)-Leste (L)) indicada pela seta mais grossa.



Fonte: Modificada de Duarte (2012)

Devido ao Sol não ser um corpo rígido, mas sim uma bola de gás ionizado, experimenta rotações diferenciais entre as baixas latitudes e as regiões polares (MARQUES, 2010). Em números, seria algo em torno de 27 dias terrestres no Equador Solar e 37 dias terrestres nas regiões polares (KIVELSON; RUSSEL, 1995). Esta rotação diferencial arrasta as linhas de campo magnético em torno do Sol causando uma maior distorção a cada rotação convertendo assim o campo poloidal em campo toroidal (DUARTE, 2012)(Figura 3).

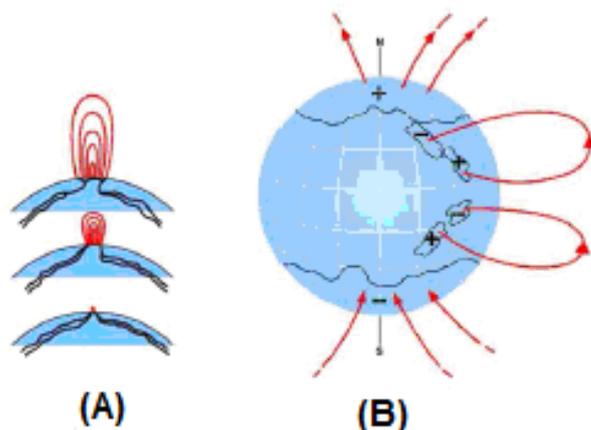
Figura 3 – (A) Linhas de campo magnético solar distorcidas devido a rotação diferencial do astro, (B) campo magnético dipolar tomando forma toroidal devido a rotação diferencial do Sol.



Fonte: Modificada de Duarte (2012)

Quando o campo de formato circular é forte o suficiente, tubos de fluxo magnético sobem através da zona de convecção até a superfície solar. A intersecção desses tubos de fluxo e da superfície solar constitui na mancha solar (SANTIAGO, 2004) (Figura 4).

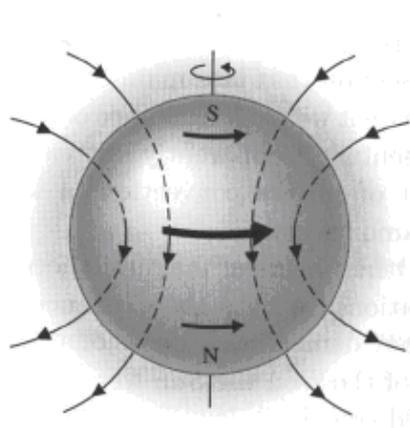
Figura 4 – (A) De baixo para cima a evolução das linhas de campo magnético na direção da superfície solar, (B) formação de manchas solares.



Fonte: Modificada de Marques (2010)

Conforme o ciclo progride, grupos de manchas solares se deslocam para o Equador onde, após a reconexão das linhas de campo, tem-se novamente um campo poloidal, mas com polaridades invertidas com relação a fase inicial do ciclo (Figura 5).

Figura 5 – Linhas de campo magnético ao final do ciclo apresentam-se como campo poloidal e polaridades inversas à condição inicial.



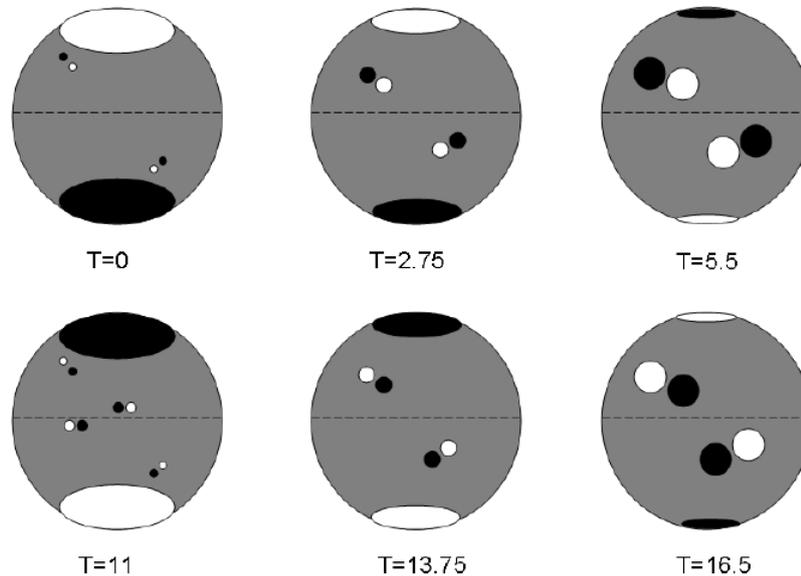
Fonte: Modificada de Duarte (2012)

## 2.2.2 Manchas Solares - Características

As manchas solares tendem, geralmente, a ocorrer em pares e com polaridades opostas (ECHER et al., 2003), como é apresentado na Figura 6. Durante 11 anos essas manchas mantêm sua polaridade magnética voltada para a mesma direção e, após esse

período, os pares aparecem em um novo ciclo com suas polaridade invertidas com relação ao ciclo anterior (VENKATAKRISHNAN; GOSAIN, 2006).

Figura 6 – Os círculos menores indicam as manchas solares e as cores em branco e em preto ilustram as polaridades das manchas.



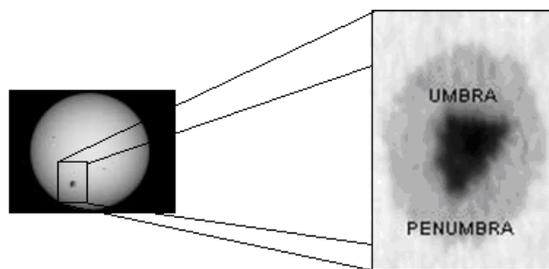
Fonte: Modificada de Duarte (2012)

Pela regra da polaridade de Hale, em  $T = 0$  anos seria o início do ciclo com um mínimo de manchas solares ocorrendo em altas latitudes e campo polar em comprimento máximo. Em  $T = 2,75$  anos os pontos aumentam, se deslocam para baixas latitudes e diminuem o campo polar. Em  $T = 5,5$  anos tem-se o máximo solar com as manchas muito próximas ao equador e campo polar mínimo. Nesta etapa há a inversão do sinal. Em  $T = 11$  anos inicia-se o próximo mínimo de manchas solares, onde os pontos do velho ciclo estão próximo ao equador e no novo ciclo surgem em altas latitudes e com sinal invertido. O máximo dessa etapa ocorre em  $T = 16,5$  anos e vai até  $T = 22$  anos quando o ciclo magnético solar se completa (DUARTE, 2012).

Segundo Santiago (2004), a estrutura conhecida das manchas solares é a existência de uma parte central mais escura (umbra) a uma temperatura entre  $3500K$  e  $5000K$  e campo magnético variando entre  $0,2T$  e  $0,35T$ . Esta região é cercada por uma região mais clara (penumbra) cujas temperaturas estão em torno de  $5800K$  e  $6200K$  e o campo magnético de  $0,2T$  e  $0,25T$ , (Figura 7).

O monitoramento dos ciclos solares por meio da contagem do número de manchas solares baseia-se no fato de que um maior número de manchas ocorre quando a emissão de energia for mais intensa — O máximo solar (PRIEST, 1987; NORDEMANN; RIGOZO; FARIA, 2004), ao passo que no mínimo solar, há uma diminuição na sua ocorrência.

Figura 7 – Imagem da superfície solar na linha H-alfa apresentando a ocorrência de manchas solares. A ampliação da imagem mostra a estrutura da mancha solar.



Fonte: Modificada de Echer et al. (2003)

### 2.2.3 Observações do Sol e o Número de Manchas Solares

Registros sobre observações do Sol existem desde muito tempo. Os chineses já observavam manchas escuras na fotosfera solar a olho nu desde 1000 AC (EDDY, 1976). Sabe-se que em torno de 95% das observações de manchas solares a olho nu são Orientais, em especial da China e Coréia, e este perfil se manteve até 1150 DC. Os registros de observações cobrem um intervalo de tempo muito maior que das observações feitas posteriormente na era do telescópio (VAQUERO; VASQUEZ, 2009), porém muitos desses registros se perderam ou foram destruídos devido a guerras e conflitos políticos que ocorreram naquela região.

Com o decorrer dos anos, os métodos de observar o Sol foram modificando, saindo das observações a olho nu, para o uso de câmaras escuras como a que foi proposta por Reinerus Gemma Frisius no Século XVI até o advento do telescópio de Galileu no Século XVII (VAQUERO, 2007). Galileu foi o primeiro a observar o Sol e o céu com o uso de telescópios em 1611 (ECHER et al., 2003), e também o primeiro a observar manchas solares simultaneamente a olho nu e com o telescópio em 1612 (VAQUERO, 2004). Essa observação específica foi publicada em um trabalho de Galileu de 1613. Com este novo instrumento foi possível conhecer a estrutura das manchas solares, saber que estas se deslocavam na fotosfera solar e que o Sol possuía rotação diferencial entre os polos e a região equatorial (BRIGGS; CARLISLE, 1996).

A observação e contabilização das manchas solares ao longo dos anos levaram os cientistas a saber que o surgimento e desaparecimento dessas manchas dependem do comportamento do Sol, conhecido pela expressão “atividade solar”. Em 1843 o astrônomo alemão Samuel Heinrich Schwabe, estudando mais de 100 anos de registros observacionais, percebeu que a ocorrência destas manchas obedecia a um ciclo com um máximo delas em torno de 10 – 12 anos e que entre esses períodos os registros praticamente desapareciam (BRIGGS; CARLISLE, 1996). Neste mesmo ano, Schwabe publicou um trabalho onde relatava suas conclusões acerca das manchas solares para o período de 1826 e 1843 (EDDY, 1976).

Mais tarde, em 1908, o astrônomo americano George Ellery Hale concluiu que

o ciclo de 11 anos definido por Schwabe seria uma das fases de um ciclo de 22 anos. Assim sendo, precisaria-se de dois ciclos de manchas solares para que o Sol retorne ao mesmo estado de polaridade magnética, o que resulta em uma periodicidade de 22 anos, (PRIEST, 1987). Tal evidência se sustenta ao fato de que a polaridade das manchas é a mesma durante todo o ciclo de 11 anos, revertendo seu sentido no início do novo ciclo. Foi mostrado que este comportamento ocorre com 97% dos grupos de manchas solares.

## 2.2.4 O Número de Manchas Solares

O trabalho de Schwabe incentivou o pesquisador Rudolf Wolf, levando-o a investigar os registros históricos de manchas solares. Como resultado dos esforços de Wolf, tem-se a reconstrução de grande parte da série de manchas solares, em especial os registros feitos antes de 1848 (EDDY, 1976). O número internacional de manchas solares (Wolf ou número de manchas solares de Zurique) é tido como a principal série temporal do nível da atividade solar desde 1700. Esta série foi obtida por Rudolf Wolf no século XIX e foi mantida pelos seus sucessores. O número de manchas solares  $R_z$  é definido por Wolf segundo a Equação 1:

$$R_z = k (10 g + f) \quad (1)$$

Na descrição da equação, tem-se que o  $R_z$  é o número de manchas solares de Wolf, o  $k$  é uma constante de normalização usada para compensar diferenças sistemáticas e possíveis erros causados durante as observações, o  $g$  é o número de grupos de manchas solares, e  $f$  é o número de manchas solares individuais visíveis sobre o disco polar (ECHER et al., 2003).

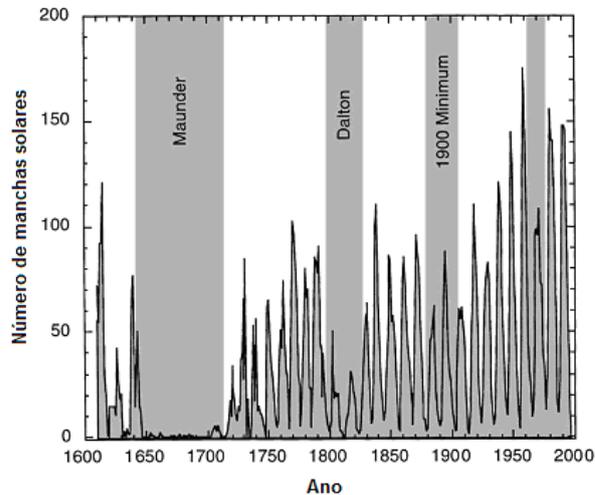
Até 1817, houve muitos dias perdidos de observações, assim Wolf só contabilizou médias mensais. Com os dados faltantes, Wolf recorreu à interpolação e também a outros métodos como o da agulha magnética para preencher essas lacunas. Assim, a série histórica do número de manchas solares foi obtida a partir de observações diretas e também por meio de valores calculados (VAQUERO, 2007).

Com o passar dos anos e com a melhoria nos equipamentos de pesquisa, as observações diretas do Sol passaram a ser feitas em observatórios com o uso de telescópios. O Observatório Nacional de Kitt Peak, localizado no Arizona - EUA, por exemplo, é o que concentra a maior diversidade de instrumentos astronômicos do mundo. Nesse local, são feitas imagens em alta resolução do Sol, a partir das quais se pode contar, medir e acompanhar as manchas solares.

A contagem e o monitoramento das manchas solares revelam a existência de períodos de baixa atividade solar como o Mínimo de Maunder (1645-1715), o Mínimo de Spörer (1416-1534) e o Mínimo de Wolf (1282-1342) (BEER; MENDE; STELLMACHER, 2000; SILVA, 2006). A Figura 8 destaca alguns momentos históricos nos quais a quantidade de manchas solares foi reduzida, cujos períodos são interpretados como sendo de baixa

atividade solar.

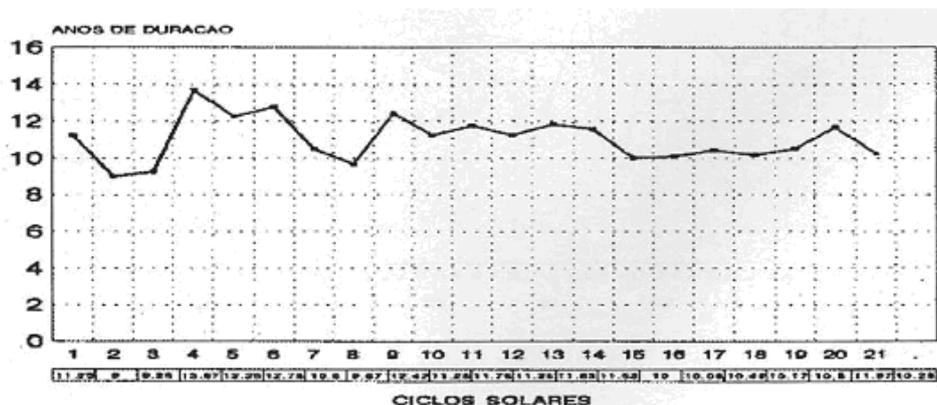
Figura 8 – Ciclos solares derivados do número de grupos de manchas solares. Destacados, por retângulos em cinza, estão os períodos de atividade solar reduzida (Mínimo de Maunder, Mínimo de Dalton, Mínimo de 1900).



Fonte: Modificada de Beer, Mende e Stellmacher (2000)

Embora seja comum o uso do nome "ciclo de 11 anos", o ciclo das manchas solares apresentaram, no decorrer dos anos, variações médias em torno de 11,1 anos (EDDY, 1980). A Figura 9, extraída do trabalho de Colesanti (1993), ilustra a variação dos ciclos no decorrer dos anos de 1755-1989. É possível notar que houve ciclos mais longos, em torno de 14 anos.

Figura 9 – Variação no tempo da duração dos ciclos solares.



Fonte: Colesanti (1993)

Periodicidades maiores relativas à atividade solar, como 88 e 208 anos, foram conhecidas por meio de registros naturais. Entre eles, estão os anéis de crescimento de árvores e os núcleos de gelo, por exemplo. Esses registros armazenam radionuclídeos como  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  que são produzidos na atmosfera terrestre a partir das reações nucleares entre as partículas de raios cósmicos com o nitrogênio e oxigênio (STEINHILBER et al., 2012).

## 2.2.5 Atividade Solar e o Clima

Muitos forçantes podem ter participação efetiva na composição e na alteração do clima na Terra. A variação da energia do Sol interceptada pela Terra tem atuação direta sobre os ciclos climáticos, em parte devido à forma com que esta energia se distribui sobre a superfície da Terra (FRIIS-CHRISTENSEN, 2000).

A ligação entre os ciclos solares e os eventos climáticos na Terra é um assunto que desperta muito interesse. Essas relações já foram levantadas, como o Mínimo de Maunder e as baixas temperaturas registradas na Europa (SHINDELL et al., 2001), as temperaturas, até 3 °C mais baixas que a média, registradas no Japão no mesmo período (KITAGAWA; MATSUMOTO, 1995) *apud* (MURAKI et al., 2011). O Máximo Medieval que coincidiu com anomalias positivas de temperatura no hemisfério norte (EDDY, 1976) e etc. Apesar dessas evidências históricas e também por haver tantos relatos em artigos científicos, ainda há uma lacuna a ser preenchida que se refere ao mecanismo de atuação Sol-Clima (MARQUES, 2010).

Reconstruções paleológicas indicam que a temperatura no Hemisfério Norte variaram em torno de 0,2% nos últimos 130 anos e em fase com o ciclo de 11 anos. Há relatos de que durante o Mínimo de Maunder tenha havido expansão das geleiras, congelamento dos canais de Veneza e do Rio Tâmis (SILVA, 2006). A Figura 10, mostra uma ilustração em que o Rio Tâmis, em Londres, aparece congelado durante o Século XVII.

Figura 10 – Ilustração sugere que o Rio Tâmis, em Londres, tenha passado por um período de congelamento durante a Pequena Era Glacial, no Século XVII.



Fonte: Guerrero (2009)

Essas relações são plausíveis, pois é por meio da energia solar que fenômenos meteorológicos se alimentam, logo, é natural esperar que, tendo o Sol variabilidades, possam estas acarretar alguma modificação no clima terrestre. Para Nordemann e Rigozo

(2003), a variação da radiação solar tem impacto direto no ambiente terrestre, podendo atuar nos regimes de chuvas, temperatura e comportamento da ionosfera. Registros geológicos indicam que mudanças acentuadas no clima têm ocorrido durante toda a história da Terra. Essas modificações são chamadas de “mudanças climáticas naturais”.

Um estudo feito por Molion (2005), sugere uma relação entre o ciclo solar e os eventos climáticos como o El Niño Oscilação Sul. Para o autor, uma possível causa para o aquecimento (resfriamento) das águas do Pacífico Equatorial durante um El Niño (La Niña) pode ser devido à alteração do balanço radiativo da Terra atrelada aos ciclos solares. Rigozo et al. (2007) também levantaram essa questão, pois sendo o Enos uma resposta ao aquecimento desigual das águas do Pacífico, variações na radiação solar poderia influenciar, em partes, o fenômeno. Ferraz (1950) estudou uma série de precipitação de Fortaleza-CE com início em 1849 e encontrou um forte pico de 12,9 anos e um pico menos intenso de 23,7 anos. Comparando com a atividade solar, o autor percebeu que as secas na região correm sempre ao final de um grande ciclo e início de um pequeno ciclo e, baseado nisto, indicou que poderia ocorrer uma grande seca entre 1956/57. De fato sua previsão se consolidou. E, segundo Molion e Bernardo (2000), o máximo de manchas solares foi o maior registrado até aquela data e a seca foi uma das mais severas.

Entender as mudanças climáticas naturais auxilia na compreensão e na prevenção tanto das mudanças naturais como das antropogênicas. Estudos que fizeram a reconstrução da temperatura global para as últimas décadas, apontam uma maior concentração de  $CO_2$  na atmosfera a partir do Século XIX (por ação humana). Esse aumento do gás carbônico associa-se muito bem ao aumento da temperatura média global para a mesma época e indicam forte relação de causa e efeito (SILVA, 2006). Segundo Hoyt e Schatten (1997), para entendermos a influência humana nas mudanças climáticas antes é preciso distinguir a ação humana dos forçantes naturais que causam variações no clima. E um desses forçantes naturais pode ser a variação da irradiância solar.

## 2.3 Clima da Região Sul do Brasil

Apesar de não ser composto por estações secas e chuvosas no decorrer do ano, o clima sul-brasileiro apresenta muitos contrastes nos regimes de chuva e de temperatura. Parte disso deve-se, à posição geográfica da região, que está situada na transição entre trópicos e as latitudes médias (GRIMM, 2009).

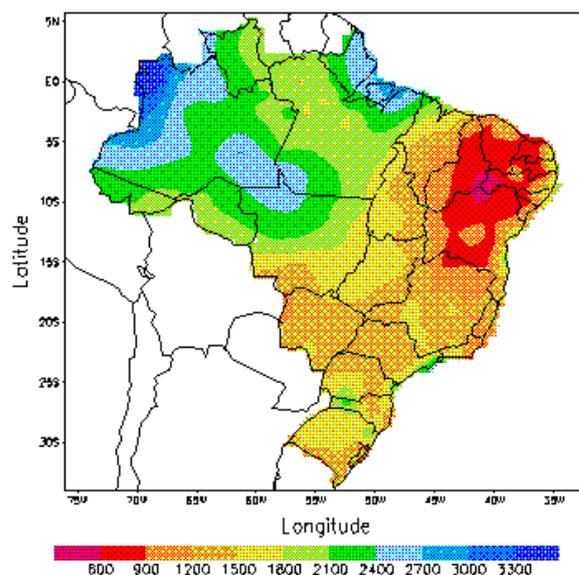
Os regimes de chuva da parte norte (entre os estados do Paraná e de São Paulo) recebem influência das monções, tendo assim a ocorrência da estação chuvosa entre a primavera e o outono. Na parte sul, há distribuição uniforme de chuvas ao longo do ano, porém com chuvas mais intensas no inverno. Outro fator que influencia no clima é a posição latitudinal que recebe influências de sistemas de latitudes médias nos quais os sistemas frontais são os maiores causadores de chuvas o ano todo (OLIVEIRA, 1986).

Com dados de 1961-1990, construiu-se a climatologia da precipitação acumulada anualmente (em mm) em todo país (Figura 11).

Por meio da escala de cores, observa-se que a média anual da precipitação na região sul varia entre 1250 mm a 2000 mm. Os volumes mais elevados de precipitação se concentram no litoral e sul paranaense, oeste catarinense e na serra gaúcha, com valores acima de 2000 mm. Enquanto que valores abaixo de 1250 mm são registrados no litoral sul catarinense, norte paranaense e em partes do sul do Rio Grande do Sul.

Durante o verão, quase todo Estado do Paraná e partes de Santa Catarina registram menores volumes de chuva. No inverno, o extremo norte paranaense apresenta característica de estação bastante seca, isso porque o Paraná situa-se em uma região de transição climática com clima tropical ao norte e subtropical ao sul (CARVALHO; STIPP, 2004).

Figura 11 – Climatologia anual da precipitação (em mm/a) sobre o Brasil entre 1961-1990.



Fonte: Climanalise (1996)

Durante o verão, predomina a entrada da Zona de Convergência de Umidade e da Convergência do Atlântico Sul que promove dias quentes e chuvosos em todo o Estado. No inverno, as passagens de frentes frias causam declínio na temperatura ocasionando episódios de geada e até mesmo de neve, principalmente em áreas elevadas (NERY; CARFAN, 2012).

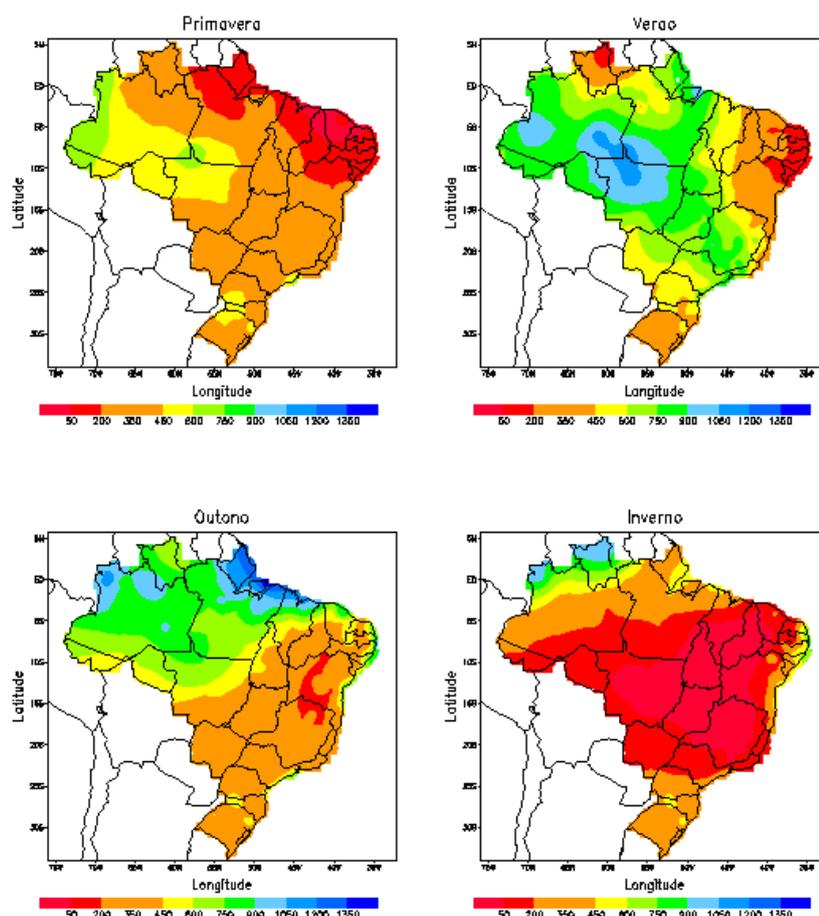
O Estado de Santa Catarina mantém uma distribuição uniforme de chuvas durante o ano. Muitas características do clima podem estar atreladas a componentes locais como relevo, orografia, proximidade com o oceano etc, que contribuem para precipitação diferenciada em diversas áreas do Estado. Monteiro (2001) destaca que localidades próximas às encostas de montanhas, do lado barlavento, as precipitações são mais abundantes devido à elevação do ar úmido e quente que favorece a formação de nuvens e, como resultado, há aumento do volume de precipitação local.

O litoral paranaense, por estar localizado entre a planície litorânea e a serra do mar, está no caminho das frentes frias que se deslocam do Sul do país com frequência

mensal significativa (RODRIGUES; FRANCO; SUGAHARA, 2004). Estas frentes frias contribuem para a concentração de vapor d'água nos baixos e médios níveis atmosféricos, possibilitando precipitações mais persistentes e de maior volume em comparação com outras regiões (FOMIN; DOURADO, 2013). Tal conclusão corrobora com os estudos de Nery e Carfan (2012), que realizaram uma análise da chuva no Estado do Paraná e concluíram que a variabilidade da chuva é tanto temporal como espacial e apontam o sul e o leste do Estado como as regiões mais chuvosas e o norte e o noroeste como as menos chuvosas. Leite et al. (2004), estudando a precipitação pluviométrica do Paraná entre 1975 e 1995, basearam-se em dados de 66 estações distribuídas por todo o Estado e observaram maiores concentrações de precipitações pluviométricas nos setores sul-sudoeste.

A climatologia sazonal da precipitação em todo país para o período de 1961-1990 é mostrada na Figura 12. A parte sul, que engloba todo o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, mantém praticamente o mesmo regime de chuva o ano todo, com exceção de alguns pontos. Nas estações de transição (primavera/outono) os três Estados do sul apresentam quantidade de chuva muito semelhante.

Figura 12 – Variação sazonal de precipitação em todo país para o período de 1961-1990.



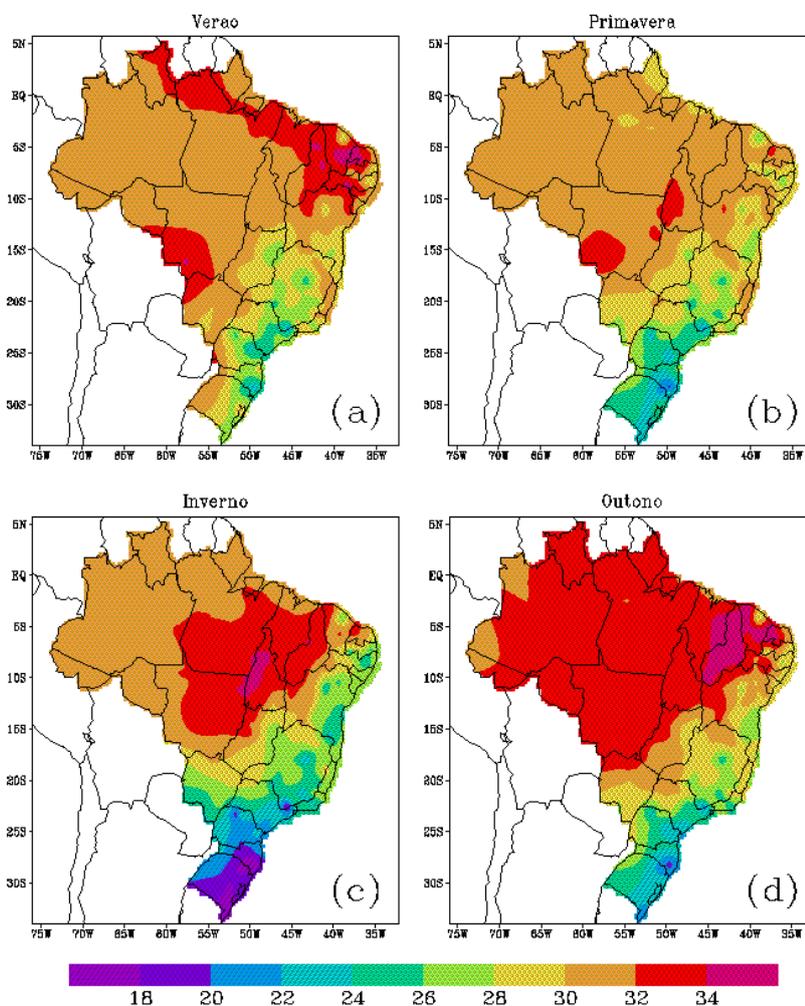
Fonte: Climanalise (1996)

Com relação às temperaturas, o sul brasileiro possui grande contraste entre as temperaturas do inverno e as do verão, sendo comum a ocorrência de neve nas regiões serranas,

especialmente, durante o inverno (GRIMM, 2009). A Figura 13 mostra a climatologia da temperatura máxima para cada uma das 4 estações do ano para todo o Brasil entre os anos de 1961 e 1990.

Campos, Alves e Braga (2006), fizeram um estudo histórico para conhecer o comportamento do clima com o uso de dados climatológicos de precipitação e temperatura de algumas localidades em Santa Catarina. Os autores relataram um aumento da temperatura média do ar devido à diminuição da amplitude térmica com o aumento da temperatura mínima, além de maior volume anual de precipitação no decorrer dos anos. Apenas Florianópolis apresentou decréscimo na temperatura mínima, o que parece ser uma característica comum em estações localizadas no litoral do Brasil.

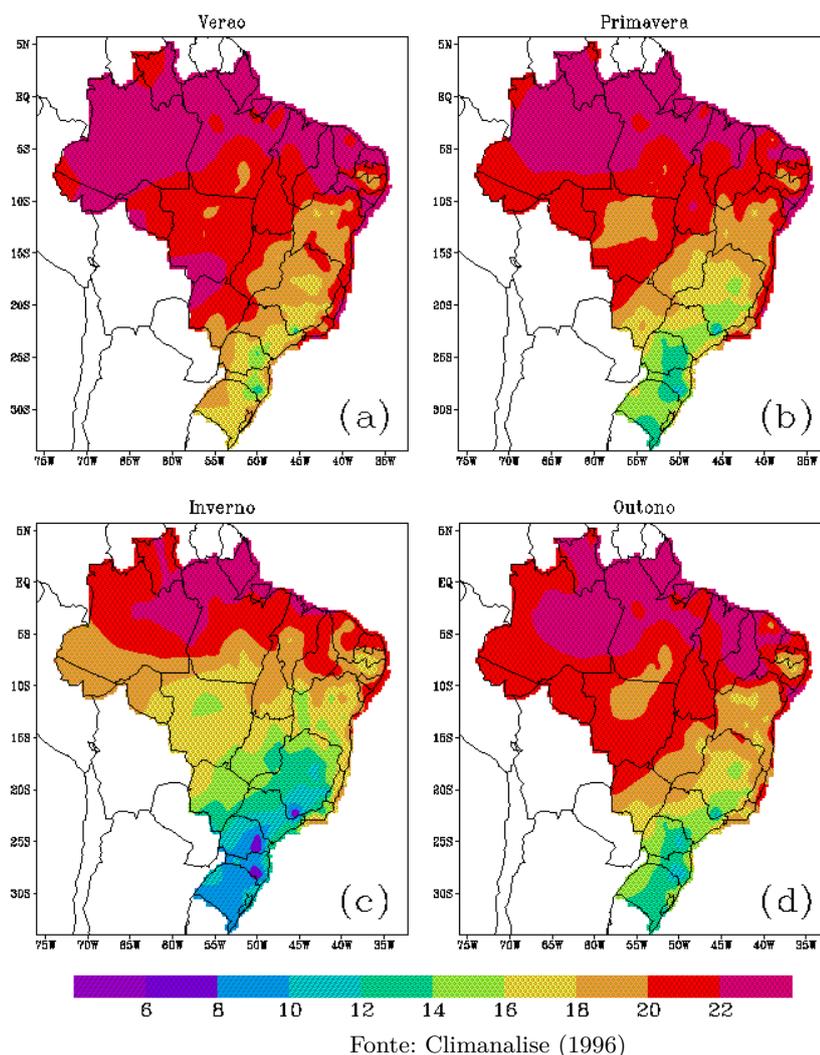
Figura 13 – Climatologia sazonal da Temperatura máxima (em °C) para o Brasil entre 1961 e 1990.



Fonte: Climanalise (1996)

A Figura 14 mostra a climatologia das temperaturas mínimas para as 4 estações do ano em todo o Brasil entre 1961-1990. O mapa deixa claro que as temperaturas mínimas mais baixas ocorrem nas regiões serranas onde invernos rigorosos e ocorrência de neve são bastante comuns.

Figura 14 – Climatologia sazonal da Temperatura mínima (em °C) para o Brasil entre 1961 e 1990.



## 2.4 El Niño Oscilação Sul (Enos)

A troposfera terrestre caracteriza-se por apresentar ar ascendente nas regiões mais aquecidas e ar subsidente nas regiões menos aquecidas. Esta circulação, sem levar em consideração os efeitos de rotação da Terra, define as condições climáticas predominantes. Um fenômeno que interfere nas características desta circulação de grande escala da atmosfera terrestre é o El Niño Oscilação Sul (Enos) (ALVES; REPELLI, 1992). O Enos se caracteriza por ser um fenômeno de interação oceano-atmosfera em que a componente oceânica está associada às variações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas águas do Leste do Oceano Pacífico Equatorial. Ao passo que, a componente atmosférica associa-se às grandes variações no sentido Leste-Oeste da massa da atmosfera tropical, entre os oceanos Pacífico Oeste e Índico e o Pacífico Leste (PEIXOTO; OORT, 1992). Eventos de Enos são uma das principais fontes de variabilidade climática no planeta (TRENBERTH; CARON, 2000) e, por meio de conexões, podem causar anomalias de precipitação em diversas localidades do globo (NEELIN; LATIF, 1998).

No Brasil, a relação entre o clima e os eventos de El Niño está associada aos regimes de chuva que são modificados em épocas de ocorrência do evento. No sul brasileiro, a fase quente do Enos produz anomalias positivas de precipitação (FONTANA; BERLATO, 1997; PUCHALSKI, 2000), enquanto que, no nordeste, ocorrem estações chuvosas deficientes (ALVES; REPELLI, 1992). Entre os eventos históricos, está o forte El Niño de 1982/1983 que causou grandes enchentes no Sul do Brasil (REBELLO, 1997).

O Enos é bifásico, apresentando uma fase quente (El Niño) e uma fase fria (La Niña). Além disso, é um evento periódico com escala de ocorrência variando de 2 a 7 anos, aproximadamente (OLIVEIRA, 1971; NEELIN; LATIF, 1998). De maneira geral, a fase quente do Enos promove o aquecimento das águas do Pacífico Equatorial Central e Leste, que intensifica a ascendência de ar, a convecção e a formação de nuvens, alterando assim o campo de pressão (ANDREOLI; KAYANO, 2005). Ao passo que, durante a fase fria, as águas do Pacífico Equatorial Leste se tornam mais frias reduzindo a convecção nessa região.

Eventos do Enos alteram o padrão de distribuição das chuvas, em especial na região Sul do Brasil (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998), cujas intensidades dessas alterações variam bastante. No Paraná, a região centro-sul é a mais afetada pelo Enos (SOUSA, 2006). Nery e Carfan (2012), salientam que o sul do Paraná apresenta boa quantidade de chuvas mesmo em anos de La Niña, que costuma ter estiagem, como foi o ano de 1985.

### 2.4.1 O Índice de Oscilação Sul (IOS)

Uma forma de medir a fase e a intensidade dos eventos de Enos se dá por meio do Índice de Oscilação Sul (IOS). Os valores do IOS são obtidos a partir da diferença normalizada da pressão ao nível do mar (PNM) entre Darwin (Austrália) e Tahiti (Polinésia Francesa) (CANE, 2005). Logo, sinal negativo do IOS determina eventos de El Niño, ao passo que, sinal positivo de IOS, os eventos de La Niña (ENFIELD, 1989; NEELIN; LATIF, 1998). Em geral, o fenômeno tem início no começo do segundo semestre de um ano e termina no final do primeiro semestre do ano seguinte (GRIMM; BARROS; DOYLE, 2000).

Os Estados do sul brasileiro caracterizam-se por terem estações bem definidas e, de maneira geral, distribuição harmônica de precipitação ao longo do ano. Em anos de Enos, os regimes de chuva são controlados pelo fenômeno, o que acarreta alterações na frequência, na intensidade e na quantidade de chuva (FONTANA; BERLATO, 1997). Essas alterações anômalas na precipitação têm impacto direto no desenvolvimento agrícola, florestal, ambiental e etc. Em partes, por ser a precipitação um dos fatores limitantes do desenvolvimento vegetal. Por essa razão, o Enos se tornou assunto importante, sendo o foco de inúmeras pesquisas no meio acadêmico. Fazer a previsão para o evento, assim como conhecer sua duração e periodicidades se tornaram peças-chave para explicar alterações nos padrões de precipitação e até mesmo emitir possíveis alertas à população.

## 2.5 Estudo do Ciclo Solar por meio de Registros Naturais

A energia solar governa muitos processos na atmosfera e também na superfície terrestre. O registro da atividade solar em anéis de crescimento de árvores parte da premissa de que esta promove variações no clima que, por sua vez, ficam registradas no crescimento das plantas (DOROTOVIC et al., 2014).

A interação entre as plantas e os poluentes, por exemplo, é considerado um evento benéfico para o homem, pois as árvores são capazes de absorver, transformar e acumular determinados poluentes (MOREIRA, 2010) o que pode torná-las fonte rica de registros naturais. Toda a informação que fica retida nos anéis de crescimento das plantas pode cooperar para uma melhor compreensão e previsão do clima do planeta contribuindo para melhorar as previsões e validar modelos (FRITTS, 1976).

Villalba (2000) acrescenta que as variações anuais nos anéis de crescimento podem ser utilizadas para delimitar datas precisas de eventos geológicos e geomorfológicos, assim como fornecer registros contínuos anuais de paleoclima, por exemplo, para épocas ou regiões em que não havia registros instrumentais (GARCIA-SUAREZ; BUTLER; BAILLIE, 2009). Para Fritts (1976), o desenvolvimento da dendrocronologia se deu devido à junção de duas coisas: escassez de dados históricos e a qualidade dos registros em anéis de crescimento de árvores. Embora Bryson e Dutton (1961), salientam que, para fazer uso de registros naturais como substitutos ou auxiliares aos registros instrumentais, é necessário que se estabeleça para qual variável climática a série dendrocronológica é equivalente, assim como saber interpretar o comportamento desta série.

Além dos anéis de crescimento de árvores, são utilizados como registros naturais os núcleos de gelo, matrizes biológicas (esqueletos de plâncton e corais), sedimentos e espeleotemas (HAIGH, 2007).

O alcance temporal da dendrocronologia tem importância para estudos paleoclimáticos (RASPOPOV et al., 2008), atividade vulcânica (SHUMILOV et al., 2011), abalos sísmicos (JACOBY, 1997), cosmonuclídeos (RAKOWSKI et al., 2015), clima (ANDREACCI; BOTOSSO; GALVÃO, 2014) e atividade solar (MURPHY; VEBLEN, 1992; RIGOZO et al., 2004; PRESTES et al., 2011).

Em alguns estudos da atividade solar por meio do ciclo de manchas solares, foram observados valores nas larguras de anéis de crescimento de diferentes espécies bem relacionados aos períodos de maior e menor atividade solar (RASPOPOV et al., 2011), assim como sinais significativos em torno de 11 anos que foram atribuídos aos efeitos do Ciclo de Schwabe (11 anos), (RIGOZO et al., 2002).

No início do Século XX, o astrônomo americano Andrew Ellicott Douglass já relacionava anéis de crescimento de árvores aos ciclos de atividade solar. Em um de seus trabalhos, publicado na década de 1930, o pesquisador aponta sinais claros do ciclo solar de 11 anos em anéis de árvores (DOUGLASS, 1933). Na Figura 15 as flechas em vermelho apontam evidências dos ciclos solares no crescimento da árvore. É possível notar

no crescimento dessa árvore a alternância de anéis mais estreitos seguidos por anéis mais largos e essa repetição ocorre a cada 11 anos, aproximadamente.

Figura 15 – Corte transversal do tronco de uma árvore. Os pontos indicam sinais do crescimento dos anéis seguindo períodos relacionados ao ciclo solar de 11 anos.



Fonte: Modificada de Douglass (1933)

A evidência de sinais do ciclo solar em anéis de crescimento de árvores, implicaria pensar que o crescimento das plantas é afetado pelo clima local e este é influenciado pela atividade solar. Para Muraki et al. (2011), a formação de neblina, nevoeiro e chuva também são modulados pela atividade solar. Logo, a absorção de vapor d'água pelas plantas faz com que a atividade solar fique registrada nos anéis de crescimento de árvore.

Quando se procura relacionar a largura dos anéis de crescimento com as condições climáticas entra em questão um ramo da dendrocronologia, chamada dendroclimatologia.

Pesquisas em dendroclimatologia permitem avaliar perfis de precipitação e temperatura, assim como estudo de eventos climáticos. A validação dos perfis climatológicos encontrados nas séries dendrocronológicas pode ser utilizada para se obter reconstruções do clima do passado. Isso porque esses eventos climáticos ficam retidos nos anéis, seja sob a forma de sua espessura, densidade ou composição, etc (PRESTES, 2006). D'Arrigo, R. e Wiles (2001) reconstruíram o índice anual do PDO (sigla em inglês para Oscilação Decadal do Pacífico) por meio de anéis de crescimento oriundos da costa do Alaska. Outros pesquisadores, como Barichivich, Sauchyn e Lara (2009), também estudaram o PDO em anéis de crescimento de árvores.

Alguns trabalhos buscam analisar padrões climáticos locais. Conhecendo a influência que as variáveis climáticas têm sobre o crescimento das árvores e a característica

dessa influência, é possível encontrar assinaturas da precipitação no lenho das plantas (THERRELL et al., 2006), de temperaturas (JACOBY et al., 1999; FLOWER; SMITH, 2010) e com isso reconstruir esses perfis e estendê-los para o passado.

## 2.6 Registros Naturais - Anéis de Crescimento de Árvores

Em 370 a.C. Theophrastus, discípulo de Aristóteles, em seu livro *Peryphyton Historia* (Investigando as plantas), descreveu os anéis de crescimento nos troncos das árvores e afirmou que havia relação entre o crescimento desses anéis e o meio ambiente (COELHO, 2011). Em outro livro, Theophrastus cita a influência do clima na formação anelar baseando-se na premissa de que a maioria das árvores desenvolve um anel de crescimento que é acrescido ao seu tronco anualmente (SCHWEINGRUBER, 1996).

No Século XV, as primeiras descrições sobre anéis de crescimento e o clima foram feitas por Leonardo da Vinci quando ele verificou a relação entre os períodos chuvosos e o crescimento das plantas (FRITTS, 1976). Em 1737, cientistas franceses descobriram que uma forte geada havia ocorrido 29 anos antes porque esta havia danificado anéis de crescimento de árvores (SPEER, 2010). No século XIX, muitos cientistas fizeram uso de anéis de árvores em estudos arqueológicos, climáticos, geológicos, ataques de insetos e etc (SPEER, 2010).

Posteriormente, com técnicas melhoradas de análise, esses estudos anatômicos se aprimoraram. No início do século XX, com os trabalhos do astrônomo americano e fundador do laboratório Tree-Ring Research da Universidade do Arizona, Andrew Ellicott Douglas, a técnica se solidificou e tem evoluído para as mais variadas áreas de estudo, associada, principalmente, às ciências ambientais (SCHWEINGRUBER, 1996).

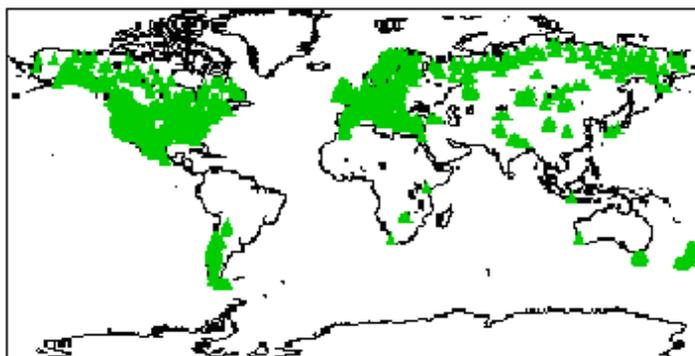
Eventos históricos recentes já foram tema de pesquisa por deixarem evidências no lenho de coníferas. Lisi et al. (2001) analisaram a composição da madeira de espécies tropicais e subtropicais no Brasil e encontraram aumento gradativo de  $^{14}C$  nos anéis de crescimento dessas árvores durante os anos de 1964-1965. Os autores atribuíram esses resultados aos testes nucleares que ocorreram nos Estados Unidos anos antes e ainda sugeriram a existência de um gradiente norte-sul da concentração de  $^{14}C$   $O_2$ .

Atualmente, existe um banco de dados dendrocronológicos disponíveis no NCDC (National Climatic Data Center) para acesso livre. As cronologias de anéis de crescimento validadas e disponíveis na plataforma estão destacadas em pontos verdes na Figura 16.

### 2.6.1 Datação por Anéis de Crescimento de Árvores

A ciência que analisa e interpreta o crescimento das árvores por meio do estudo de seus anéis de crescimento é chamada dendrocronologia. O termo provém do grego, da junção de *dendron* (árvore), *kronos* (tempo), e *logos* (conhecimento) (GONÇALVES,

Figura 16 – Banco Internacional de dados de anéis de crescimento de árvores.



Fonte: Dendrobox.

2008). Além de proporcionar o conhecimento da idade das árvores, por meio da contagem de seus anéis de crescimento, essa ciência busca também relacionar, estudar e analisar as características desses anéis formados, a fim de estabelecer sua correspondência com eventos ocorridos durante sua formação, sendo então aceitos como testemunhos da história (COELHO, 2011).

## 2.6.2 Estrutura do Tronco

Morfologicamente, os anéis de crescimento nas coníferas consistem em dois grupos de células: *lenho tardio* (lenho escuro ou lenho outonal) e *lenho inicial* (lenho claro ou lenho primaveril). As grandes células do lenho inicial atuam como suporte para o transporte de água das raízes até as folhas, enquanto que as células do lenho tardio contribuem no suporte mecânico (CREBER; CHALONER, 1990).

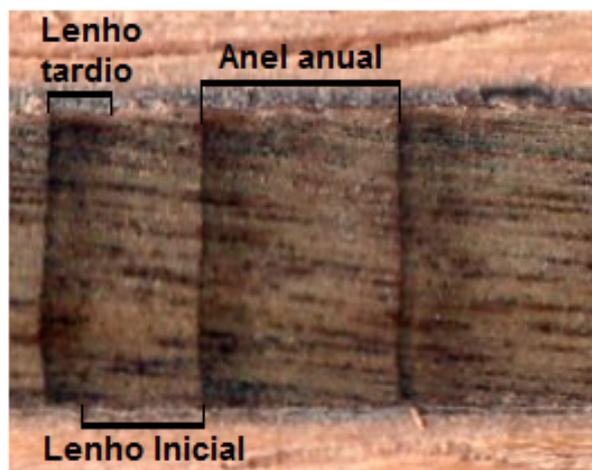
O lenho inicial apresenta coloração mais clara e está relacionado ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, geralmente na primavera, quando as plantas despertam do período de dormência e retomam suas atividades fisiológicas com todo o seu vigor. Suas células têm paredes finas e grande diâmetro. Com a aproximação do fim do período vegetativo, normalmente no outono, as células diminuem sua atividade fisiológica, tornando suas paredes celulares mais espessas, com cavidades menores, dando ao lenho uma tonalidade mais escura, o dito lenho tardio. Esse lenho é mais denso que o lenho inicial, por este ser o período em que a planta diminui seu ritmo de crescimento e se detém a armazenar nutrientes (BOTOSSO; MATTOS, 2002).

O conhecimento da existência de diferentes tipos de lenhos para diferentes etapas do crescimento da planta é importante para estudos sazonais, nos quais a largura de cada um dos anéis pode indicar variações na precipitação ou temperatura (STAHLE et al., 2000) e também para a análise da densidade da madeira. Polge (1996) *apud* Botosso e Mattos (2002), Amaral e Filho (1998), desenvolveu uma técnica para o uso da densitometria de raio-x, a qual permite conhecer valores da densidade dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento, qualidade da madeira e transição entre os lenhos. A partir dos trabalhos

de Polge, o uso da densitometria de raios-x passou a ser empregada em diversas áreas que procuravam relacionar as variações intra-anuais de densidade do lenho a diversos outros fatores (AMARAL; FILHO, 1998).

Um anel anual de crescimento corresponde a um ano de atividade cambial da planta. Logo, este deve conter o lenho inicial e o lenho tardio. Um anel de crescimento é medido do início do lenho inicial até o final do lenho tardio (Figura 17).

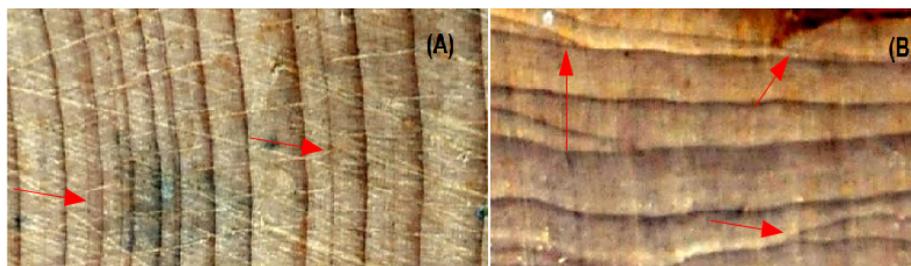
Figura 17 – Estrutura de um anel de crescimento anual.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Uma das maiores dificuldades encontradas nos trabalhos com dendrocronologia é a má formação de alguns anéis de crescimento. Espécies como as Araucárias, por exemplo, costumam apresentar muitos anéis falsos e/ou descontínuos. Em geral, essa má formação anelar está atrelada a distúrbios ambientais que interferem na atividade cambial da planta (ZANON, 2007). Os falsos anéis se originam quando há formação de mais de um anel no período vegetativo, já os anéis descontínuos são aqueles que não formam um círculo completo em torno da medula (BOTOSSO; MATTOS, 2002). Na Figura 18, as setas em vermelho mostram os falsos anéis e também os anéis anômalos com formação em cunha.

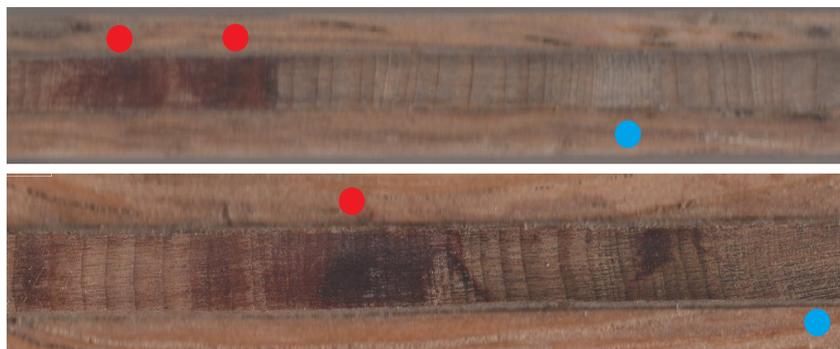
Figura 18 – Corte transversal do tronco de uma *A. angustifolia* com (A) falsos anéis ou flutuação intra-anual de densidade e (B) anéis descontínuos (ou em cunha).



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Segundo Encinas, Silva e Pinto (2005), falsos anéis ocorrem como consequência de sucessivos períodos curtos de secas, de chuvas, ataques de insetos, de doenças e etc, que podem levar a planta a interpretar como um novo ciclo de crescimento, mesmo que tenha sido durante o período de um ano. Dificuldades no momento da contagem e medição dos anéis de crescimento também podem ocorrer devido a manchas de resina e anéis muito estreitos. Na Figura 19 as amostras apresentam trechos com vazamento de resina sobre o lenho (indicados pelos círculos em vermelho) e trechos cujos anéis de crescimento se mostram muito estreitos (indicados pelos círculos em azul).

Figura 19 – Amostras de *A. angustifolia* exibindo manchas de resina e também grupos de anéis muito estreitos.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Ao datar uma amostra, é necessário que se tenha cuidado com os casos de má formação anelar para que não se atribua uma cronologia errada à árvore, o que levaria a uma falsa informação sobre as condições ambientais que a planta esteve sujeita (RIGOZO, 1999). Segundo Stokes e Smiley (1996), a identificação de um falso anel se dá pelas características que essa deformidade apresenta. Em geral, o recém-formado lenho tardio de um falso anel não está delineado claramente e sim misturado com a coloração do lenho inicial. Em troncos que se desenvolvem de maneira não circular, pode ocorrer anéis deformados e também ausência de anéis (RIGOZO, 1999).

Uma cronologia é obtida por meio da contagem dos anéis de crescimento que se depositam anualmente, sob a forma de círculos, no tronco da planta. Esses anéis são, na verdade, estruturas anatômicas que, observadas por meio de um corte transversal, configuram círculos ao redor do centro do tronco, a medula (OLIVEIRA, 2007).

A contagem desses anéis se inicia na medula e termina na borda (casca), sendo que o anel mais extremo corresponde a formação mais recente. Dessa maneira se determina a idade da planta. Sabendo-se o ano em que a amostra foi coletada, pode-se conhecer todo o período de vida dela. O conjunto de dados referentes à idade da planta e ao período de vida do vegetal constitui uma série temporal de anéis de crescimento de árvores.

### 2.6.3 A Espécie Estudada

A espécie utilizada no presente estudo foi *Araucaria angustifolia*(Bertol.)O.Kuntze (Pinheiro do Paraná) uma conífera cuja ocorrência se estende, entre outros locais, ao longo do sul e do sudeste brasileiro, nordeste da Argentina e sudeste do Paraguai (OLIVEIRA, 2007). Esta árvore possui anéis muito nítidos com lenhos inicial e tardio bastante demarcados (SANTAROSA et al., 2007). Segundo as características definidas pela EMBRAPA, as *A. angustifolia* são árvores de folha perene podendo atingir a altura de 50m e 250cm ou mais de diâmetro na altura do peito (DAP) na fase adulta.

As amostras podem ser coletadas pelo método destrutivo, quando há o abate da planta a partir do corte do seu tronco para retirada de discos. Esses discos são cortados com o uso de motosserras em diâmetros variados e espessuras de, aproximadamente, 5cm (RIGOZO, 1999). E também podem ser coletadas pelo método não-destrutivo, quando se faz o uso de um instrumento conhecido como Trado de Pressler (Figura 20). Essa ferramenta se comporta como uma sonda que perfura a madeira e traz de dentro do tronco um fino cilindro de, aproximadamente, 5mm de diâmetro e até 80cm de comprimento. Este procedimento não coloca em risco a vida do vegetal.

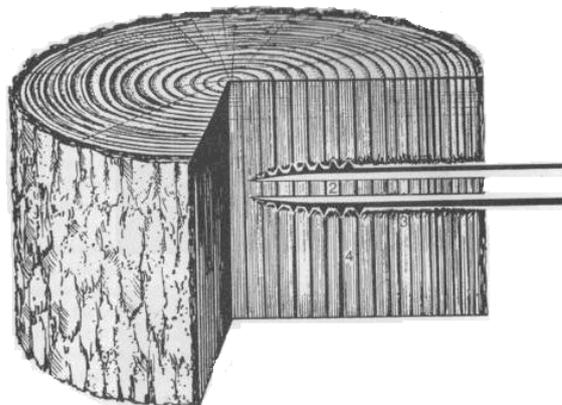
Figura 20 – (A) Trado de Pressler usado na extração de amostras pelo método não-destrutivo, (B) Trado perfurando o tronco e (C) filete de madeira que contém os anéis de crescimento.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

A Figura 21 ilustra a perfuração feita pelo trado e como os anéis de crescimento estão depositados na amostra.

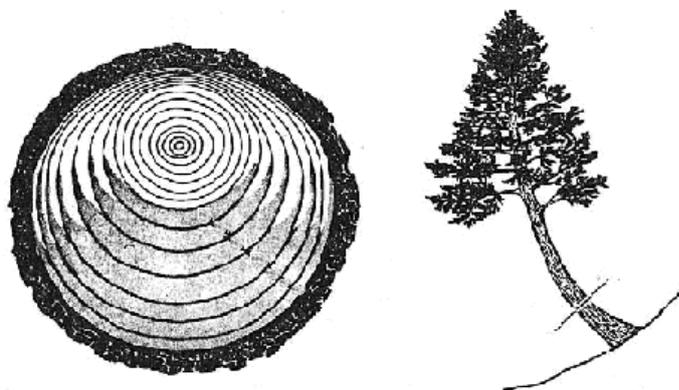
Figura 21 – Ilustração do interior do tronco quando perfurado pelo Trado de Pressler.



Fonte: Modificada de Speer (2010).

Um dos desafios encontrados nas coletas feitas com o Trado é fazer uma perfuração que atinja a medula do tronco, pois nem todas as árvores apresentam a medula centralizada. Algumas árvores apresentam medula deslocada do centro como ilustra a Figura 22.

Figura 22 – Amostra do tronco de uma conífera que se desenvolveu em terreno acidentado.



Fonte: Fritts (1976)

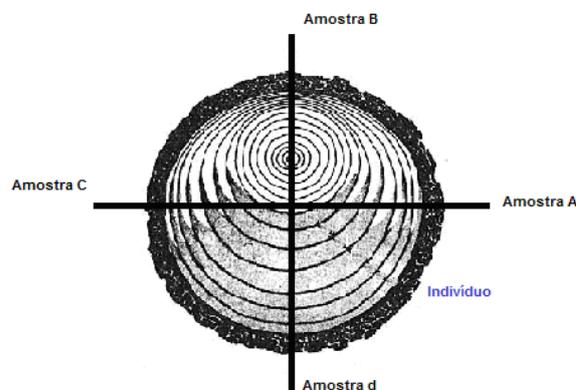
Logo, por segurança, é aconselhado que em coletas feitas com Trado se faça a extração de 4 amostras por árvore, perpendiculares entre si, para que se possa acompanhar o desenvolvimento do anel no contorno da circunferência do tronco e descartar, posteriormente e se necessário, amostras defeituosas (Figura 23).

Em situações na qual uma porção da amostra impõe muita dificuldade em se acompanhar o desenvolvimento do anel, é aconselhável que se descarte a mesma ou que se tente utilizar uma parte dela.

Após a coleta, as amostras são coladas em um suporte de madeira de modo que seus elementos anatômicos fiquem expostos no sentido longitudinal, conforme mostra a Figura 24, e então são deixadas para a secagem natural. O suporte impede que a madeira

envergue, preservando-se assim as características do lenho.

Figura 23 – Amostras extraídas de árvore viva pelo uso do Trado de Pressler.



Fonte: Modificada de Fritts (1976).

Figura 24 – Amostra do lenho de *Araucaria angustifolia* fixada em suporte de madeira para a secagem natural.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

O processo de secagem das amostras em bagueta pode durar alguns dias, dependendo das condições locais de temperatura e umidade, como também da espécie coletada. É necessário que haja o cuidado para que as amostras sequem em temperatura ambiente, pois a exposição das mesmas a temperaturas elevadas pode causar rachaduras no lenho.

## 3 Metodologia e Dados

Neste capítulo, são apresentados os métodos para tratamento das amostras, obtenção das séries temporais, bem como os métodos matemáticos empregados: correlação linear, filtragem, curva de ajuste, análise espectral, transformada de wavelets, filtros, regressão linear.

### 3.1 Amostragem e local de coleta

Foram coletadas, em janeiro de 2011, amostras do lenho de *Araucaria angustifolia* pelo método não destrutivo. Os sítios de coleta, mostrados na Figura 25 são: Fazenda Rio Grande (marcador em amarelo) e General Carneiro (marcador em azul), no Estado do Paraná, e Irani (marcador em vermelho) no Estado de Santa Catarina. A Tabela 1 apresenta informações detalhadas sobre as amostras e os locais de coleta.

Tabela 1 – Local das coletas, Altitude, Número de árvores, Número de amostras.

Local das coletas	Altitude (m)	Número de árvores	Número de amostras
Fazenda Rio Grande	915	22	76
General Carneiro	1067	22	70
Irani	1040	14	36

Fonte: Autor, 2016.

Figura 25 – Mapa com a localização dos sítios de coletas em Fazenda Rio Grande, General Carneiro e Irani.



Fonte: Google Mapas.

## 3.2 Tratamento das amostras

Para que os anéis de crescimento possam ser medidos e contados, é preciso que as amostras passem por processos de tratamento. A Figura 26 ilustra a amostra ainda no estado bruto, quando seus anéis de crescimento não podem ser nitidamente visualizados e após o tratamento com seus anéis de crescimento visíveis permitindo que sejam medidos e contados.

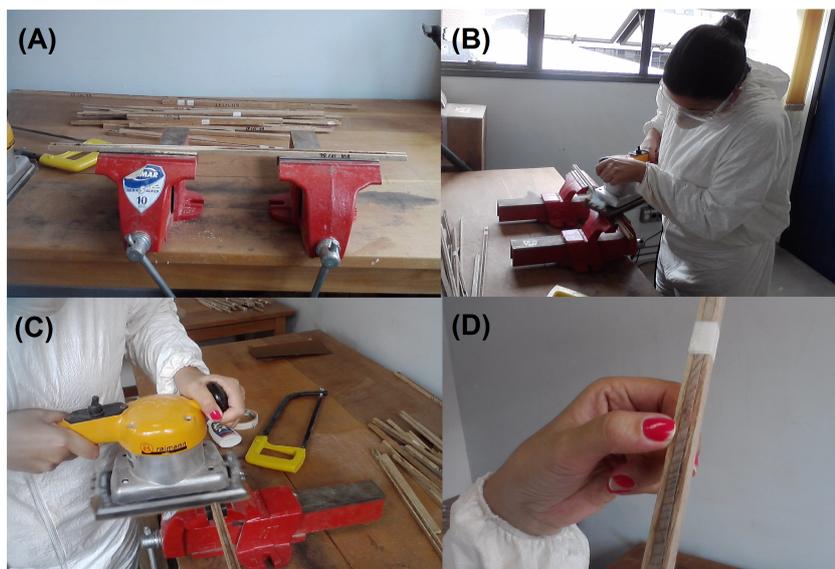
Figura 26 – (A) Amostra bruta e (B) amostra tratada podendo ter seus anéis de crescimento contados e medidos.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Após a secagem, os lenhos são submetidos a processos de lixamento para remover imperfeições e de polimento para que seus anéis de crescimento fiquem visíveis. Para isso, utilizou-se lixas de diferentes grânulos (80 a 600 grãos) acopladas a uma lixadeira elétrica (Figura 27).

Figura 27 – (A) Amostra fixada na morsa, (B) e (C) amostra sendo lixada/polida e (D) amostra com os anéis de crescimento visíveis após o tratamento.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Com os cilindros de madeira já lixados e polidos, inicia-se a marcação dos anéis na própria amostra, que é a primeira etapa para a contagem. Esta marcação pode ser feita a lápis. Medidas confiáveis são obtidas quando os limites dos anéis de crescimento são

primeiramente identificados e demarcados, além de indicar se a amostra precisa ou não de um melhor polimento (Figura 28). Essa etapa foi realizada tanto a olho nu quanto com o auxílio de uma lupa.

Figura 28 – Amostras de *A. angustifolia* com anéis de crescimento marcados a lápis.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

Durante o tratamento e a marcação dos anéis de crescimento, foi feito o controle da qualidade amostral. Nesse processo, foram descartadas as amostras que apresentavam anéis deformados ou pouco visíveis, mancha de resina, algum dano devido à coleta ou ao processo de lixamento e tudo que pudesse dificultar a contagem e medição exata dos anéis. Quando descarta-se amostras que apresentam medidas pouco confiáveis, evita-se atribuir erros à cronologia local.

### 3.3 Medição e Datação dos anéis de crescimento

As medições dos anéis de crescimento foram feitas com o auxílio da mesa de mensuração VELMEX (Figura 29), com deslocamento calibrado para a precisão de  $0,001\text{ mm}$  acoplada eletronicamente a um microcomputador e associado a um microscópio estereoscópico com retículo micrométrico. A datação seguiu o sentido casca-medula, tendo como referência a última formação completa do anel. Como as amostras foram coletadas em janeiro de 2011, supõe-se que o anel de 2010 ainda não tinha cessado seu desenvolvimento, logo, o último anel totalmente formado, correspondia ao ano de 2009.

Por meio do movimento giratório de uma manivela, a amostra é deslocada na mesa de medição, sendo demarcado, pelo retículo, o limite de cada anel de crescimento. Pressionando um botão de controle da mesa de medição, registra-se a posição inicial e a distância percorrida pela mesma, o que correspondente à largura anual do anel de

crescimento. Os valores medidos são registrados em uma planilha eletrônica como uma série temporal já relacionada ao calendário civil.

Figura 29 – Mesa de mensuração utilizada na contagem e na medição dos anéis de crescimento de árvores.



Fonte: Laboratório de Registros Naturais - UNIVAP.

As anomalias anatômicas nos anéis (como já citadas: anéis de cunha, falsos anéis, anéis deformados), deposição de resina e cicatrizes foram as principais dificuldades enfrentadas na sincronia dos anéis de *A. angustifolia*. E essas anomalias tendem a aumentar quanto maior for a idade da árvore (OLIVEIRA; ROIG; PILLAR, 2010) o que emprega em amostras mais longevas, uma maior dificuldade na contagem e na medição dos anéis de crescimento. Amostras em baguetas oferecem maior dificuldade, pela impossibilidade de se fazer o acompanhamento do anel de maneira precisa e exata como se faz com amostras em discos.

### 3.4 Construção das cronologias

Após as medições e obtenções das séries temporais de anéis de crescimento, iniciou-se o processo para se construir a série cronológica para cada indivíduo. Fez-se a correlação entre as amostras extraídas de um mesmo indivíduo e, para aquelas que apresentaram melhor coeficiente de correlação, calculou-se a média (ENQUIST; LEFFLER, 2001), obtendo-se assim uma série temporal para cada indivíduo. O processo de correlação auxilia na seleção das melhores amostras. Àquelas séries dendrocronológicas que apresentaram baixa correlação, evidenciando pouca similaridade em seus crescimentos, foram descartadas como foi sugerido por Flower e Smith (2010).

Na correlação entre as amostras de cada árvore, se manteve na cronologia apenas àquelas que apresentaram correlações superiores a  $r = 0,20$ . Com estas, fez-se a média obtendo-se, a seguir, uma cronologia para cada indivíduo.

### 3.5 Padronização

É conhecido que uma série de anéis de árvores é capaz de comportar um conjunto de fatores ambientais que podem ter ou não participação no modelo de crescimento da planta (RIGOZO, 1999). Alguns desses fatores implícitos na série temporal de anéis de crescimento, podem se mostrar como ruídos ou como sinal, dependendo do tipo de estudo que se quer estabelecer. Para Alvarado (2009), sinal é a informação relevante de uma variável, por exemplo, que está contida nos anéis de crescimento e é importante para o estudo em questão, ao passo que o ruído seria uma informação também presente na série de anéis de crescimento, mas que é irrelevante para o estudo. Uma série de anéis de crescimento é composta por um agregado de agentes e, dependendo da espécie e da condição do ambiente, alguns desses agentes podem prevalecer mais que outros. Este conjunto de fatores pode ser a tendência de crescimento, clima, eventos intrínsecos e extrínsecos à floresta, os processos aleatórios (ruídos) e etc (COOK; KAIRIUKSTIS, 1989). Logo, uma série dendrocronológica pode conter um conjunto de todos esses sinais, como mostra a Equação 2:

$$C_{at} = A_t + B_t + C_t + D_t + E_t \quad (2)$$

Em que:  $C_{at}$  é o crescimento do anel em um ano (t) qualquer;  $A_t$  é a tendência de crescimento com a idade da árvore;  $B_t$ , o clima;  $C_t$ , processos de distúrbios dentro da floresta;  $D_t$ , a processos de distúrbios fora da floresta;  $E_t$ , processos aleatórios (ou ruídos).

Para que se elimine as tendências indesejáveis ao foco da pesquisa, foram aplicadas funções de ajuste nas séries dendrocronológicas (TROVATI; FERRAZ, 1986). Após obter a melhor curva que represente as propensões de longos períodos associadas ao ritmo de crescimento de cada série (FICHTLER et al., 2004), subtraiu-se as tendências de cada série de anéis de árvores, tendo como resultado as cronologias da variação da largura dos anéis com relação as suas tendências. A remoção da tendência nas séries de anéis de crescimento, transformando-as em séries estacionárias e comparáveis entre si, é um dos passos para a padronização (DELGADO, 2000).

As funções de ajuste utilizadas na padronização foram a linear, a polinomial de grau 2 e a polinomial de grau 3, selecionadas entre aquelas que apresentaram melhor correlação com a série dendrocronológica, conforme sugerido por Savva et al. (2002). Dessa forma, consegue-se respeitar as particularidades de crescimento de cada amostra, assim como a persistência dos sinais climatológicos.

Com as séries dendrocronológicas sem tendências, fez-se a análise espectral em cada uma delas (como será mostrado na seção seguinte), a correlação de Pearson e a média para a obtenção da cronologia local, ou seja, a série temporal que representa o local de estudo.

Obteve-se, desta mesma forma, uma cronologia local para cada um dos três sítios de

coletas. Segundo Trovati e Ferraz (1986), a média entre as árvores oferece melhor relação com o clima, pois o sinal climático que influenciou no crescimento de todos os indivíduos se mantém quando a média é feita.

Todos os procedimentos empregados até a obtenção da cronologia local visaram selecionar amostras que tenham perfis de crescimento semelhantes. Aquelas que responderam ao ambiente em que viveram de maneira similar podem representar juntas a localidade de estudo.

## 3.6 Métodos Matemáticos e Computacionais

### 3.6.1 Análise espectral

A análise espectral é uma técnica matemática muito utilizada no estudo de séries temporais. É aplicado em praticamente todas as áreas do conhecimento humano ou, pelo menos, àquelas em que é possível obter séries que carreguem alguma informação ou descrevem fenômenos desta área. Pode-se dizer que a análise espectral é multidisciplinar (RIGOZO et al., 2005).

O método da regressão iterativa foi descrito na sua forma geral por Wolberg (1967) e posteriormente aperfeiçoado e adaptado em linguagem C por Rigozo (1994). Para Rigozo e Nordemann (1998), o Arist (Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais) é um método que pode ser aplicado ao ajuste de qualquer função (derivável em relação aos parâmetros e variáveis) a dados experimentais, sem necessidade de linearização previa. Este método utiliza uma função senoidal  $F$  na qual  $Y$  é o sinal medido,  $t$  é o tempo e os parâmetros desconhecidos são:  $a_0$  (amplitude),  $a_1$  (frequência angular) e  $a_2$  (fase), (Equação 3):

$$F = Y - a_0 \sin(a_1 t + a_2) \quad (3)$$

Para a cronologia de cada indivíduo foi aplicada a análise espectral pela busca de períodos correspondentes ao foco do estudo. Àquelas cronologias que não apresentaram periodicidades foram eliminadas para que não “mascarasse” os espectros na cronologia local.

### 3.6.2 Análise por Ondaletas (*Wavelets*) e o Filtro Passa-Banda

Ondaletas ou *wavelets* (como é melhor conhecida) são ferramentas matemáticas muito utilizadas na análise de sinais em séries temporais. Elas são capazes de identificar periodicidades nas séries assim como sua evolução no tempo (RIGOZO et al., 2012). É possível localizar, no tempo, a variabilidade de energia dentro da série temporal e em quais

bandas de frequências essa variabilidade ocorre (BARBOSA; BLITZKOW, 2008).

Neste estudo, usou-se a função complexa de Morlet, uma função plana modulada por uma função gaussiana. É recomendada para a detecção de periodicidades em sinais contínuos ao longo do tempo cujas variações de frequências são mais suaves, como nas séries temporais geofísicas (RIGOZO et al., 2007). Esta função faz o estudo das mudanças de amplitude e fase em séries temporais por meio da decomposição do sinal analisado em diferentes níveis de frequência (multiresolução) (BARBOSA; BLITZKOW, 2008).

A wavelet cruzada entre as séries dendrocronológicas e a série do número de manchas solares mostra onde há periodicidades comuns entre as duas séries e como esses sinais evoluem no tempo. Como forma de se obter mais informações a respeito dos sinais presentes na séries temporais, fez-se o uso do filtro Passa-Banda. Aplicou-se filtros dentro da banda de sinal mostrada nas wavelets nas duas séries temporais e analisou-se o comportamento conjunto destas variáveis no tempo. Esse procedimento é importante, pois torna possível comparar como os sinais embutidos nas séries se comportaram ao longo do tempo. De maneira geral, séries que mostram-se em fase ou em oposição de fase no decorrer do tempo não significam causa e efeito, mas conhecendo-se as séries envolvidas e o momento em que elas apresentam este comportamento é possível identificar possíveis causas.

### 3.6.3 Correlação e Regressão Linear

O instrumento que mede o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias é o Coeficiente de Correlação de Pearson. A Equação 4 calcula a correlação entre as variáveis  $x$  e  $y$  sendo  $n$  o número de observações.

$$r(x, y) = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}] [\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}]}} \quad (4)$$

Este coeficiente indica a intensidade da correlação entre as variáveis  $x$  e  $y$ , (por exemplo) além de informar se a correlação é positiva ou negativa, por meio do sinal de  $r$ . Os valores de  $r$  variam entre -1 e +1, sendo que valores mais próximos de zero indicam que a correlação é fraca ou, se for zero, não há correlação entre as variáveis. Nas extremidades, valores próximos a +1 indicam correlação forte e positiva, ou seja, ambas as variáveis se deslocam no mesmo sentido se estiverem plotadas em um gráfico. Ao passo que valores próximos de -1 indicam exatamente o oposto.

A interpretação dos valores das correlações exige certo cuidado e conhecimento a respeito das variáveis envolvidas. Resultados de correlação são puramente matemáticos, ou seja, podem não significar causa e efeito e sim apenas uma tendência que os pares de variáveis apresentam quanto a sua variação conjunta.

Outra maneira de se conhecer a relação entre duas variáveis é por meio da Reta de

Regressão que as relaciona diretamente, sendo uma delas a variável dependente e a outra a independente. A reta que estipula essa relação é a Equação da Reta (Equação 5).

$$Y = \alpha x + \beta \quad (5)$$

Esta técnica consiste em estimar os parâmetros  $\alpha$  (coeficiente linear) e  $\beta$  (coeficiente angular) a partir da relação linear apontada entre as retas formadas pelas duas séries temporais em estudo.

Além disso, é possível medir a contribuição de uma variável com relação a previsão da outra por meio do coeficiente de determinação. Este coeficiente indica a proporção da variação total explicada pela regressão linear (VIEIRA, 2003).

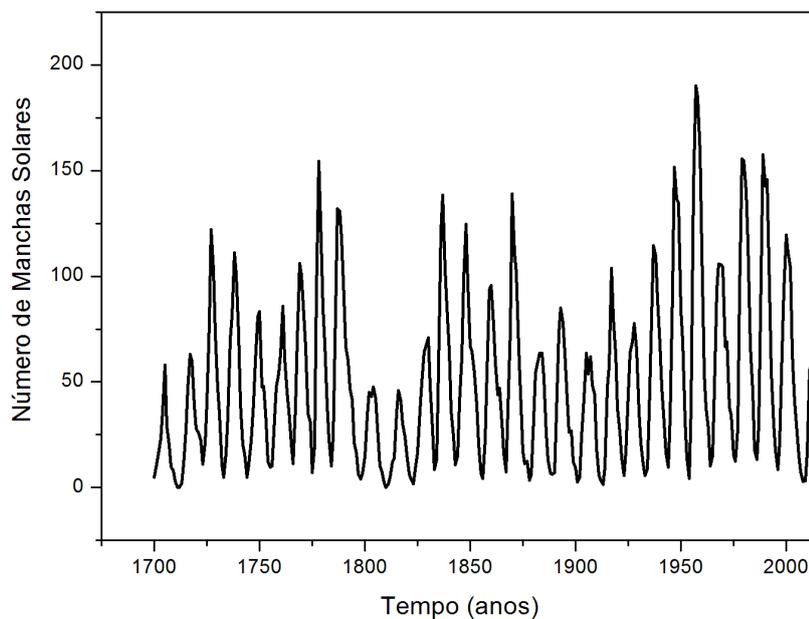
## 3.7 Séries Temporais

Nesta seção são apresentadas as séries temporais geofísicas e climatológicas que foram utilizadas na pesquisa.

### 3.7.1 Série do Número de Manchas Solares (SSN)

A Figura 30 apresenta a série anual do Número de Manchas Solares (1700-2009), obtidas de National Geophysical Data Center (NGDC).

Figura 30 – Série anual do Número de Manchas Solares (SSN).



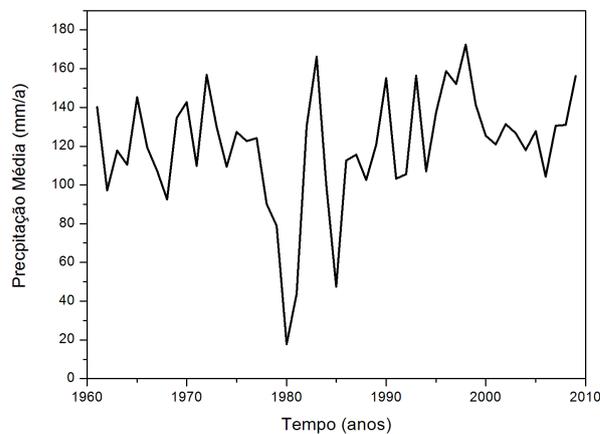
Fonte: National Geophysical Data Center.

### 3.7.2 Precipitação e temperatura de Curitiba

Devido ao fato de Fazenda Rio Grande não possuir séries climatológicas históricas, utilizou-se séries de precipitação e temperatura de Curitiba, distante, aproximadamente, 30 km do sitio de coleta. Essas séries climatológicas foram obtidas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

A Figura 31 apresenta a série temporal de precipitação para Curitiba/PR, cobrindo o período de 1961-2009. Essa série de precipitação média anual foi obtida a partir dos dados mensais de precipitação.

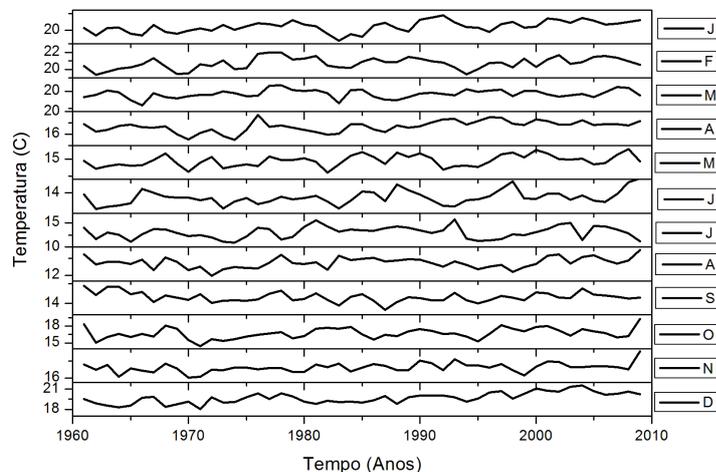
Figura 31 – Série temporal da precipitação média anual para Curitiba entre 1961-2009. Média obtida a partir dos valores mensais.



Fonte: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

A Figura 32 apresenta as séries de temperatura de Curitiba para cada mês. Fez-se a exposição da série de temperatura para cada mês de modo que a sazonalidade não ficasse "mascarada" pelas médias.

Figura 32 – Série de temperatura média mensal para Curitiba entre 1961-2009.



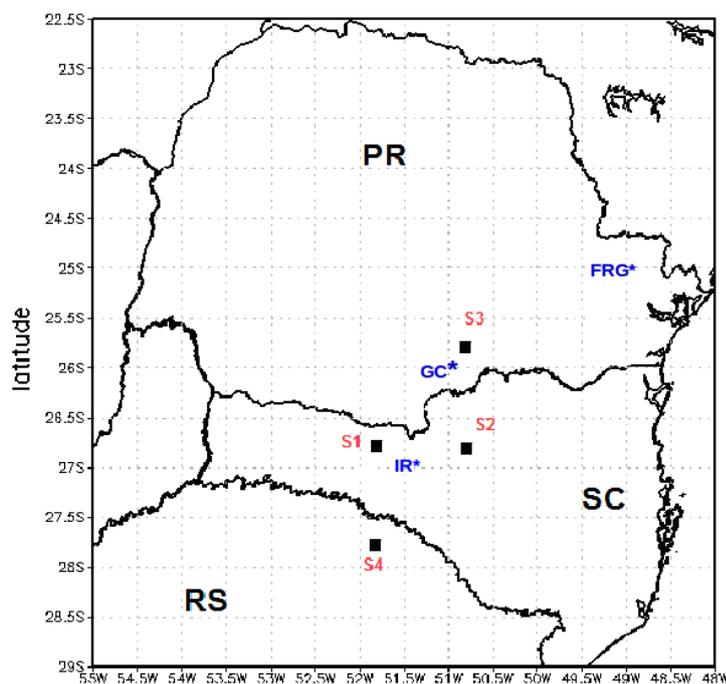
Fonte: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

### 3.7.3 Precipitação e Temperatura de General Carneiro e de Irani

Para realizar o estudo dendroclimático de General Carneiro e Irani, foi necessária a obtenção de séries históricas de precipitação e de temperatura para essas localidades. Como não há séries históricas disponíveis, esses dados foram obtidos a partir das faixas de latitude pelo método de reanálise. Os dados foram extraídos de Earth System Research Laboratory (em: <http://www.esrl.noaa.gov>), com resolução espacial de, aproximadamente, 50 km de distância (com 0,5° de latitude e 0,5° de longitude). A série de temperatura cobre o intervalo de 1948-2010 e a de precipitação o intervalo de 1901-2010.

Foram selecionados 4 pontos para extração dos dados de forma que abrangessem a localização de GC e IR (S1, S2, S3 e S4), como é mostrado no mapa da Figura 33. Identificou-se cada série por S1, S2, S3 e S4 para melhor identificar quais foram os pontos utilizados no estudo de cada sítio de coleta. Para tal, fez-se uma média entre as séries S3 e S2 e correlacionou-se com a série dendrocronológica de General Carneiro e a média entre as séries S1 e S4 foi correlacionada com a série de Irani.

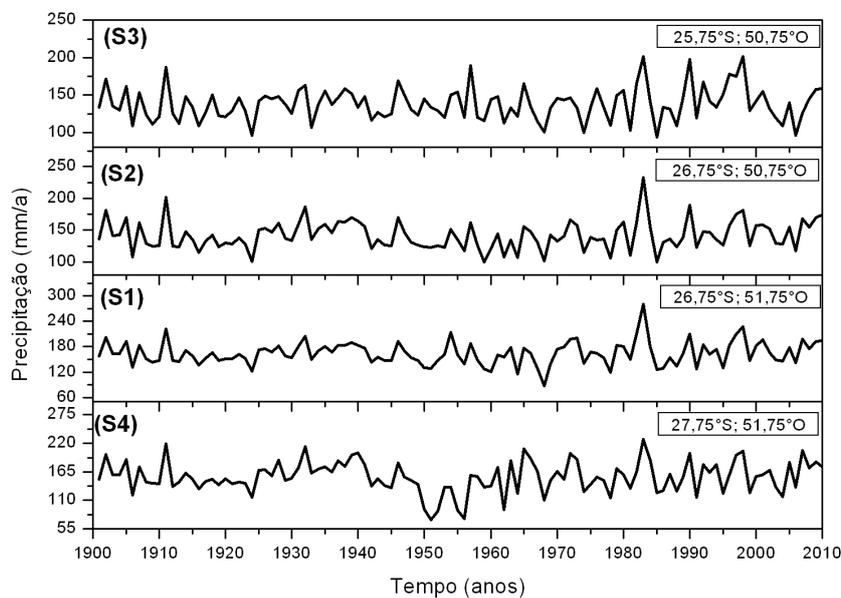
Figura 33 – Pontos em preto mostram a localização dos dados de precipitação e de temperatura. Em azul são os locais de coleta das amostras do lenho.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 34 apresenta as séries médias mensais de precipitação para cada uma das quatro coordenadas mostradas no mapa da Figura 33.

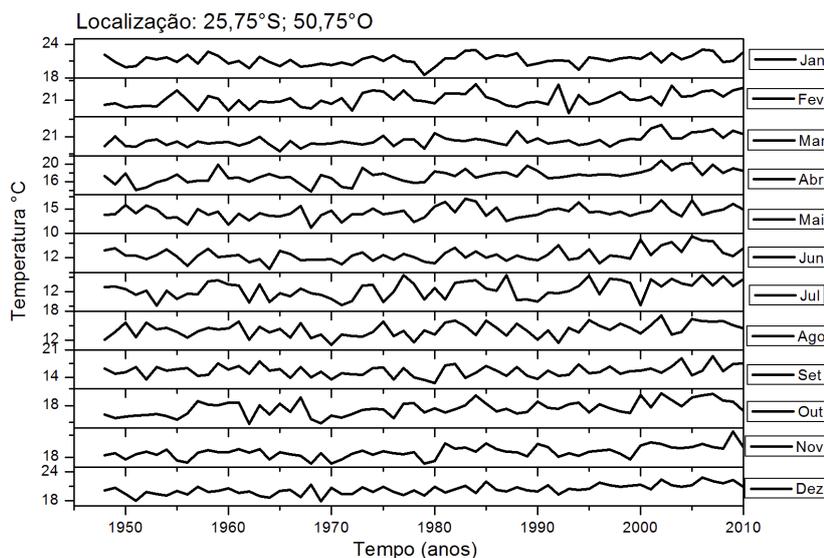
Figura 34 – Séries de precipitação média anual para as quatro coordenadas mostradas no mapa da Figura 29.



Fonte: Earth System Research Laboratory.

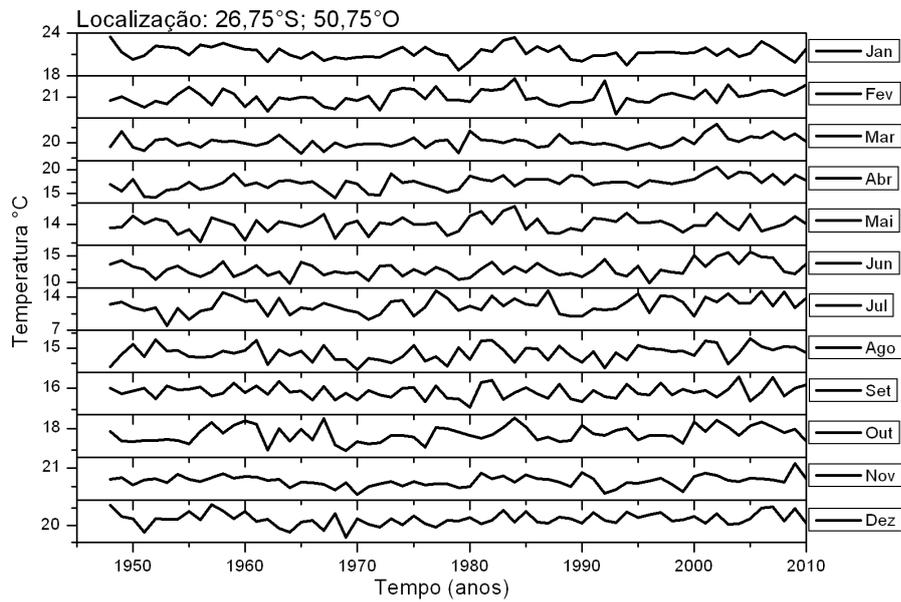
As séries de temperatura média mensal para cada coordenada são mostradas na Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38. Analogamente a Curitiba, as séries são mostradas mês a mês. Com estas séries temporais realizou-se as investigações dendroclimatológicas para cada um dos sítios de coleta.

Figura 35 – Série de temperatura média mensal para cada mês correspondente à coordenada 25,75°S; 50,75°O (S3).



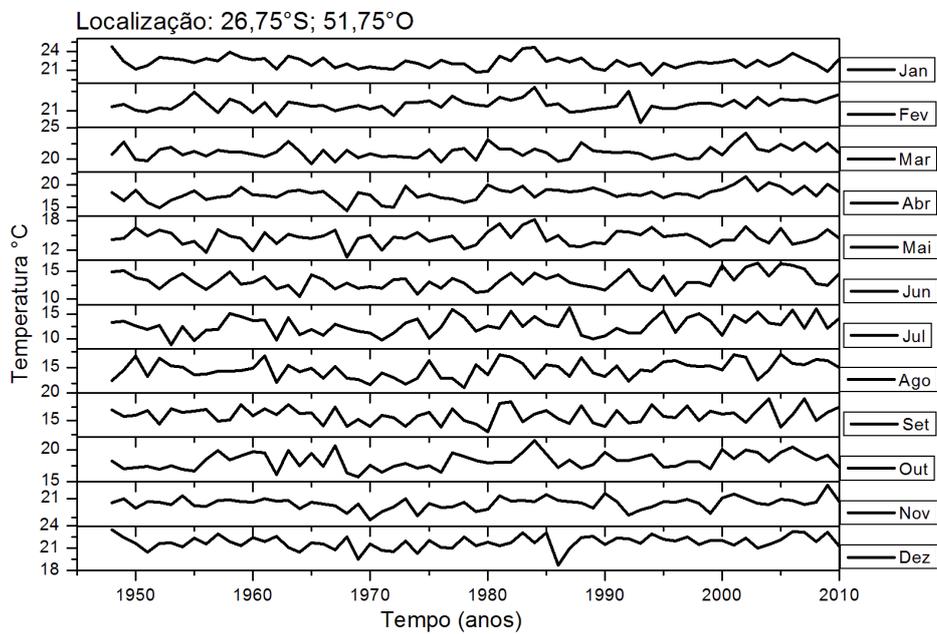
Fonte: Earth System Research Laboratory.

Figura 36 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 26,75°S; 50,75°O (S2).



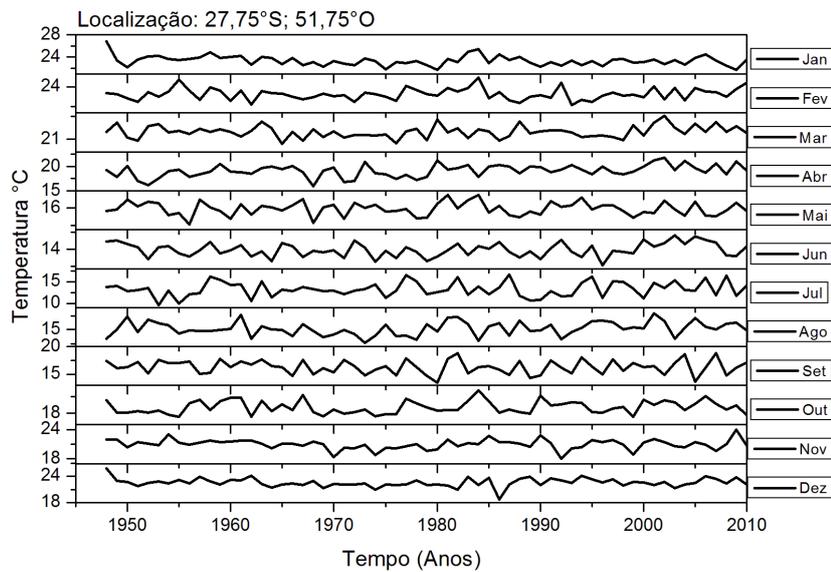
Fonte: Earth System Research Laboratory.

Figura 37 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 26,75°S; 51,75°O (S1).



Fonte: Earth System Research Laboratory.

Figura 38 – Série de temperatura para cada mês correspondente à coordenada 27,75°S; 51,75°O (S4).

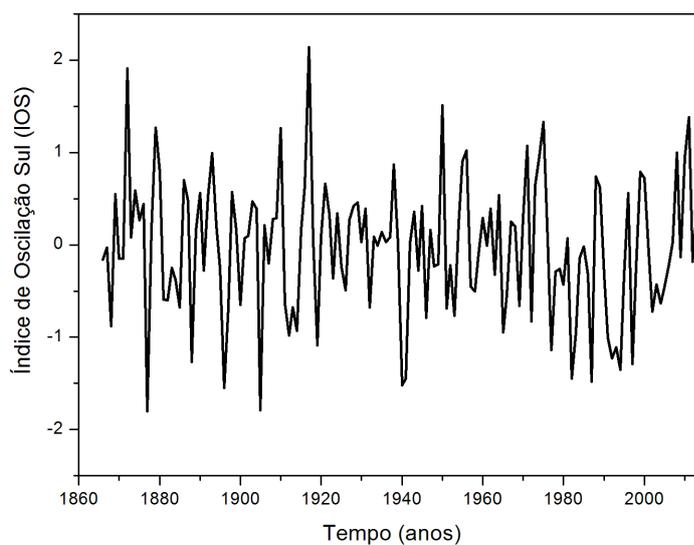


Fonte: Earth System Research Laboratory.

### 3.7.4 Série temporal do Índice de Oscilação Sul (IOS)

O Índice de Oscilação Sul é o valor que mede a fase e a intensidade do Enos (CANE, 2005). Neste estudo, fez-se o uso de dados mensais do Índice de Oscilação Sul (IOS) de 1876-2009 extraídos de Climatic Research Unit - University of East Anglia (em: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/>). Com os dados mensais, fez-se a média e obteve-se a série anual do IOS (Figura 39).

Figura 39 – Série temporal do Índice de Oscilação Sul (IOS) médio anual a partir da média entre os dados mensais.



Fonte: Climatic Research Unit - University of East Anglia.

### 3.8 Dendroclimatologia

Foi realizado um estudo dendroclimátológico para as localidades de GC, FRG e IR. Para isso correlacionou-se cada uma das séries dendrocronológicas com as séries de precipitação e temperatura local. Fez-se a correlação dos anéis de crescimento com cada um dos meses de toda a série temporal (por exemplo, precipitação/temperatura de todos os janeiros, de todos os fevereiro...). Esta investigação tem por objetivo saber como as variáveis climatológicas de determinado mês influenciam no desenvolvimento cambial das árvores.

Devido ao período de crescimento das árvores do hemisfério sul ser da primavera do ano T ao outono do ano T + 1, abrangendo dois anos do calendário civil, as análises de correlação consideraram o período de formação do anel (CUSATIS et al., 2013), o que se chamou de Ano T.

A finalidade dessa investigação é conhecer se há registros do clima local no crescimento das plantas e, se houver sinais, como eles se apresentam no decorrer dos meses e como podem ser utilizados em estudos climatológicos e, dependendo das respostas, em reconstruções do clima.

### 3.9 Reconstrução da precipitação

Selecionou-se, entre as amostras de FRG, aquelas com idades aproximadas entre si em consideração aos momentos fisiológicos distintos apresentados pelas plantas no decorrer de sua existência. Analogamente a Flower e Smith (2010), que para sua investigação dendroclimátológica, optaram por árvores com mais de 160 anos.

Com 32 amostras de 8 árvores construiu-se uma cronologia cobrindo o período de 1907-2009. Com esta cronologia, procurou-se analisar a influência das variáveis climatológicas no crescimento das árvores. Para isso, foi feita a correlação entre a série dendrocronológica e a série de precipitação média anual e média mensal e também a série de temperatura em escala mensal e sazonal de Curitiba entre 1961-2009. Esse procedimento visa conhecer padrões ou tendências no crescimento anual das plantas que podem ocorrer em determinados períodos do ano. Investigou-se também o crescimento das árvores para o ano T (ano corrente) e ano T-1 (ano anterior). Consideraram-se significativas as correlações cujos coeficientes atingiram 95% de confiança ( $p < 0,05$ ).

Com base nos resultados das correlações e por meio de Regressão Linear, reconstruiu-se o perfil da precipitação para os meses de crescimento das plantas podendo este ser estendido para o intervalo de 1907-2009.

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 2. Dentre os resultados, estão as cronologias de anéis de crescimento de cada localidade, a análise espectral, as transformadas de wavelets e as correlações. Todos os resultados estão fundamentados com base em trabalhos prévios disponíveis na literatura.

### 4.1 Construção das Cronologias

Após o trabalho de controle de qualidade amostral e de padronização entre as séries dendrocronológicas, selecionaram-se as que apresentaram melhor correlação e se construiu as cronologias locais. Como pode ser visto na Tabela 2, houve diminuição na quantidade de amostras que compõe a cronologia local comparada ao número inicial. A diminuição amostral é bastante comum, em especial com espécies como a *A. angustifolia* que apresenta estrutura difícil de ser datada. Oliveira, Roig e Pillar (2010), em um estudo feito com esta mesma espécie, das 60 amostras coletadas apenas 35 foram datadas e os autores alegaram dificuldades na medição e na contagem dos anéis devido a anatomia irregular do lenho.

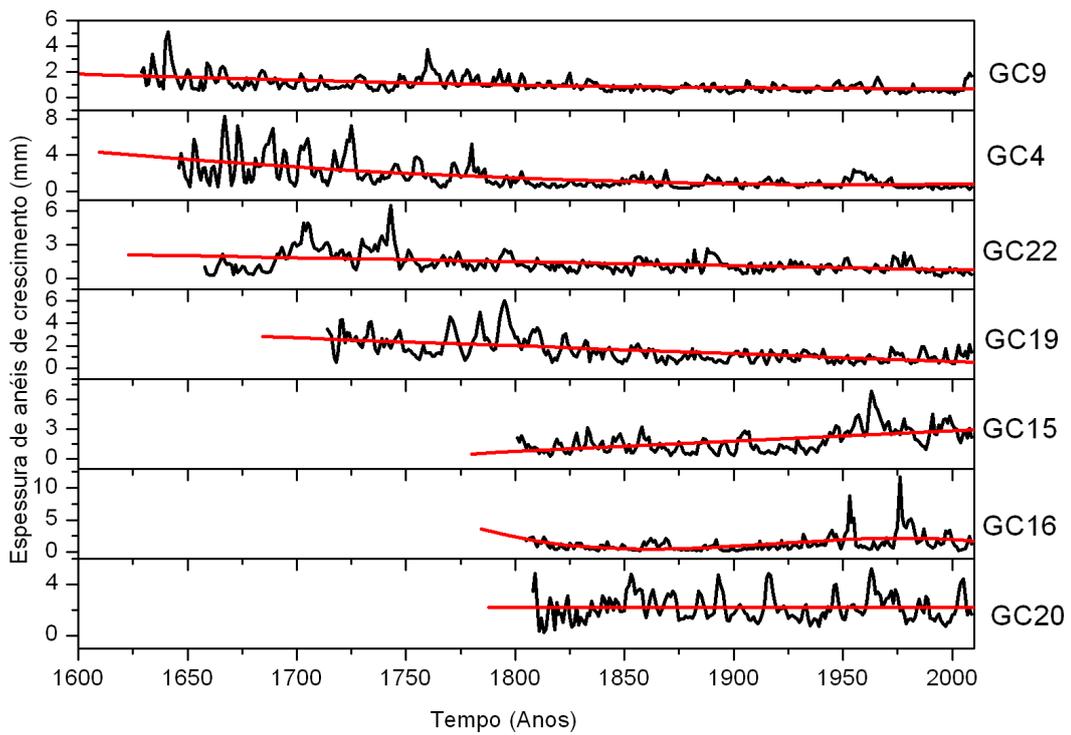
Tabela 2 – Quantidade amostral que compõe a cronologia de cada sítio.

Local das coletas	Número de Indivíduos	Quantidade Amostral	Tamanho das Séries	Quantidade de anéis analisados
Fazenda Rio Grande	6	9	1620-2009	9.000
General Carneiro	7	16	1629-2009	15.000
Irani	6	11	1727-2009	5.207

Fonte: Autor, 2016.

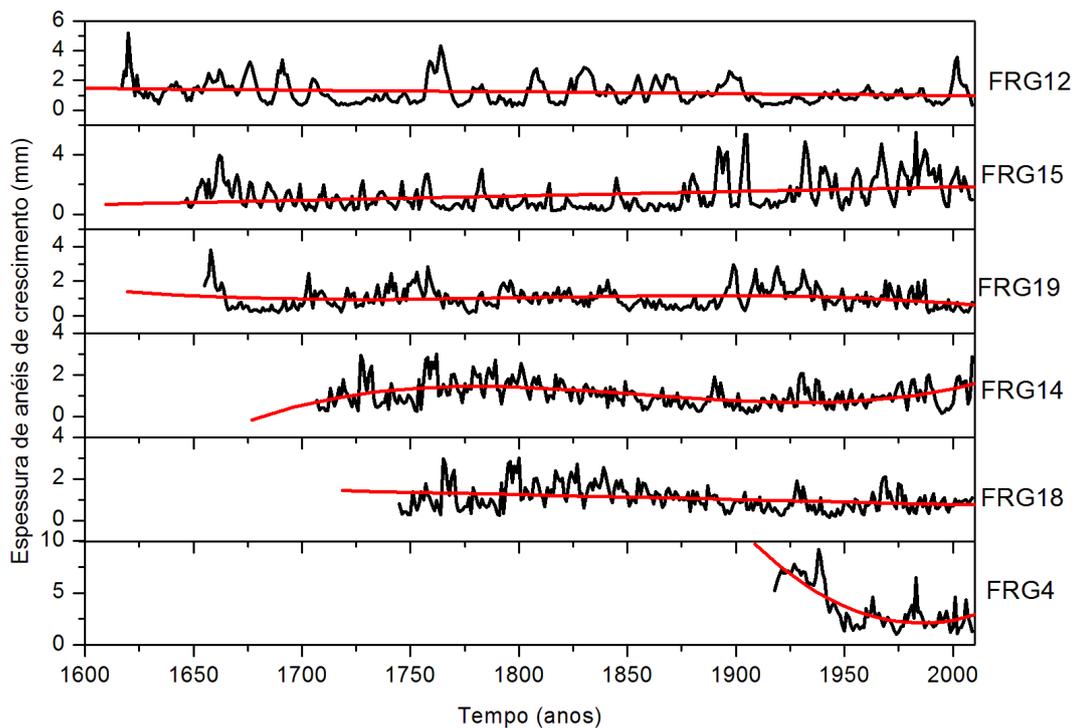
Conforme o processo de padronização, descrito na Seção 2.5, para cada uma das cronologias foi aplicada uma função de ajuste que representa as tendências particulares de crescimento. As Figuras a seguir mostram as cronologias de cada localidade e as curvas de tendência para General Carneiro (Figura 40), Fazenda Rio Grande (Figura 41) e Irani (Figura 42).

Figura 40 – As espessuras de anéis de crescimento das 7 cronologias de GC (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho).



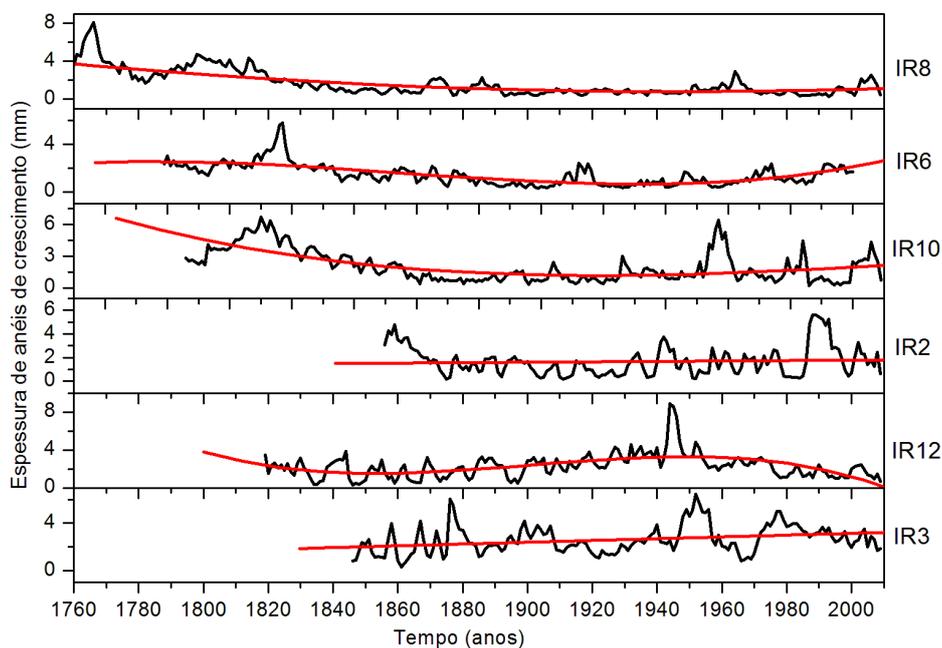
Fonte: Autor, 2016.

Figura 41 – As espessuras de anéis de crescimento das 6 cronologias de FRG (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho).



Fonte: Autor, 2016.

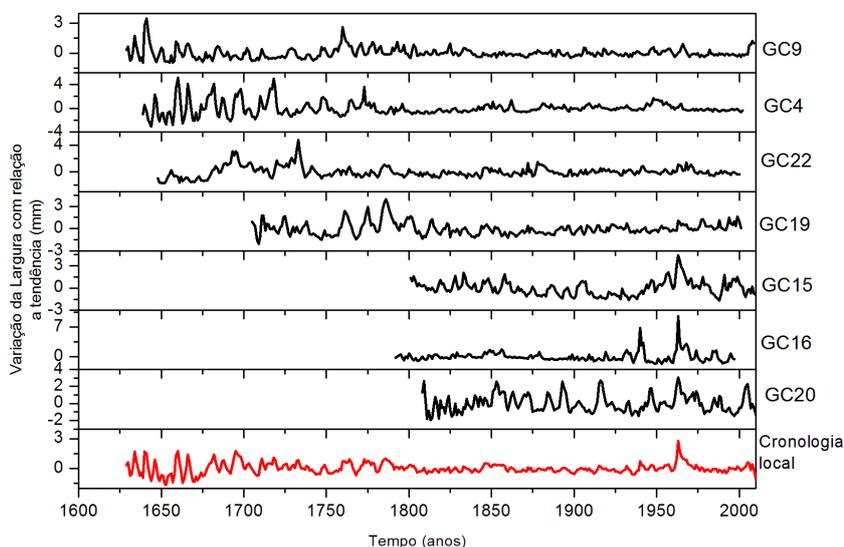
Figura 42 – As espessuras de anéis de crescimento das 6 cronologias de IR (curvas em preto) e suas tendências (curvas em vermelho).



Fonte: Autor, 2016.

Cada curva de tendência foi subtraída da série cronológica e, a seguir, fez-se a média com essas curvas sem tendência, obtendo-se a cronologia média simples. Essa curva resultante da média entre as curvas sem a tendência é a cronologia local, isto é, a série dendrocronológica que representa o local de coleta. É com essa série temporal que todo o estudo é desenvolvido. O gráfico da Figura 43 mostra as 7 cronologias para General Carneiro sem a tendência (curvas em preto) e a cronologia local (curva em vermelho).

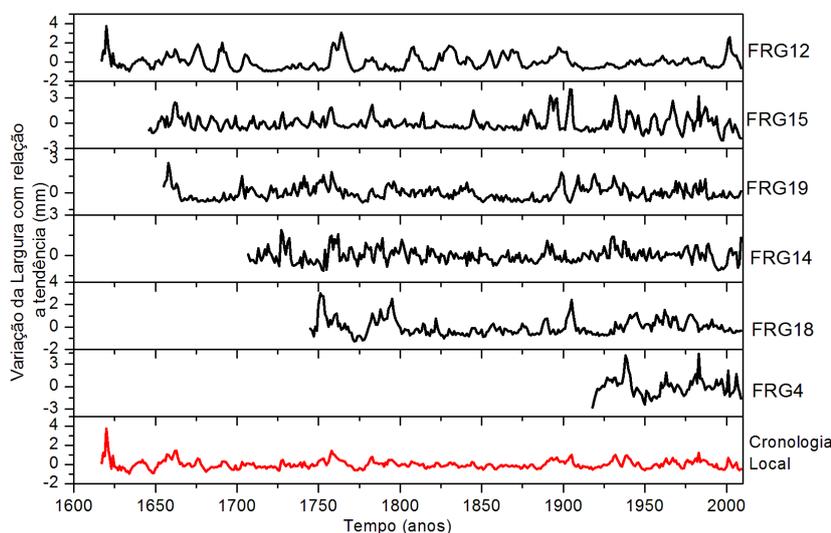
Figura 43 – Cronologias de GC (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 7 cronologias.



Fonte: Autor, 2016.

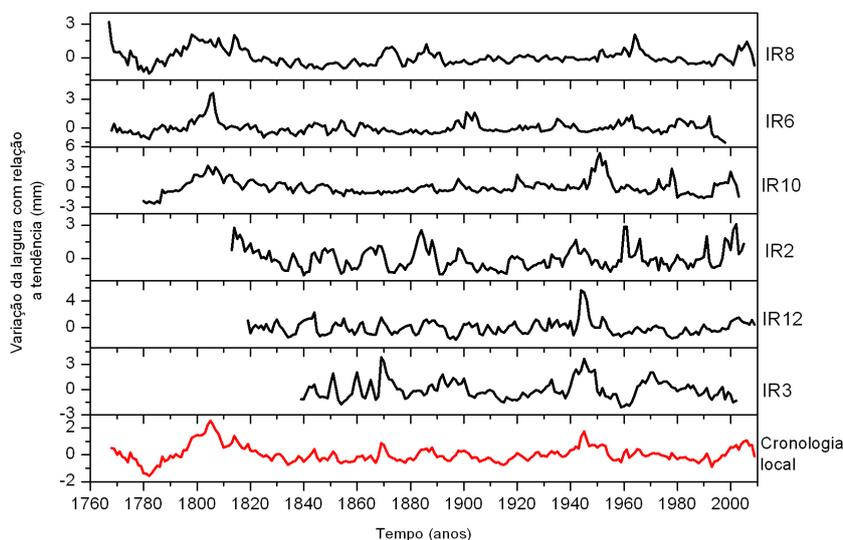
Analogamente, obteve-se a cronologia para Fazenda Rio Grande (Figura 44) e Irani (Figura 45).

Figura 44 – Cronologias de FRG (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 6 cronologias.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 45 – Cronologias de IR (curvas em preto) e a cronologia média do local (curva em vermelho), obtida a partir da média entre as 6 cronologias.



Fonte: Autor, 2016.

As curvas em vermelho nas Figuras 38, 39 e 40 são as séries dendrocronológicas de cada região de estudo obtidas a partir da média entre as séries coletadas no mesmo sítio. Todos os estudos são feitos nestas séries e seus resultados atribuídos aos locais de coletas na qual elas pertencem.

## 4.2 Análise Espectral

Análise espectral foi aplicada, primeiramente, para cada uma das séries cronológicas com a finalidade de investigar se as periodicidades estudadas estão presentes em todas as séries que compõe a cronologia média.

### 4.2.1 Análise espectral para cada cronologia

As Figuras 46, 49 e 52 mostram os espectros para cada uma das séries cronológicas que compõe a série média de cada localidade. Destacou-se nos gráficos os intervalos em que ocorreram as periodicidades de interesse no estudo. De acordo com a literatura, dentro da delimitação em azul estão os sinais referentes ao Enos (períodos de 2 - 7 anos), no vermelho ao Ciclo de Schwabe (em torno de 8 - 14 anos), no verde ao Ciclo de Hale (20 - 29 anos) e no lilás períodos maiores que 28 anos, nos quais podem estar relacionados ao Ciclo de Brückner (35 - 45 anos) e ao Ciclo de Gleissberg (60 - 90 anos) (HOYT; SCHATTEN, 1997; PRESTES, 2006) .

Períodos relacionados aos ciclos de atividade solar já foram relatados em diversos estudos feitos com amostras de *A. angustifolia* coletadas no Sul do Brasil. Prestes et al. (2011), com amostras de Severiano de Almeida/RS, Nordemann, Rigozo e Faria (2004), em Concórdia/SC, Rigozo e Nordemann (2000), em São Francisco de Paula/RS. Dentre os períodos encontrados nesses trabalhos, há maior ocorrência de sinais relacionados ao ciclo de 11 anos e 22 anos, embora os autores tenham relatado a ocorrência de períodos relacionados ao ciclo de Gleissberg e também a eventos climáticos como o El Niño Oscilação Sul (Enos).

Em outros locais do planeta, trabalhos dendrocronológicos feitos com outras espécies arbóreas também relataram evidências da atividade solar nos anéis de crescimento das árvores. Mori (1981), encontrou períodos de 11 anos nos espectros para os anéis de crescimento de árvores da espécie *Formosan cypress*, coletadas em Formosa. Além de periodicidades em torno de 11 anos, períodos de 6 e 45 anos também foram relatados pelo autor. Muraki et al. (2011), estudando séries de anéis de crescimento de 391 anos de cedro coletadas no Japão, encontraram sinais de 12 anos e 25 anos nessas séries. Os autores concluíram que pode haver influência da atividade solar na taxa de crescimento das árvores. Periodicidades entre 20 e 28 anos foram registradas por Vincent et al. (2007), que utilizaram amostras de *Araucaria columnaris* da Nova Caledônia. Os autores também encontraram curtos períodos em suas séries dendrocronológicas e os relacionaram a eventos de Enos. Raspopov et al. (2000), estudando anéis de árvores da Península Kola (Rússia) e da Escandinávia (Finnish Lapland), registraram períodos que evidenciam sinais do ciclo de Schwabe, Ciclo de Hale, Ciclo de Gleissberg, além de períodos em torno de 35 anos que os autores associaram ao Ciclo de Brückner. Ainda, segundo os pesquisadores, periodicidades entre 30-45 anos foram reveladas, pela primeira vez, por Brückner em 1890

e desde então essa banda de sinal ficou conhecida como Ciclo Climático de Brückner. Wang e Zhang (2011), com amostras das montanhas do Tibet, por meio de análise espectral, encontraram períodos de 5,3-5,1; 11,2-11,1; 20,5; 73 e 204 entre outros e atribuíram esses períodos ao segundo harmônico do ciclo de Schwabe, Hale, Gleissberg e Ciclo de Suess, respectivamente.

Além de amostras do presente, trabalhos feitos com fósseis de madeira também apresentaram sinais do ciclo solar. Raspopov et al. (2011), utilizaram fósseis de, aproximadamente, 70 milhões de anos (380 anéis) e 12 milhões de anos (120 anéis) de coníferas e aplicaram técnicas semelhantes às aplicadas nesse estudo. Os autores encontraram períodos que variam de 4 anos a 31 anos (para a amostra de 12 milhões de anos) e de 8 a 120 anos (para a amostra de 70 milhões de anos) e os relacionaram aos ciclos solares. Prestes (2006), analisando fósseis do triássico oriundos da cidade de Mata/RS, que cobriam intervalos de 28 a 159 anos, apontou a ocorrência de sinais do ciclo de 11 anos, 22 anos além de sinais de eventos climáticos nas suas séries dendrocronológicas.

Evidências de que o lenho das árvores registra sinais do ciclo solar já foram levantadas em trabalhos mais antigos de dendrocronologia, porém, nem todos os autores conseguiram dar um embasamento satisfatório aos seus resultados. Douglass (1933) relatou que havia maior crescimento dos pinheiros da Europa durante os períodos de máximo solar. As árvores que cresceram na Alemanha também apresentaram períodos em torno de 11 anos quando o autor integrou a curva de crescimento destas. Para o autor, houve também sinais que podem estar relacionados ao ciclo solar em amostras de lenho coletadas no Arizona. No entanto, na época em que o artigo foi publicado a dendrocronologia estava começando a tornar-se uma ciência sólida e isso fez com que os resultados de Douglass (1933) assemelhassem-se mais a meras especulações. Com o passar dos anos veio também a continuidade e fortalecimento deste ramo de pesquisa e os resultados de Douglass se tornaram de fundamental importância como também fonte de referência para outros estudos. Anos mais tarde, LaMarche e Fritts (1972) registraram os mesmos períodos em anéis de crescimento coletados no oeste da América do Norte. Analogamente, Murphy (1990), em um estudo com amostras da Austrália, encontrou períodos de 11 anos e 22 anos com significância de 95%, mas o autor, na época, não pode afirmar se os sinais seriam de fato evidências do ciclo solar atuando no crescimento das plantas.

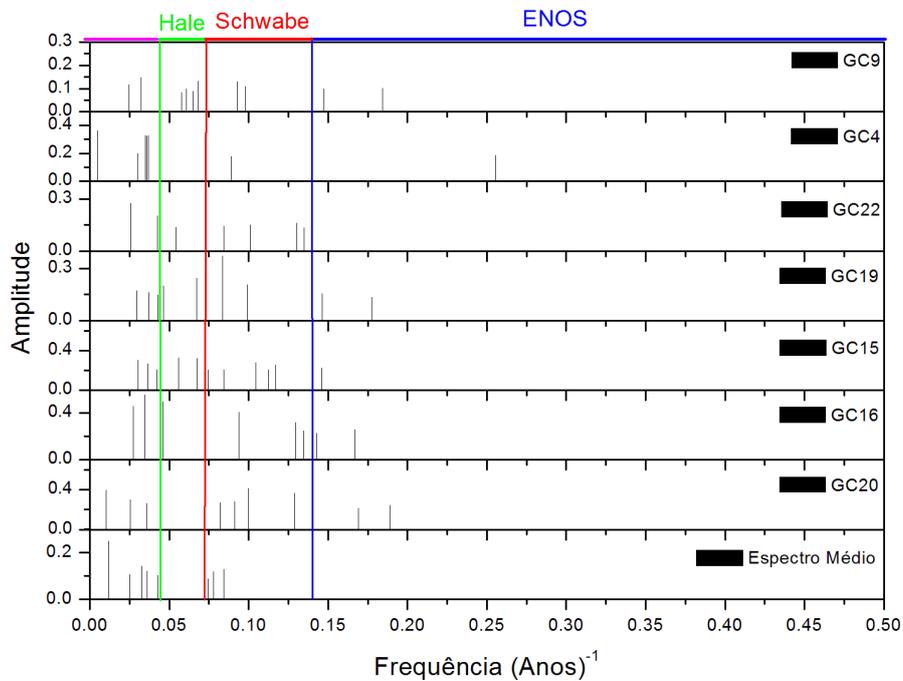
Os resultados da análise espectral feita para cada uma das localidades mostram apenas os espectros que atingiram o limiar de 95% de confiança.

#### 4.2.1.1 General Carneiro

A Figura 46 apresenta a análise espectral feita para cada uma das cronologias de General Carneiro, na qual apenas os sinais que atingiram 95% de confiança são mostrados. Há períodos relacionados ao Enos (2-7 anos), ao ciclo de Schwabe (8-14 anos), ao ciclo de Hale (20-29 anos) e também a longos períodos em todas as cronologias.

Períodos relacionados aos eventos de Enos ocorrem esparsamente em quase todas as cronologias e no espectro para a cronologia média podem ter sido atenuados de tal forma que não atingiram os 95% de confiança.

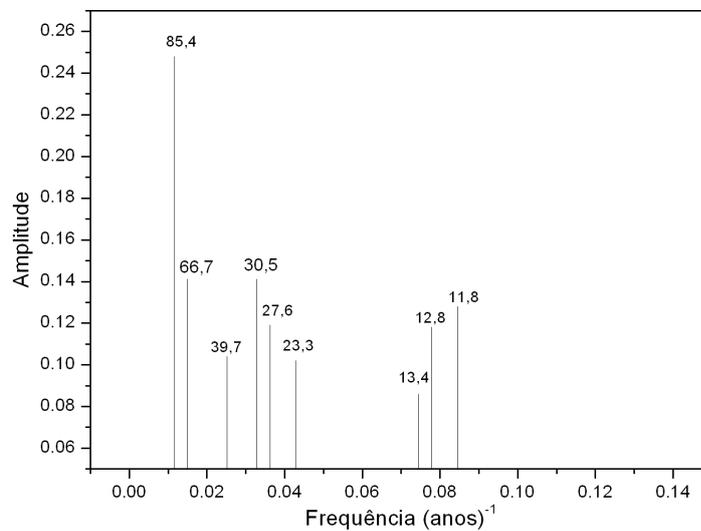
Figura 46 – Espectros para as 7 cronologias de GC e o espectro para a cronologia média.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 47 mostra, mais claramente, os períodos presentes no espectro para a cronologia média.

Figura 47 – Espectros para a cronologia média de General Carneiro.



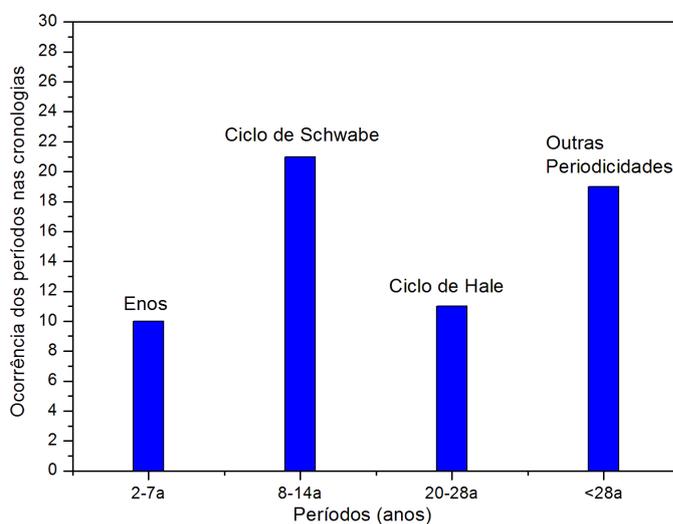
Fonte: Autor, 2016.

É possível notar a ocorrência dos seguintes períodos relacionados ao ciclo de Schwabe: 10,5; 11,2; 11,8; 12,8 e 13,4 anos; ao ciclo de Hale: 23,3 e 27,6 anos, ao ciclo de Brückner: 39,7 anos e ao ciclo de Gleissberg: 66,7 e 85,4 anos. O período de 30,5 anos pode ser a combinação de dois ciclos, como o de Gleissberg e o de Hale como será discutido ao final deste capítulo.

O histograma, na Figura 48, mostra o número de ocorrência dos sinais em todas as cronologias que compõem a cronologia média para General Carneiro.

De maneira geral, periodicidades relacionadas ao ciclo de Schwabe ocorreram mais vezes, sendo seguido por longos períodos (maiores que 28 anos). Sinais do Enos ocorreram em menor quantidade.

Figura 48 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de General Carneiro (GC).

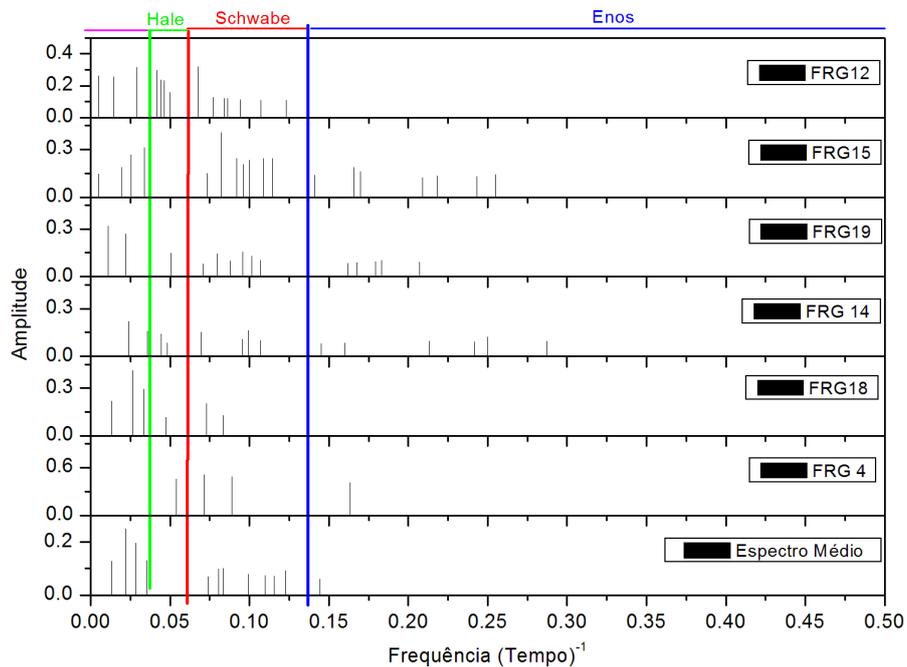


Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.1.2 Fazenda Rio Grande

Os espectros para as cronologias de Fazenda Rio Grande apresentaram períodos de 11 anos, 22 anos, além de curtos períodos relacionados a eventos climáticos e longos períodos em quase todas as séries, (Figura 49).

Figura 49 – Espectros para as 6 cronologias de FRG e o espectro para a cronologia média.

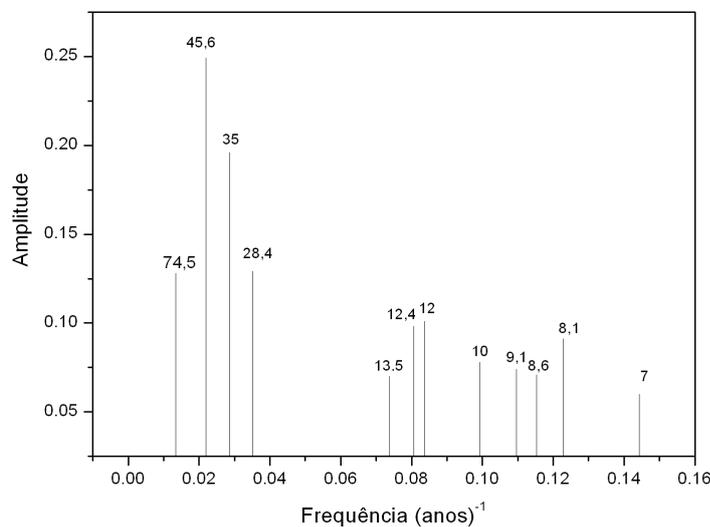


Fonte: Autor, 2016.

No entanto, o predomínio se deu em períodos dentro da banda para o Ciclo de Schwabe (11 anos). Apenas um período relacionado ao Enos atingiu o limiar de 95% para o espectro da cronologia média.

Na Figura 50 estão as periodicidades presentes no espectro referentes à cronologia média de Fazenda Rio Grande. Há ocorrência de sinais relacionados a eventos de Enos: 7 anos, ao ciclo de Schwabe: 8,1; 8,6; 9,1; 10; 12; 12,4 e 13,5 anos, ao ciclo Hale: 28,4, ciclo de Brückner: 35 e 45,6 anos e ao ciclo de Gleissberg: 74,5 anos.

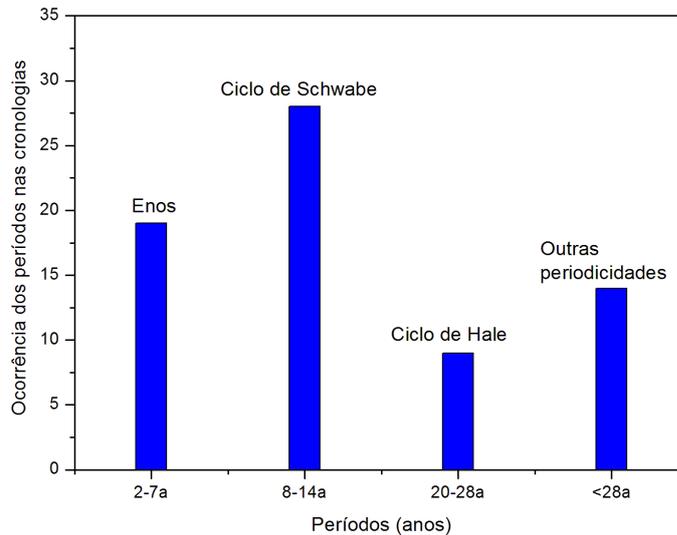
Figura 50 – Espectros para a cronologia média de Fazenda Rio Grande.



Fonte: Autor, 2016.

O histograma da Figura 51 mostra a quantidade de sinais que ocorreram nas cronologias. Períodos dentro da banda, que corresponde ao ciclo de Schwabe, foram majoritariamente predominante e, a seguir, aparecem os sinais climáticos. Já os períodos referentes ao Ciclo de Hale e a longos períodos ocorreram em menor quantidade.

Figura 51 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de Fazenda Rio Grande (FRG)

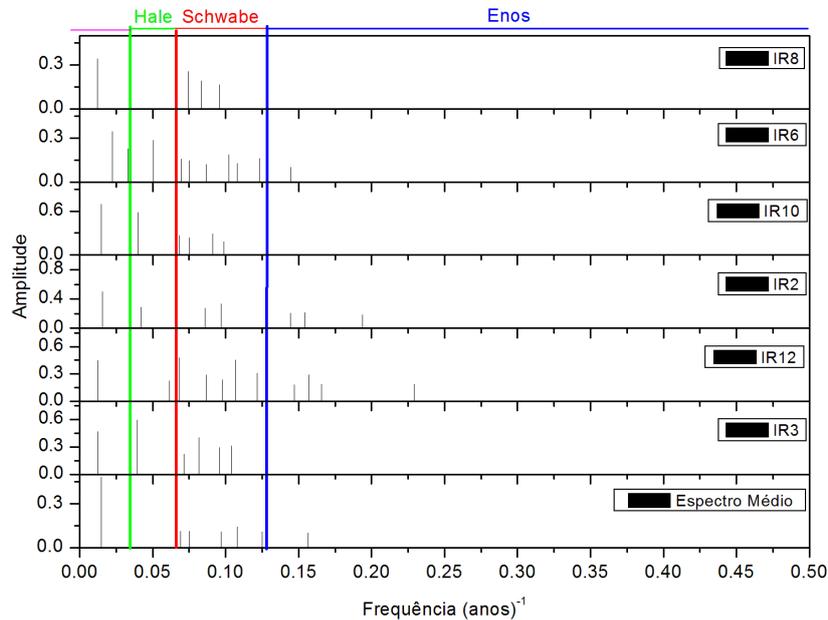


Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.1.3 Irani

A Figura 52 mostra os espectros para cada uma das 6 cronologias de Irani, assim como os espectros para a cronologia média. Nota-se a ocorrência de poucos sinais relacionados a eventos de Enos e um predomínio de períodos para o ciclo de 11 anos. Os períodos de 2-7 anos, que ocorreram em algumas das cronologias, analogamente as outras duas localidades, foram atenuados e não atingiram o nível de 95% de confiança para o espectro da cronologia média.

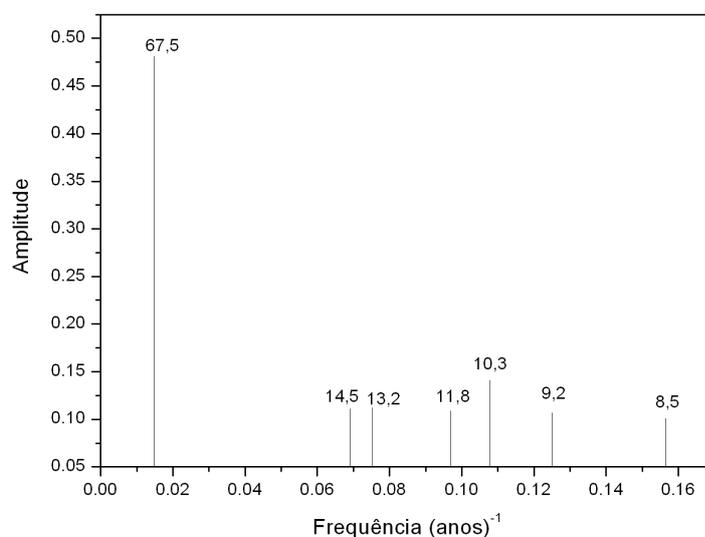
Figura 52 – Espectros para as 6 cronologias de IR e o espectro para a cronologia média.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 53 mostra, mais detalhadamente, os espectros que ocorrem na cronologia média. Ocorrem periodicidades referentes ao ciclo de Schwabe: 8,5; 9,2; 10,3; 11,8 e 13,2 anos e ao ciclo de Gleissberg: 67,5 anos, porém não ocorrem sinais para eventos de Enos, ciclo de Hale e ciclo de Brückner.

Figura 53 – Espectros para a cronologia média de Irani. São mostrados apenas os períodos que atingiram o nível de confiança de 95%.

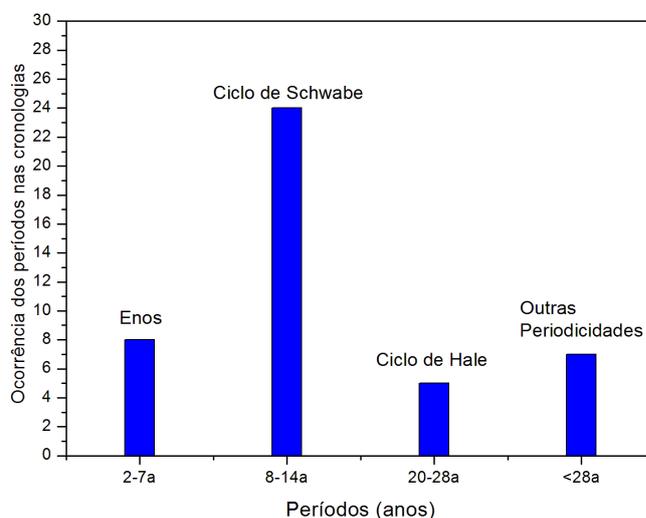


Fonte: Autor, 2016.

O histograma apresentado na Figura 54 mostra os períodos que ocorrem em todas as cronologias de Irani. Há uma maior quantidade de sinais do ciclo de Schwabe. As demais

bandas de periodicidades ocorrem quase igualmente.

Figura 54 – Histograma de ocorrência das periodicidades nas cronologias de Irani (IR)



Fonte: Autor, 2016.

Alguns períodos revelados nos espectros das séries dendrocronológicas e que, muitas vezes, não estão associados a nenhum ciclo conhecido, podem ter sua origem na combinação de duas ondas. A forma como dois sinais oscilatórios se deslocam, simultaneamente dentro de um intervalo de tempo, pode resultar na formação de períodos diversos. Raspopov et al. (2000) levantam a questão de que a atividade solar sobre os processos climáticos globais pode não ser linear. Isto deve-se a fatores como o sistema oceano-atmosfera, estrutura da circulação atmosférica, diferença de albedo entre continente e oceano etc. Considerando esses pormenores, podem surgir sinais que seriam combinações de períodos já conhecidos da atividade solar. Os autores ainda apontam que as evidências do ciclo de Brückner (30-45 anos) em séries temporais podem ser um exemplo desse processo não linear, sendo uma possível combinação do Ciclo de Gleissberg e do ciclo de Hale.

Considerando o ciclo de Gleissberg ( $T_1=1/f_1=90$  anos) e o ciclo de Hale ( $T_2=1/f_2=22$  anos):

Se somados:  $f = f_1 + f_2 = 1/22 + 1/90 = f = 0,057$ , logo  $T = 17,5$

Se subtraídos:  $f = f_1 - f_2 = 1/22 - 1/90 = f = 0,034$ , logo  $T = 29,4$

Por outro lado, Raspopov et al. (2000) não descartam a interpretação física desse sinal, quando estudos realizados em diferentes locais e utilizando diferentes tipos de registros naturais, relataram a ocorrência de períodos entre 30 anos e 45 anos em seus espectros.

Sazonov (1979) *apud* Raspopov et al. (2000), na busca pelo período de 33 anos no ciclo da atividade solar, verificou que o período de 30 anos ocorria durante o máximo da atividade solar, ao passo que o período de 45 anos ocorria em épocas de mínimo solar. Apesar destas periodicidades já terem sido apontadas e discutidas em alguns trabalhos, a

natureza física desse sinal ainda é pouco conhecida e aqui revelou-se a discussão devido à ocorrência dessa periodicidade em particular.

### 4.3 Análise por *Wavelets* e Filtros Passa-Banda

Para se investigar períodos específicos do desenvolvimento dos anéis de árvores e a sua relação com a atividade solar, foi aplicada às séries a transformada cruzada de *wavelets*.

A interpretação dos gráficos de *wavelets* é, segundo Torrence e Compo (1998), o eixo Y representando o período em anos e o eixo X o tempo. A escala de cores indica a intensidade do espectro, ou seja, a amplitude deste no tempo. Periodicidades que atingiram 95% de significância são indicadas pelas linhas de contorno em branco.

Os gráficos das transformadas de ondaletas cruzadas são mostrados na Figura 55, Figura 57 e Figura 59.

A partir dos períodos apresentados nos espectros cruzados de *wavelet*, selecionou-se essas bandas e, por meio de Filtro Passa-Banda, analisou-se o comportamento das duas séries variando juntas dentro de determinada banda de frequência. A Figura 56, Figura 58 e a Figura 60 apresentam o comparativo entre as séries dendrocronológicas e a do número de manchas solares quando submetidas a filtros Passa-Banda de 60-90 anos (ciclo de Gleissberg) e de 8-14 anos (ciclo de Schwabe).

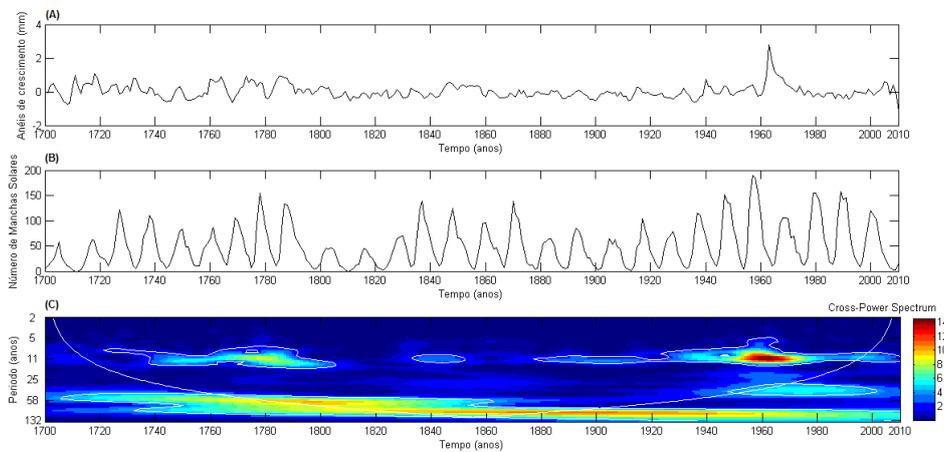
#### 4.3.1 General Carneiro

A Figura 55, apresenta o espectro cruzado de *wavelet* entre a série de anéis de crescimento de General Carneiro e o número de manchas solares (SSN) de 1700-2009 com períodos variando de 2-132 anos.

Há dois períodos predominantes: 11 anos e 58 anos. O sinal de 11 anos (Ciclo de Schwabe) aparece intermitentemente e desaparece durante os mínimos solares. A ocorrência dessa banda está nos intervalos: 1720-1800, 1835-1855 e em 1880-2009, aproximadamente. Em alguns intervalos ocorre com maior intensidade: 1775-1790 e em 1960, que correspondem ao máximo da atividade solar.

O sinal em torno de 58 anos, associado ao Ciclo de Gleissberg, se mostra contínuo e com intensidade praticamente constante ao longo do tempo.

Figura 55 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de General Carneiro e a série do número de manchas solares (SSN) com o cone de influência (curva em branco) e nível de 95% de confiança (contorno em branco).

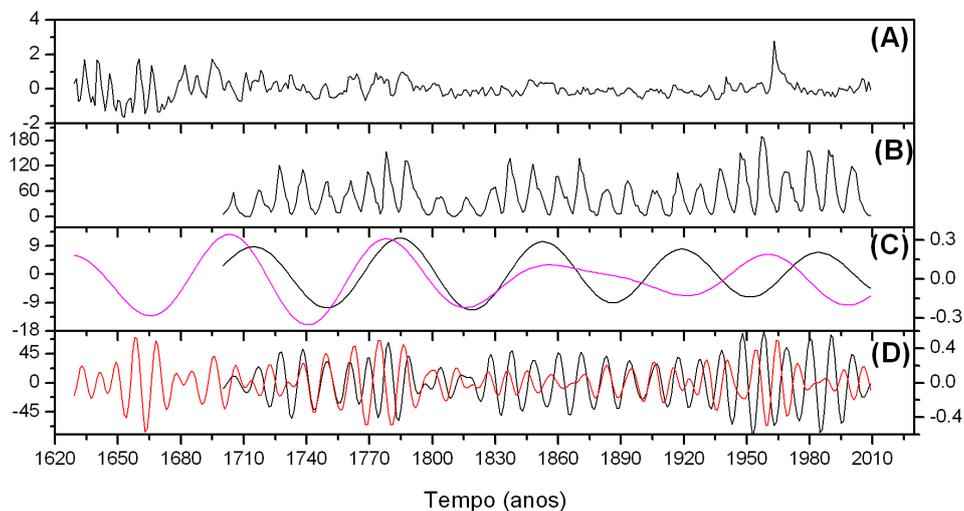


Fonte: Autor, 2016.

As séries de anéis de crescimento de General Carneiro e do número de manchas (SSN), submetidas a filtros Passa-Banda, são apresentadas na Figura 56. Nota-se que para a banda de 60-90 anos as curvas estão em fase do início até 1890 mesmo que um pouco deslocadas entre si e depois ficam em oposição de fase e com amplitudes diferentes até o final (curvas em preto e em lilás).

Para a banda de 8-14 anos que ocorre entre 1720-1800, as curvas estão em fase entre 1735-1765 e em anti-fase de 1765-1800. De 1880 em diante as curvas estão em fase entre 1880-1920 e depois passam por curtos tempo de fase e anti-fase (curvas em preto e em vermelho).

Figura 56 – (A) série de anéis de crescimento de GC, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de GC (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de GC (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos.

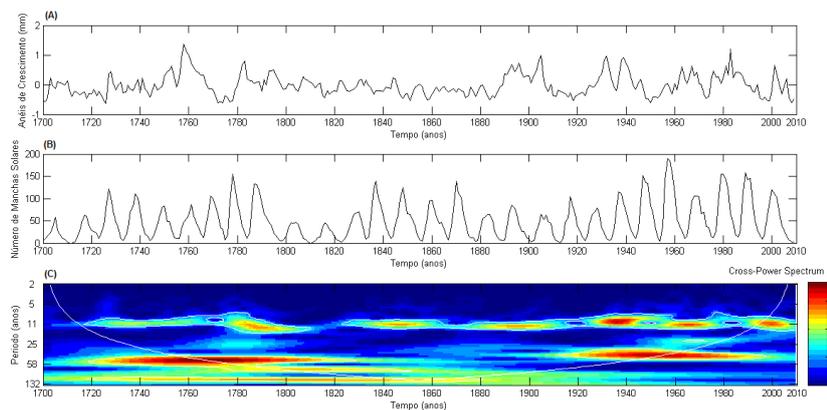


Fonte: Autor, 2016.

### 4.3.2 Fazenda Rio Grande

A Figura 57 apresenta o espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e o número de manchas solares (SSN) de 1700-2009 com períodos variando de 2-132 anos. Analogamente a General Carneiro, ocorrem os períodos de 11 anos e 58 anos. O sinal de 11 anos ocorre em todo o espectro, interrompendo apenas entre 1810-1820. O que modula o sinal é a intensidade com que ele ocorre, se mostrando menos intenso em períodos de máximo solar. O período de 58 anos aparece em duas bandas muito intensas: entre 1720-1820 e 1915-1990, aproximadamente.

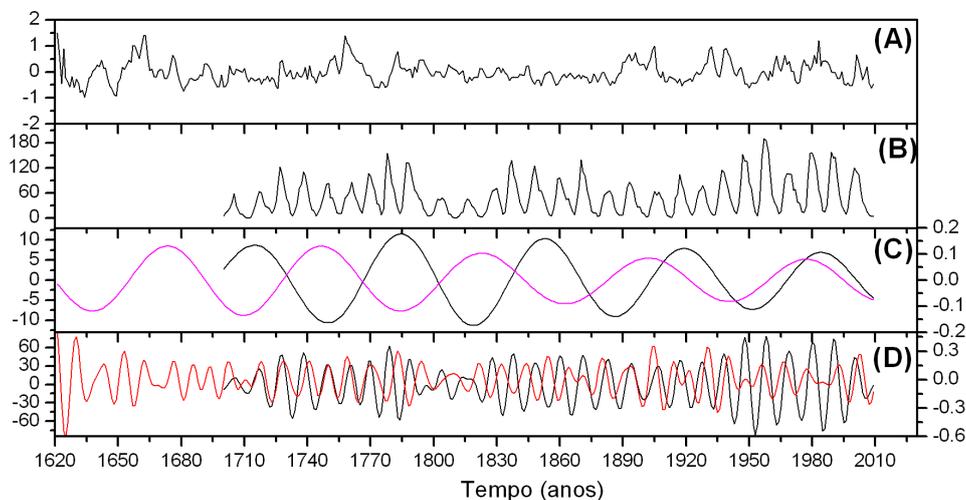
Figura 57 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e a série do número de manchas solares (SSN) com o cone de influência (curva em branco) e nível de 95% de confiança (contorno em branco).



Fonte: Autor, 2016.

Os filtros Passa-Banda aplicados as séries de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e do número de manchas solares (SSN), são mostradas na Figura 58.

Figura 58 – (A) série de anéis de crescimento de FRG, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de FRG (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de FRG (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos.



Fonte: Autora, 2016.

O espectro cruzado de wavelet (Figura 57) aponta a existência de uma banda em torno de 11 anos intermitente e uma banda em torno de 58 anos ocorrendo com bastante intensidade em dois momentos das séries. Nas séries filtradas na banda de 60-90 anos as curvas estão em anti-fase entre 1720-1820 e depois colocam-se em fase até o final, mas há deslocamento entre as curvas (curvas em preto e em lilás).

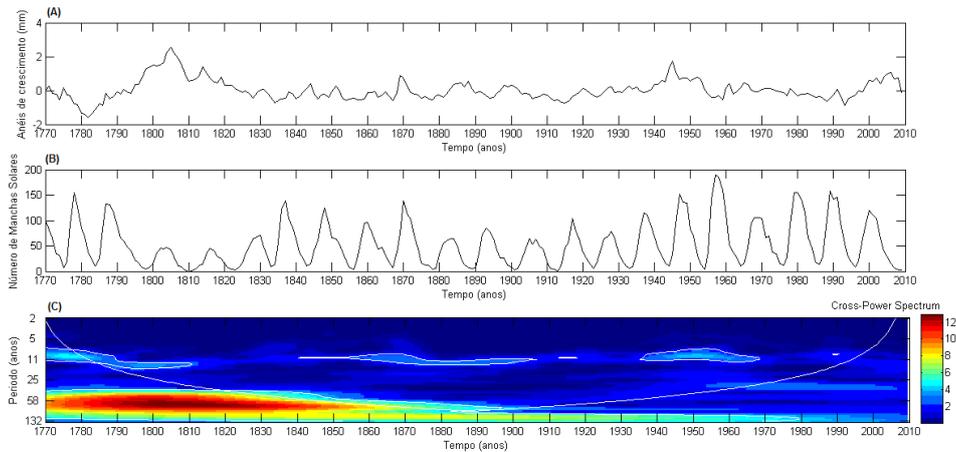
Para a banda de 8-14 anos há alternância entre fase (1720-1770) e anti-fase (1770-1810 e de 1820-1850). A partir de 1860 as curvas mostram-se em fase, mas levemente deslocadas (curvas em preto e em vermelho).

### 4.3.3 Irani

A Figura 59 apresenta o espectro cruzado de wavelet entre a série dendrocronológica de Irani e o número de manchas solares (SSN) de 1769-2009, com períodos variando de 2-132 anos.

O período de 11 anos ocorre em três momentos que também correspondem aos máximos solares: 1770-1810, 1840-1900 e 1935-1965, porém com menor intensidade comparado à General Carneiro e à Fazenda Rio Grande. O sinal de 58 anos também é visto com bastante intensidade do início da série até o ano de 1850. É importante notar que durante o Mínimo de Dalton (1790-1830) houve maior crescimento nas plantas.

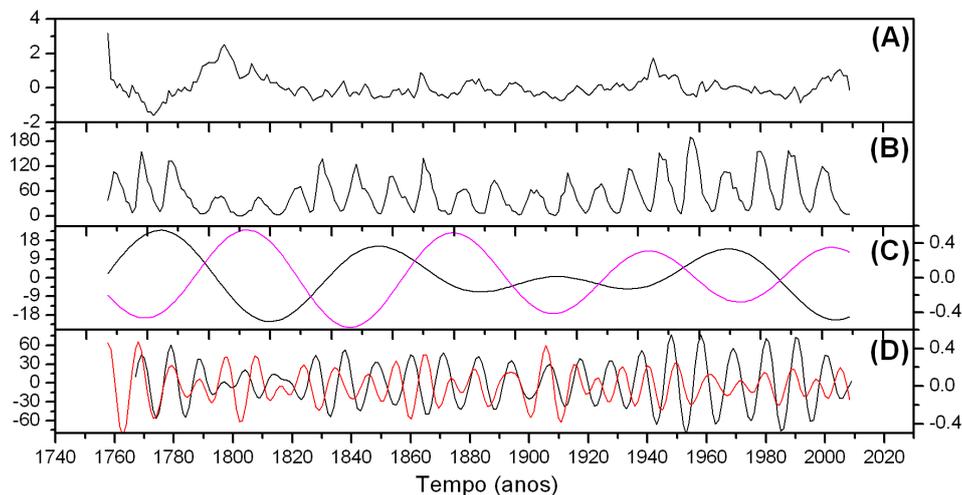
Figura 59 – Espectro cruzado de wavelet entre a série de anéis de crescimento de Irani e a série do número de manchas solares.



Fonte: Autor, 2016.

O gráfico da Figura 60, mostra a série de anéis de crescimento e a série de manchas solares filtradas na banda de 8-14 anos e 60-90 anos, que correspondem as bandas dos ciclos de Schwabe e ao ciclo de Gleissberg, respectivamente.

Figura 60 – (A) série de anéis de crescimento de IR, (B) série do número de manchas solares (SSN), (C) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de IR (curva em lilás) filtradas em 60-90 anos, (D) A série do número de manchas solares (curva em preto) e a série de anéis de crescimento de IR (curva em vermelho) filtradas em 8-14 anos.



Fonte: Autor, 2016.

Analisando as bandas que ocorrem nas duas séries (Figura 59), as séries filtradas na banda de 60-90 anos apresentam-se em anti-fase durante todo o tempo e um tanto deslocadas a partir de 1920 (curvas em preto e em lilás).

Já na banda dos 11 anos, a alternância entre fase e anti-fase ocorre. As séries mostram-se em fase entre 1767-1790, 1870-1920 e de 1970 até o final, mas com deslocamento. Entre 1850-1870 e entre 1920-1940 apresentam-se em oposição de fase (curvas em

preto e vermelho).

Nas três localidades de estudo as séries filtradas nas bandas de 8-14 anos apresentaram trechos em que evoluem em fase com a série do número de manchas solares filtradas na mesma banda e em outros trechos em oposição de fase. Para a banda de 60-90 anos, apenas Irani se manteve em oposição de fase durante todo tempo.

A banda de 11 anos está presente nas séries dendrocronológicas como pode ser visto claramente em todos os mapas de espectro cruzado de potência. Sinais do ciclo de 11 anos são bastante comuns e intenso nas séries dendrocronológicas de árvores coletadas no Sul do Brasil (NORDEMANN; RIGOZO; FARIA, 2004; RIGOZO et al., 2008; PRESTES et al., 2011).

Dorotovic et al. (2014), estudando duas espécies de pinheiros, uma coletada ao norte de Portugal e outra ao Sul da Eslováquia, relataram impacto negativo da atividade solar no crescimento dessas árvores, principalmente naquelas coletadas em Portugal. Essas amostras apresentaram menor crescimento em períodos de máximo solar. Os autores também estudaram o comportamento das duas séries na banda de 11 anos e observaram alternância entre fase e oposição de fase entre elas e atribuíram a possível existência de algum outro forçante atuando em conjunto com sinal de 11 anos. A atuação de mais de um forçante pode acarretar que em alguns trechos haja a intensificação do sinal e em outros a atenuação do mesmo. Esta explicação é plausível do ponto de vista de que uma série de anéis de crescimento pode comportar uma quantidade imensa de forçantes/sinais. Logo, separar e/ou quantificar cada um desses forçantes é um trabalho difícil e, por vezes, até impossível ou inviável. Wang e Zhang (2011), estudando sinais do ciclo solar em árvores do Tibet (China), fizeram uso da wavelet cruzada com ângulo de fase entre a série dendrocronológica e a série do número de manchas solares. Neste caso, a banda de 11 anos ficou muito evidente no mapa da wavelet, porém, as setas que indicam a fase alternaram seu sentido durante todo o intervalo. Os autores comentaram que pode haver entre as séries uma relação de fase não-estacionária.

Outros trabalhos, após encontrarem sinais do ciclo solar nas séries dendrocronológicas, procuraram investigar como as séries se portam no tempo nas bandas de sinais encontrados. Para isso fizeram uso de filtros Passa-Banda (LAMARCHE; FRITTS, 1972; MORI, 1981; MURPHY, 1990; MURPHY; VELEN, 1992; NORDEMANN; RIGOZO; FARIA, 2004; RIGOZO et al., 2004; PRESTES et al., 2011; WANG; ZHANG, 2011). Nestes trabalhos, os autores também relataram comportamento de alternância entre fase e anti-fase no decorrer do tempo e não apresentaram respostas definitivas, apenas sugestões. Logo, nota-se que esta evidência, mesmo levantada há mais tempo, ainda gera mais perguntas que respostas.

## 4.4 Dendroclimatologia

Há um número expressivo de trabalhos que visam avaliar a influência das variáveis climatológicas no crescimento das plantas. Em especial no Sul do Brasil há uma gama muito grande de trabalhos dessa natureza.

O pesquisador que se interessa por trabalhos em dendroclimatologia deve ter em mente que o crescimento das árvores depende da genética da espécie e de como essa característica interage com o ambiente (LAMPRECHT, 1990) *apud* (KANIESKI et al., 2012). As influências ambientais vão desde as variáveis climatológicas até a questões relacionadas à química do solo, terreno em que a árvore cresceu (plano, encosta), competição entre as árvores por nutrientes, insolação e etc, histórico de ocorrência de pragas. Assim sendo, há uma quantidade enorme de investigações que podem ser feitas utilizando anéis de crescimento de árvores.

### 4.4.1 Anéis de crescimento e as variáveis climatológicas

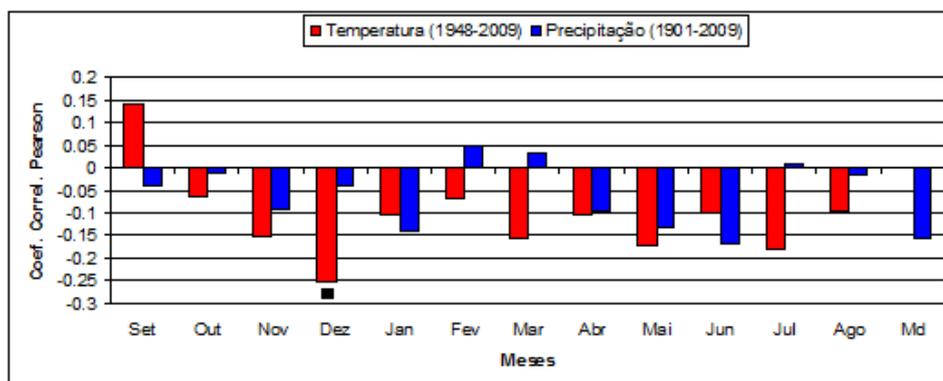
O estudo climatológico foi realizado utilizando-se as séries de precipitação e temperatura. Para isso, correlacionou-se as séries dendrocronológicas com os dados mensais de precipitação e de temperatura para cada uma das localidades de estudo.

As análises correspondem ao ano T, ou seja, ao ano atual de crescimento.

#### General Carneiro

A Figura 61 apresenta correlações entre os anéis de crescimento de GC e os dados de precipitação e de temperatura mensais e também da precipitação média anual (Md).

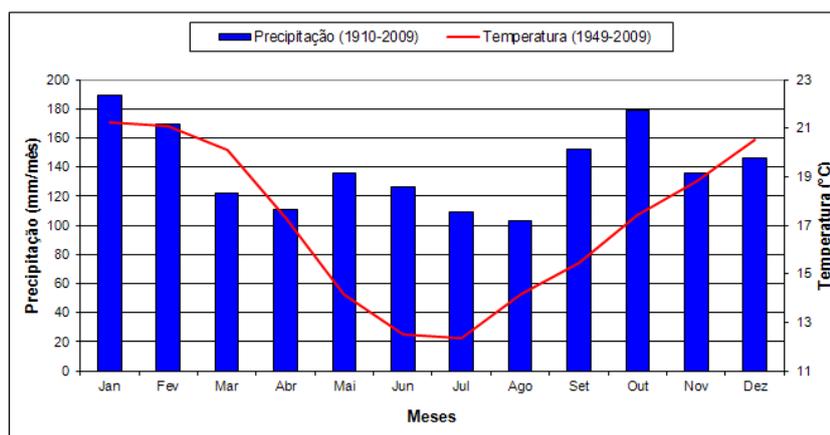
Figura 61 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de GC e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação com a precipitação média anual. O ponto em preto destaca a correlação acima do nível de 95% de confiança.



Para a temperatura, apenas o mês de setembro teve correlação positiva ( $r = 0,14$ ), mas não significativa a 95%. Dezembro apresentou correlação significativa em 95% ( $r = -0,25$ ), porém negativa. A correlação com a precipitação não apresentou significância estatística para nenhum dos meses, nem para a média anual (Md).

A climatologia para a região de General Carneiro é mostrada na Figura 62.

Figura 62 – Climatologia para as regiões vizinhas a General Carneiro/PR.



Fonte: Autor, 2016.

Como pode-se perceber, o local de estudo apresenta um regime homogêneo de chuvas ao longo do ano, sem haver estação seca ou chuvosa. Os três meses mais chuvosos, por ordem crescente, são janeiro, outubro e fevereiro.

Ao contrário da precipitação, as temperaturas apresentam considerável variabilidade sazonal, o que é característico dos Estados do Sul. Os meses de inverno registram médias mais baixas de temperaturas, sendo o mês de julho o mais frio. No verão, as temperaturas são mais elevadas, sendo janeiro o mês que registra maior temperatura.

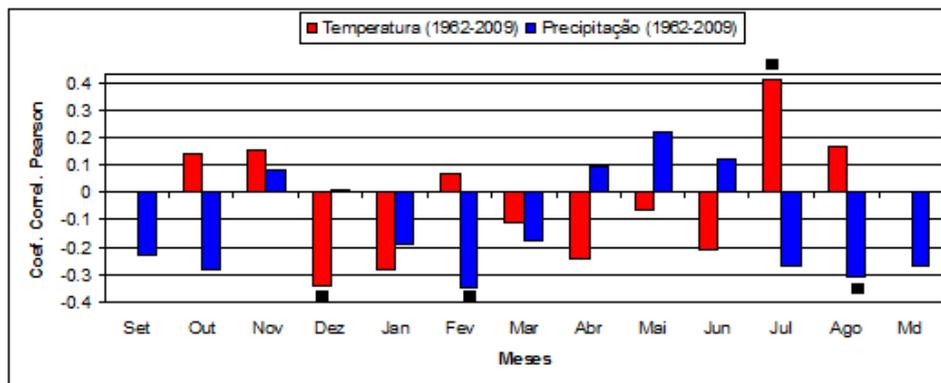
### Fazenda Rio Grande

As correlações, mês a mês, entre a série de anéis de crescimento de FRG e a precipitação e temperatura mensal e precipitação média anual (Md) são mostradas na Figura 63.

Para a temperatura, julho obteve correlação significativa e positiva ( $r = 0,41$ ). O mês de dezembro também mostrou correlação significativa, mas negativa ( $r = -0,34$ ).

Entre a precipitação e os anéis de crescimento, dois meses obtiveram anti-correlações significativas: Fevereiro ( $r = -0,35$ ) e agosto ( $r = -0,31$ ).

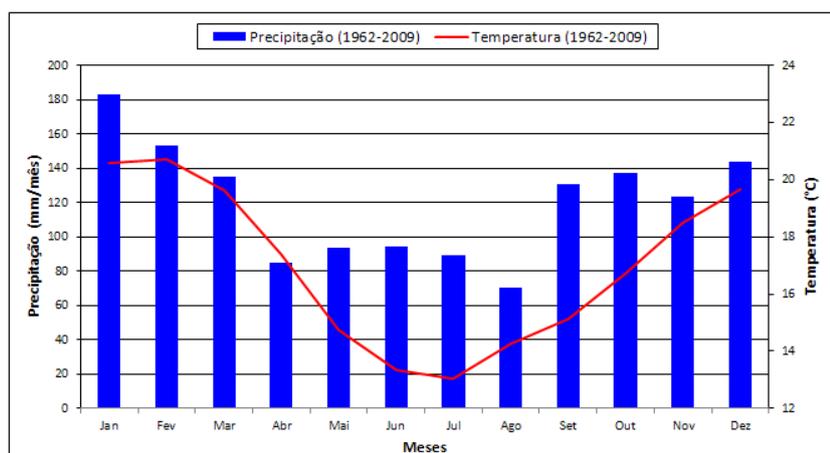
Figura 63 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação para a precipitação média anual. O ponto em preto destaca correlação acima do nível de 95% de confiança.



Fonte: Autor, 2016.

A climatologia de Curitiba é mostrada na Figura 64. Embora apresente regime bem distribuído de precipitação, nota-se que há uma leve sazonalidade nos regimes de chuva, ocorrendo um menor volume entre os meses de abril e agosto. A concentração maior de chuva está nos meses da primavera-verão, sendo janeiro o mês mais chuvoso. A respeito das temperaturas, a sazonalidade é marcante, com valores mais baixos de temperatura entre o outono-inverno, tendo os meses de junho e julho as menores temperaturas.

Figura 64 – Climatologia para Curitiba.



Fonte: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

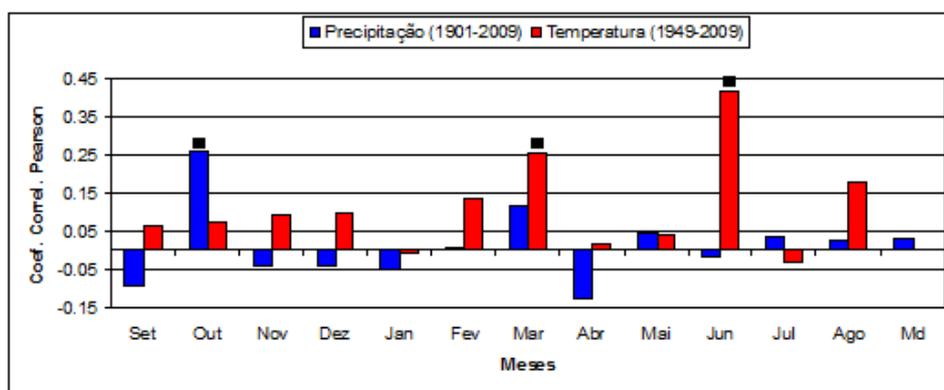
Segundo Carvalho e Stipp (2004), Curitiba registrou temperatura média, do período climatológico 1961-1990, de 16,5°C, sendo que os meses de junho e julho apresentam as temperaturas mais baixas e a precipitação média anual ficou em torno de 117,3mm. Para a precipitação, Curitiba registra maior volume nos meses do verão e menor nos meses de

abril/julho/agosto. Ainda assim, a localidade não apresenta deficit hídrico.

### Irani

A correlação entre a série de anéis de crescimento de Irani e a precipitação e temperatura mensal é mostrada na Figura 65.

Figura 65 – Correlação entre a série de anéis de crescimento de Irani e as variáveis climatológicas. As barras em vermelho representam a temperatura mês a mês e as barras em azul a precipitação mês a mês. A última barra em azul (Md) mostra a correlação para a precipitação média anual. O ponto em preto destaca correlação acima do nível de 95% de confiança.

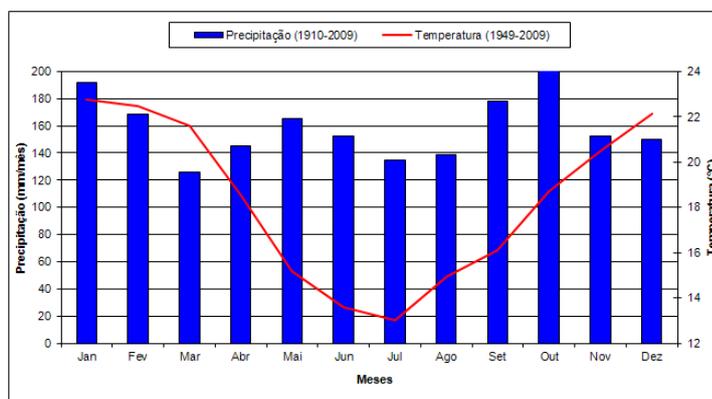


Fonte: Autor, 2016.

Para a temperatura os meses de junho ( $r = 0,41$ ) e março ( $r = 0,25$ ) apresentaram correlação positiva e significativa. Para a precipitação, apenas o mês de outubro ( $r = 0,25$ ) mostrou resultado significativo.

Irani apresenta climatologia muito semelhante a General Carneiro, em partes porque são sítios que estão, geograficamente, próximos. A Figura 66 mostra a climatologia de Irani.

Figura 66 – Climatologia para as regiões vizinhas a Irani.

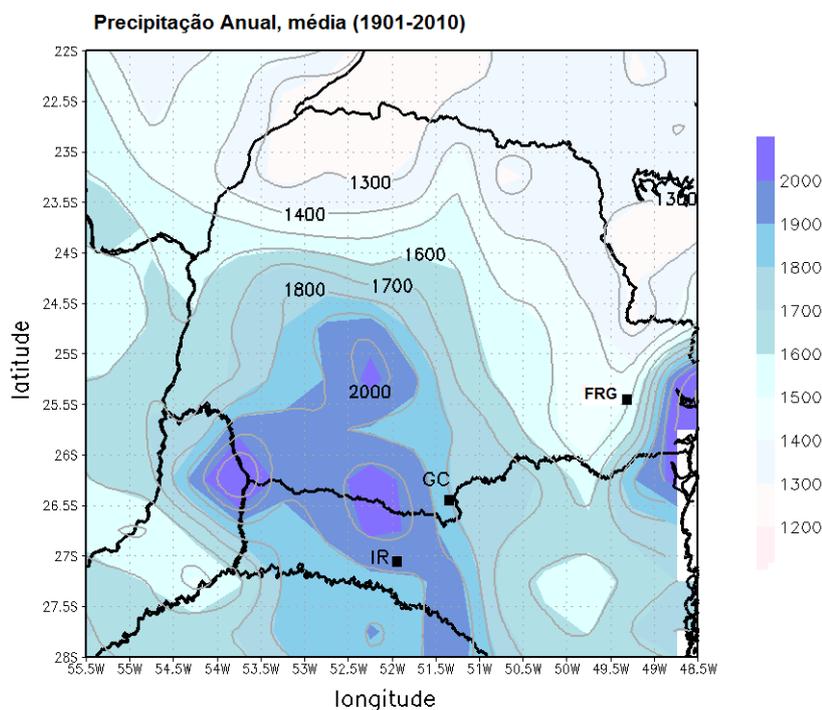


Fonte: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

Pode-se notar que não há estação seca, tendo o volume de chuvas bem distribuído ao longo do ano. Os meses de outubro e janeiro são os que somam maior volume pluviométrico. Quanto as temperaturas, há considerável declive nos meses de inverno.

A distribuição espacial e temporal da precipitação nos sítios de coletas é mostrada na Figura 67. As cidades de General Carneiro e Irani estão situadas em uma das regiões que concentram maior volume de chuva. Em termos de valores, Fazenda Rio Grande registra um acumulado anual entre  $1400mm - 1500mm$  enquanto que General Carneiro acumula entre  $1800mm - 1900mm$  e Irani acima de  $1900mm$  ao ano. Além do perfil de precipitação de cada localidade, há o fator da topografia que pode acarretar diferenças de umidade, por exemplo. Irani situa-se à  $1047m$  e está mais ao sul em relação às outras duas cidades. General Carneiro tem altitude de  $983m$  e Fazenda Rio Grande está em uma zona de menor concentração de chuva, à  $910m$  e mais ao norte. Essas diferenças podem atribuir às séries cronológicas características locais que sobressaiam às regionais ou às globais (por exemplo, mudanças nas variáveis limitantes para o crescimento das árvores de cada sítio). Isto ocorreu com as amostras que apresentaram comportamentos distintos entre si com relação à climatologia. Em alguns casos, o crescimento das plantas não depende unicamente de uma variável, mas sim da combinação de dois ou mais forçantes sejam eles precipitação, temperatura, insolação e etc.

Figura 67 – Acumulado anual de precipitação para o período de 1901-2010 para as regiões onde foram feitas as coletas.



Fonte: Autor, 2016.

Albiero (2014), em sua pesquisa com lenhos de *Araucaria angustifolia*, oriundas

do Oeste paranaense, não encontrou padrões de precipitação no crescimento das plantas, sendo que apenas o mês de maio apresentou correlação positiva e significativa. O autor concluiu que para essa localidade a temperatura se mostrou como o principal fator limitante para o crescimento das plantas. Silva (2013) desenvolveu uma pesquisa com árvores da mesma espécie coletadas em Canoinhas e em Três Barras, ambos os sítios localizados em Santa Catarina, e não encontrou sinais significativos da precipitação nas séries dendrocronológicas. Stepka (2012), utilizando amostras de *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa* coletadas em sítios no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, correlacionou o crescimento das plantas às condições climáticas locais. As correlações com as variáveis climatológicas mostraram que a temperatura é o fator limitante. As amostras de Caçador/SC e São João do Triunfo/PR apresentaram correlação significativa e negativa relacionada a precipitação. Enquanto que em Irati/PR e Três Barras/SC, nenhuma correlação foi significativa a nível de 95% e 99% de confiança. Mattos et al. (2007) pesquisaram um grande número de espécies, entre elas *A. angustifolia*, coletadas em Cândói/PR e, segundo os autores, as árvores não se mostraram sensíveis às condições climáticas locais. Por outro lado, em estudo feito em São Francisco de Paula, na Serra Gaúcha, Oliveira, Roig e Pillar (2010), relataram correlações positivas, mas não significativas, para a precipitação. Enquanto que para a temperatura, as correlações foram na maioria negativas e apenas nos meses de dezembro e janeiro foram significativas.

Outros estudos, porém com amostras de *Cedrela fissilis* como Cusatis et al. (2013), que fizeram coletas em vários municípios na divisa de Santa Catarina e Paraná e não encontraram correlações significativas entre as séries de anéis de crescimento e as variáveis climatológicas. Sendo que para a precipitação, as correlações foram, predominantemente, negativas.

É esperado em amostras oriundas do Sul do Brasil, uma região que se caracteriza mais pelo contraste entre as temperaturas, que a variável precipitação não se mostre tão influente.

#### 4.4.2 Anéis de crescimento e o El Niño Oscilação Sul

Sendo as árvores uma fonte rica de registros sobre o clima, muitos estudos investigam evidências de eventos passados do Enos nos anéis de crescimento de árvores de diversas partes do mundo (RODRIGUEZ et al., 2005; BARICHIVICH; SAUCHYN; LARA, 2009). Como o Enos possui duas fases que se diferenciam pelo volume de chuva que proporcionam, é importante entender como cada uma dessas fases pode causar modificações no meio e deixar sinais no crescimento das plantas.

Como foi mostrado nas Figuras 46, 49 e 52, a análise espectral para cada uma das amostras que compõe a cronologia local, apresentou poucos sinais do Enos com nível de confiança acima dos 95%. Nesta cronologia, esses períodos climáticos podem ter sido atenuados. Mesmo assim, é possível que o Enos esteja presente nas séries dendrocronológicas,

que afete no crescimento das plantas, porém não é intenso a nível de 95%.

Na investigação a seguir, filtrou-se as séries dendrocronológicas na banda de 2-7 anos e comparou-se, graficamente, cada uma das séries com a série do IOS.

Cofrep, Peters e Brauning (2015), seguindo a definição de Trenberth (1997), classificaram eventos de El Niño/La Niña conforme a intensidade (Tabela 3). A partir disso, destacaram-se nas curvas alguns anos de eventos históricos de El Niño/ La Niña e inspecionou-se como foi o crescimento das árvores durante esses anos em específico. Com quadrados em azul destacou-se os anos de ocorrência de El Niño e com quadrados em verde os anos de La Niña. Não foi possível destacar todos os eventos que constam na tabela, pois isso deixaria as figuras muito "poluídas" e de difícil visualização.

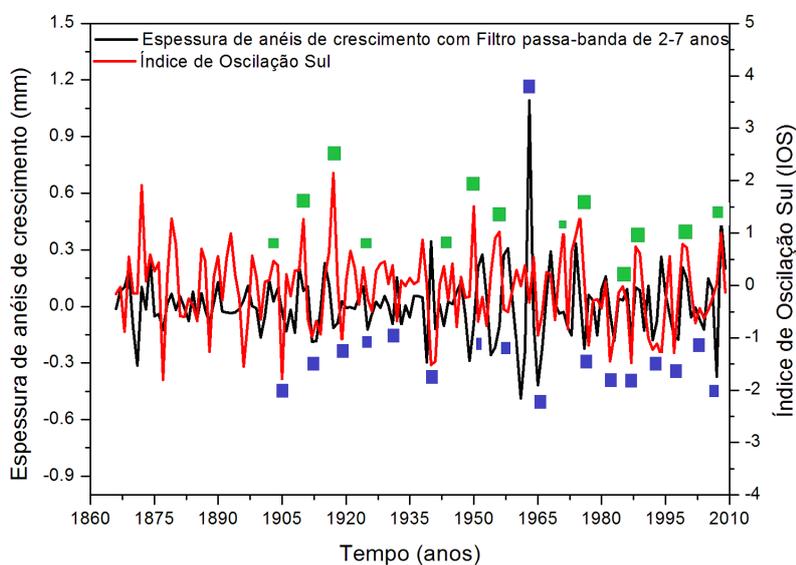
A Figura 68, mostra a série de anéis de crescimento de General Carneiro filtrada na banda de 2-7 anos e a série do Índice de Oscilação Sul (IOS) médio.

Tabela 3 – Classificação dos eventos de El Niño/La Niña.

<b>El Niño Normal</b>	<b>El Niño Forte</b>	<b>La Niña Normal</b>	<b>La Niña forte</b>
1902, 1905, 1912, 1914, 1919, 1923, 1926, 1931, 1941, 1951, 1958, 1963, 1965, 1969, 1977, 1987, 1992, 2002, 2004, 2006, 2009.	1972, 1982, 1997.	1904, 1916, 1924, 1933, 1942, 1964, 1988, 2007, 2010.	1909, 1949, 1955, 1971, 1973, 1985, 2000.

Fonte:(COFREP; PETERS; BRAUNING, 2015)

Figura 68 – Série de anéis de crescimento de General Carneiro filtrada na banda de 2-7 anos e o IOS. Os quadrados em azul identificam anos de El Niño, enquanto que os quadrados em verde identificam anos de La Niña.



Fonte: Autor, 2016.

É possível perceber que as plantas apresentaram crescimento nos seguintes anos de El Niño normal: 1919, 1941, 1951, 1958, com destaque para o ano de 1963 que registrou crescimento expressivo nas árvores. Em anos de El Niño forte as plantas apresentaram baixo crescimento, como pode ser visto nos anos de 1972, 1982 e 1997.

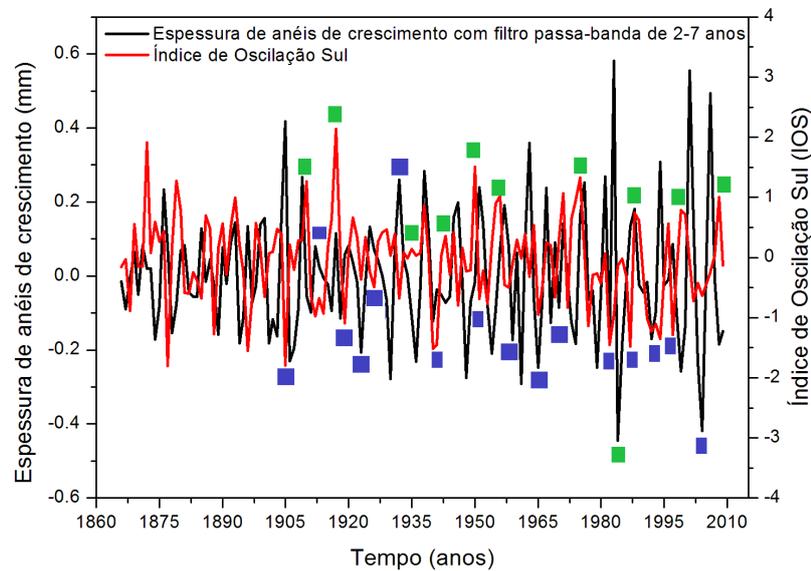
Em épocas de La Niña normal, houve maior crescimento nos anos: 1916, 1924, 1988 e 2007. Quando ocorreu La Niñas intensas, houve maior crescimento nos anos de 1909, 1973, 1985 e 2000.

A série de anéis de árvores não apresentou picos de crescimento muito expressivos, destaque apenas para os anos de El Niño de 1963 que registrou bom crescimento e o de 1965 com pouco crescimento dos anéis.

A cronologia de Fazenda Rio Grande e a série do IOS são mostradas na Figura 69. A série dendrocronológica apresenta muitos picos, alguns deles de maior e outros de menor crescimento. Muitos deles não estão atrelados a eventos de Enos, como foram os anos de 2003 e 2005.

Em anos de El Niño normal, houve maior crescimento: 1905, 1912, 1926, 1931, 1951, 1969 e 1987. Nesta série, o El Niño de 1982 destaca-se pelo maior crescimento dos anéis. Para La Niña normal, houve maior crescimento nos anos: 1916 e 1988 e para eventos fortes de La Niña apenas o ano de 1909 se mostrou favorável ao desenvolvimento dos anéis de crescimento.

Figura 69 – Série de anéis de crescimento de Fazenda Rio Grande filtrada na banda de 2-7 anos e o IOS. Os quadrados em azul identificam anos de El Niño, enquanto que os quadrados em verde identificam anos de La Niña.

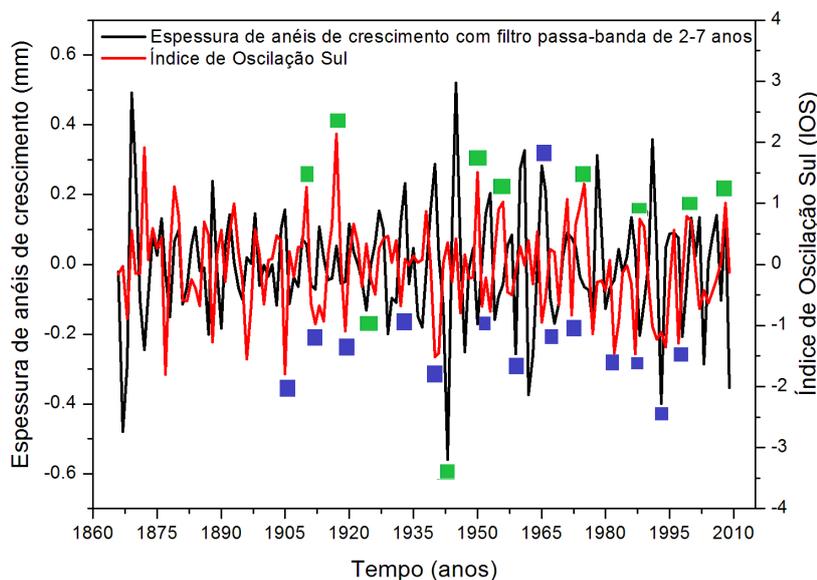


Fonte: Autor, 2016.

A Figura 70, apresenta a série dendrocronológica de Irani e o IOS médio. Esta série apresenta picos de crescimento acima ou abaixo da média em alguns anos como em 1867, 1943, 1990 sem estar relacionados a eventos de Enos.

Em anos de El Niño normal, houve mais crescimento nos anos: 1905, 1912, 1931, 1951, 1941, 1965, 1987 e 2004. Os eventos de El Niño forte de 1972 e 1982 apresentaram crescimento nos anéis, ao passo que o de 1997 ocorreu o inverso. Para La Niña, em anos normais do evento, apenas os anos de 1916 e 2007 houve maior crescimento. Vale salientar que o ano de 1942 de La Niña normal, as plantas registraram um pico forte de baixo crescimento. Em épocas de La Niña forte, o crescimento ocorreu nos anos de 1909 e 2000.

Figura 70 – Série de anéis de crescimento de Irani filtrada na banda de 2-7 anos e o IOS. Os quadrados em azul identificam anos de El Niño, enquanto que os quadrados em verde identificam anos de La Niña.



Fonte: A autora, 2016.

Evidências do Enos nas amostras ocorreram de maneira distinta para cada localidade. Como exemplo o ano de 1963 que consta como El Niño normal e registrou crescimento acima da média para GC e FRG. O ano de 1982, conhecido por ter ocorrido um dos mais intensos eventos de El Niño, apenas nas séries de Fazenda Rio Grande e Irani ocorre maior crescimento das árvores, destaque para Fazenda Rio Grande que teve o maior crescimento de seus anéis. Outro ano de El Niño intenso foi 1972, mas apenas Irani respondeu positivamente a esse evento e de forma bastante singela. O ano de 1909 tido como La Niña forte trouxe crescimento para as amostras das três localidades, ao passo que o eventos de 1949 e 1955 ocorreu o oposto nas três localidades.

Um ano de forte evento de La Niña foi 1985. Neste ano as amostras de General Carneiro e de Irani apresentaram crescimento positivo enquanto que em Fazenda Rio Grande este ano está marcado por forte pico negativo, indicando o menor crescimento entre os demais anos.

Fenômenos climáticos, como o Enos, influenciam claramente na quantidade de precipitação das estações do Sul brasileiro, e também imprimem sinais nos anéis de crescimento, porém com menos clareza e intensidade que em amostras coletadas em localidades em que há estação seca e chuvosa ou em regiões de clima desértico nas quais os eventos intensos de El Niño podem promover grandes mudanças no volume de chuva (RODRIGUEZ et al., 2005).

Amostras coletadas próximas à costa do Pacífico evidenciaram melhor os eventos do Enos comparadas às coletas feitas mais para o centro do continente devido a uma maior influência do oceano. Rodriguez et al. (2005), com amostras coletadas no deserto ao

noroeste peruano, encontraram picos acentuados de crescimento das plantas durante os El Niño de 1982 e 1997. Cofrep, Peters e Brauning (2015) fizeram um estudo com árvores de *Bursera graveolens* e *Maclura tinctoria*, oriundas da Reserva Natural Laipuna, uma floresta seca localizada ao sul do Equador entre o Peru e o Oceano Pacífico. As plantas registraram claramente os eventos de El Niños de 1972, 1982 e 1997. Em anos de El Niño normais, os autores comentaram que não houve sinais de crescimento diferenciado na amostragem. Rigozo et al. (2007), realizaram um estudo em que compararam as respostas dos eventos de Enos entre anéis de árvores de Concórdia/SC e do Chile. Os autores concluíram que as árvores do Chile são mais sensíveis aos eventos do Enos comparadas com as do Brasil, que são melhores para estudos do ciclo solar.

## 4.5 Reconstrução da Precipitação

### 4.5.1 Relação dos anéis de crescimento com as variáveis climatológicas para o ano (T) e ano (T-1)

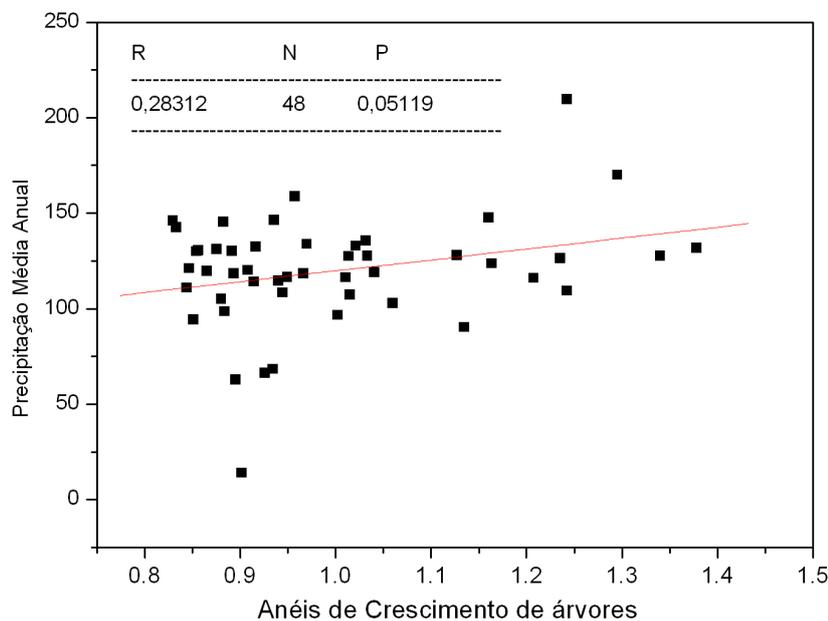
As correlações entre os anéis de crescimento e as variáveis climatológicas foram apontadas como significativas ou não significativas baseando-se na Tabela de Valores críticos para o coeficiente de correlação de Pearson para 50 pares de dados. Considerou-se significativos os valores que atingiram o limiar de 95% de confiança.

A correlação entre a precipitação média anual e os anéis de crescimento para o ano corrente (Ano T) foi significativa e positiva ( $r = 0,2831$ ;  $p < 0,05$ ) (Figura 71).

Para investigar o comportamento mensal das variáveis climatológicas por meio dos anéis de crescimento, fez-se a correlação mês a mês com a precipitação e a temperatura para o ano corrente (ano T) (Figura 72).

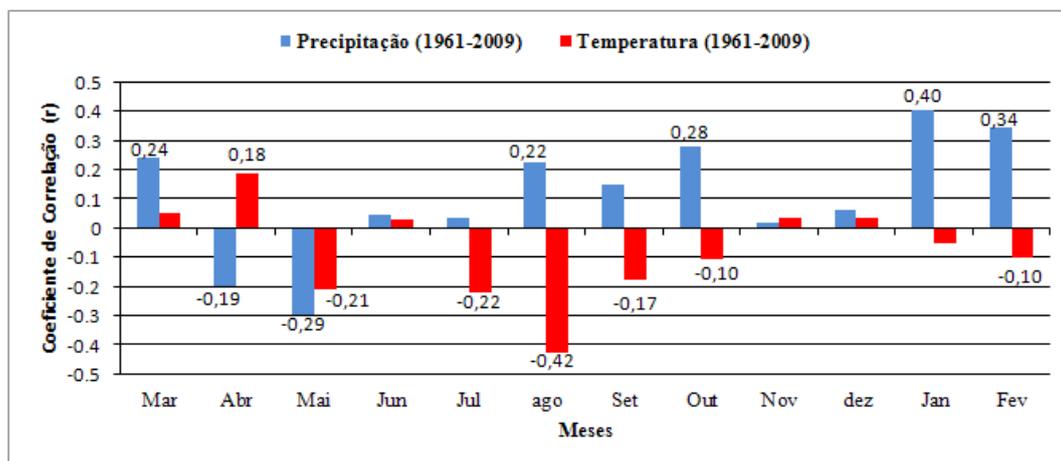
Os período de crescimento das plantas é primavera-verão (setembro-março), que coincide com o período mais chuvoso do ano para esta localidade. As correlações mês a mês entre os anéis de crescimento e a precipitação foram todas positivas durante a estação de crescimento, embora os meses de novembro e dezembro apresentaram valores de correlações bastante destoantes dos demais meses. As correlações positivas e significativas ocorreram nos meses de janeiro ( $r = 0,40$ ;  $p < 0,05$ ), fevereiro ( $r = 0,34$ ;  $p < 0,05$ ) e outubro ( $r = 0,28$ ;  $p < 0,05$ ).

Figura 71 – Gráfico de dispersão entre a precipitação média anual e os anéis de crescimento para o ano corrente (T).



Fonte: Autor, 2016.

Figura 72 – Correlação entre a cronologia local e a precipitação média mensal e temperatura média mensal de 1961-2009 para o ano corrente (T).



Fonte: Autor, 2016.

Nos meses de outono-inverno (abril-agosto) as correlações alternaram-se entre positivas e negativas (maio apresentou anticorrelação significativa ( $r = -0,29$ ;  $p < 0,05$ )). Isto mostra que não há um padrão contínuo de influência da precipitação no crescimento das árvores durante este período. E que os resultados podem ser a característica de cada mês, individualmente.

Para a temperatura, de setembro-março houveram correlações negativas (setembro, outubro, novembro e fevereiro) e positivas (novembro, dezembro e março), embora nenhuma tenha atingido valor significativo. Entre os meses de abril-agosto apenas junho mostrou

correlação positiva, porém pouco expressiva. O mês de agosto registrou anticorrelação significativa ( $r = -0,42$ ;  $p < 0,05$ ), seguido por julho e maio. Os dois últimos, embora fortes, as anticorrelações não foram significativas. Estas correlações negativas de julho a outubro podem indicar dormência cambial das árvores durante os meses mais frios (Figura 72).

A análise sazonal com a temperatura para o ano T e T-1 são mostradas na Tabela 4, no qual o inverno apresentou correlação negativa e significativa em ambos.

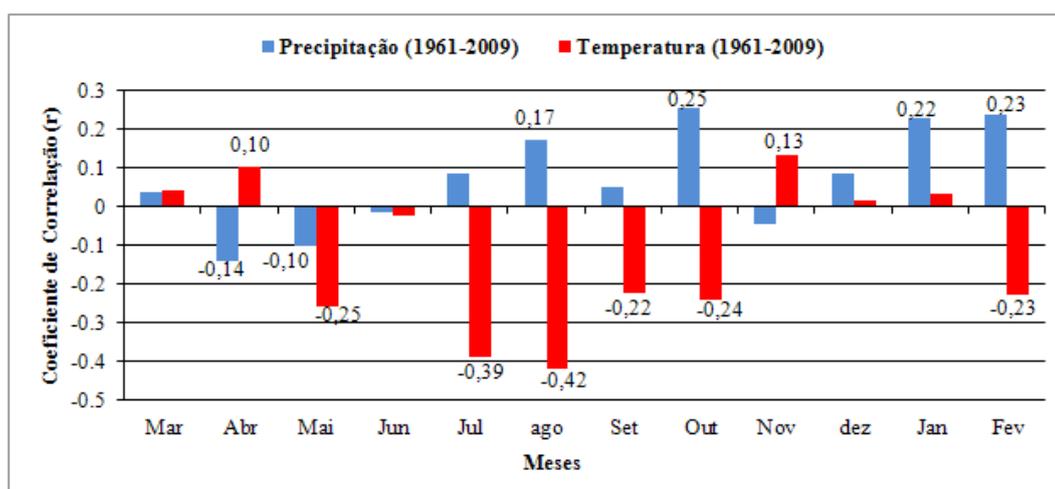
A análise feita para o ano anterior (T - 1) entre a precipitação média anual e os anéis de crescimento não apresentou correlação significativa ( $p < 0,05$ ) (figura não apresentada). No teste feito mês a mês, alguns meses apresentaram correlações positivas e outros negativas, porém em nenhum dos casos houve valores significativos. Para a temperatura, a avaliação mês a mês mostrou correlações negativas e significativas para o mês de agosto ( $r = -0,42$ ;  $p < 0,05$ ) e julho ( $r = -0,39$ ;  $p < 0,05$ ), (Figura 73).

Tabela 4 – Coeficientes de correlação entre Temperatura Média Sazonal de 1961-2009 para os anos T e T-1 e os anéis de crescimento de árvores. Valores significativos ( $p < 0,05$ ) estão destacados em negrito.

Temperatura Média (Ano T)	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Coef. Correl. (r)	0,04416	0,01707	<b>-0,30057</b>	-0,1093
Temperatura Média (Ano T-1)	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Coef. Correl. (r)	-0,06205	-0,050	<b>-0,4246</b>	-0,1441

Fonte: Autor, 2016.

Figura 73 – Correlação entre a cronologia local e a precipitação média mensal e temperatura média mensal de 1961-2009 para ano anterior (T-1).



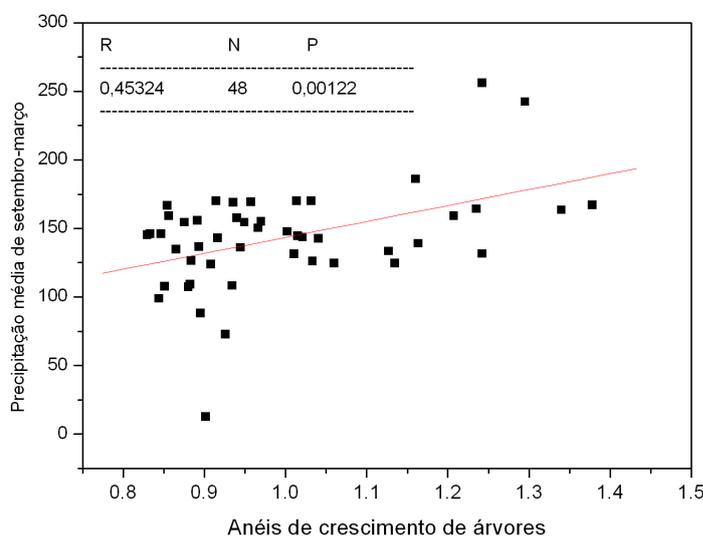
Fonte: Autor, 2016.

As correlações com a temperatura, em T e em T-1, foram majoritariamente negativas entre julho e outubro, com destaque para o mês de agosto que foi significativo em ambos os

casos. Esse comportamento pode estar vinculado ao baixo crescimento das plantas durante os meses de inverno e corrobora com a proposta de Stokes e Smiley (1996), Botosso e Mattos (2002) de que o período de crescimento das plantas ocorre na primavera/verão (lenho inicial) e o período de dormência ocorre no outono/inverno o (lenho tardio).

Tendo em vista que a correlação mês a mês para a precipitação (ano T) não mostrou um perfil definido de influência, é possível que haja maior significância no conjunto de meses da estação de crescimento (primavera - verão). Assim, considerando o período de crescimento das plantas como sendo entre setembro-março, calculou-se a precipitação média para esses meses e correlacionou-se com os anéis de crescimento. O coeficiente de correlação foi significativo ( $r = 0,45; p < 0,05$ ) (Figura 74).

Figura 74 – Gráfico de dispersão entre a cronologia local e a precipitação média para setembro-março.



Fonte: Autor, 2016.

#### 4.5.2 Regressão linear

A partir da evidência de que os meses de setembro-março influenciam no crescimento das árvores, por meio de regressão linear calculou-se os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Com esses parâmetros reconstruiu-se o perfil da precipitação para os meses de setembro-março (Equação 6).

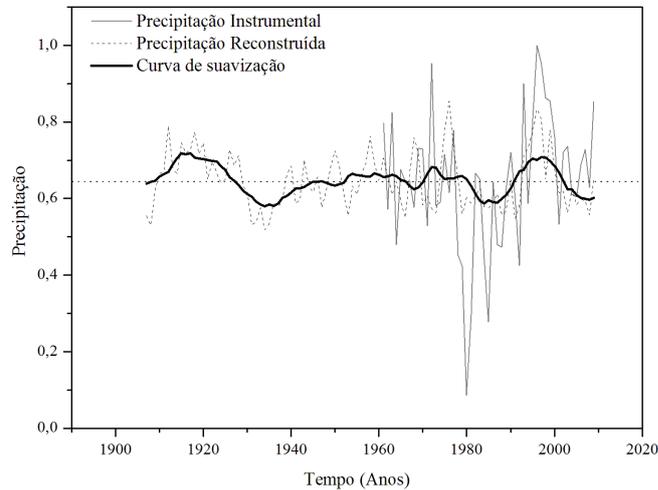
$$Y = (0,55896)I + (0,08444) \quad (6)$$

No qual,  $I$  representa a série de anéis de crescimento.

A seguir, estendeu-se a reconstrução da precipitação a todo o período de alcance da série dendrocronológica (1907-2009) (Figura 75). A série de precipitação instrumental mostra que os períodos com maior volume de precipitação foram 1961-1977 e 1992-2000 (com 212,68 mm e 223,08 mm, respectivamente) e com o menor volume os anos de 1978-1992 e 2000-2009 (160,6 mm e 190,3 mm, respectivamente). Esses perfis ficaram bem

delineados pela série reconstruída (Figura 75).

Figura 75 – Comparação da série original de precipitação (curva em cinza) e a série reconstruída (curva tracejada em preto), precipitação média para os meses de setembro a março de 1907-2009 (linha horizontal tracejada) e a média móvel para 10 anos (linha em preto).

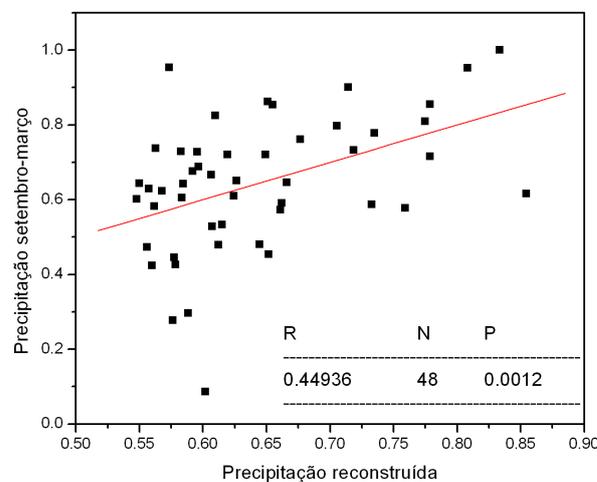


Fonte: Autor, 2016.

O perfil da precipitação para antes de 1961 é indicado pela série reconstruída e mostra que houve maior índice pluviométrico para os meses de setembro-março durante os períodos de 1907-1938 e 1939-1960 enquanto que o período de 1929-1937 registrou menor precipitação.

A série reconstruída representa 44% da série original, conforme mostra o diagrama de dispersão na Figura 76.

Figura 76 – Gráfico de dispersão entre a precipitação instrumental de setembro-março e a precipitação reconstruída por meio de anéis de crescimento.



Fonte: Autor, 2016.

## 5 Conclusões

Esta pesquisa foi realizada com todo o rigor científico possível, desde a revisão bibliográfica até o fechamento dos resultados. Procurou-se comparar e discutir os resultados junto aos trabalhos clássicos e recentes publicados em conceituados periódicos, bem como em teses e dissertações. Todo o trabalho desenvolveu-se dentro das normas da ética, respeitando direitos autorais tendo os trabalhos e seus respectivos autores e periódicos referenciados, devidamente, durante toda a escrita.

### Ciclo solar

Há evidências da presença do ciclo solar nos anéis de crescimento de árvores coletadas nas três localidades no Sul do Brasil: Fazenda Rio Grande/PR, General Carneiro/PR e Irani/SC. O mecanismo que explicaria, detalhadamente, como esses sinais ocorrem no lenho das árvores ainda não está totalmente claro. No entanto, uma das principais causas apontadas seria a variabilidade solar que modifica padrões climáticos e esses interferem no crescimento das plantas. Assim como variações na taxa fotossintética devido a variabilidade na radiação solar.

A análise espectral clássica mostrou que o ciclo de 11 anos (ciclo de Schwabe) foi, nas três localidades, o mais frequente. Curtos períodos (2-7 anos), que podem ter relação com o Enos, ocorreram nas árvores das três localidades, sendo que as cronologias de FRG apresentaram maior número de períodos dentro dessa banda. No entanto, no espectro para a cronologia média, sinais climáticos ficaram atenuados.

Longas periodicidades, como ciclo de Gleissberg, também ocorreram nas séries dendrocronológicas e, em parte, por essas serem longevas: GC (1626-2009), FRG (1620-2009) e IR (1727-2009). Periodicidades entre 35 e 45 anos ocorreram em algumas cronologias e estes podem ser sinais do Ciclo climático de Brückner ou ser o resultado da combinação de outros ciclos solares.

Os mapas de *wavelets* cruzadas entre a série temporal do número de manchas solares e as cronologias de anéis de crescimento mostram, claramente, a ocorrência da banda de 11 anos. Esse sinal persiste mais durante os máximos solares e, entre os três sítios, GC e FRG registraram esta banda com mais intensidade.

A forma como os sinais relacionados aos ciclos solares evoluem no decorrer do tempo na série dendrocronológica ainda é assunto para pesquisa e fundamentação teórica. A evolução conjunta das séries filtradas nas bandas de 11 anos e de 60 anos mostram as séries alternando-se entre fase e oposição de fase no decorrer do tempo. É discutido que uma das possíveis causas para este comportamento possa ser o batimento de ondas, seja pela atuação de outros forçantes que não foram o objetivo desse trabalho ou também pela

superposição das ondas dos sinais aqui estudados.

### **Climatologia**

A relação mês a mês com as variáveis precipitação e temperatura mostrou que a influência dessas no crescimento das plantas não ocorre de maneira explícita. A cronologia de GC apresentou correlações negativas para quase todos os meses. Apenas setembro obteve correlação positiva para a temperatura, mesmo assim, não foi significativa. A cronologia de IR apresentou correlações positivas e negativas aleatoriamente e com valores muito baixos. Apenas março e junho mostraram correlações significativas para temperatura e outubro para a precipitação. A série dendrocronológica de FRG apresentou valores mais expressivos de correlação, mas os sinais foram aleatórios entre os meses o que indica não haver período de maior ou de menor influência no crescimento. Esses resultados podem ser reforçados por meio do mapa que mostra o acumulado anual da precipitação. Os sítios de GC e IR estão situados em uma das zonas com maior acúmulo de precipitação anual, enquanto que FRG diferencia-se nesse aspecto.

Para a investigação da influência de alguns eventos Enos no crescimento das árvores, houve a influência de El Niño forte/normal e também da La Niña forte/normal quase na mesma proporção. Essa característica, de que ambas as fases do fenômeno podem agregar crescimento às árvores, reforça ainda mais a possível atuação de outros forçantes na mesma banda do Enos. De certa forma, isso poderia justificar os sinais atenuados do Enos na análise espectral, nos quais poucos deles atingiram o limiar de 95% de confiança.

### **Reconstrução**

O estudo dendroclimatológico realizado com algumas amostras de FRG mostrou que o crescimento das plantas é influenciado pela variáveis climatológicas local. No entanto, essa influência se afirmou de maneira sazonal.

Os meses de primavera-verão registram maior acúmulo de precipitação o que condiciona a planta a ter reserva de água suficiente durante a estação de crescimento. Os invernos menos chuvosos e mais frios tendem a induzir a dormência cambial, o que foi mostrado claramente com as expressivas correlações negativas entre a cronologia e a temperatura dos meses de inverno em T e em T-1.

A reconstrução representa o perfil da precipitação para os meses que mais influenciam no crescimento das árvores. Acompanhando o comportamento da série reconstruída, é possível estimar que o maior índice pluviométrico para os meses de setembro-março foi entre 1907-1938 e 1939-1960, enquanto que o período de 1929-1937 registrou menor precipitação.

## 6 Considerações Finais

A seguir, considerações à respeito do que foi desenvolvido nessa tese e o que ainda poderá ser trabalhado com o material disponível. Considerando-se que as amostras dendrocronológicas utilizadas nesse estudo tem longo alcance temporal e diferenciam-se por pertencerem à diferentes localidades. Portanto, muitos outros estudos ainda podem ser desenvolvidos com o uso destas.

\* Todo o estudo foi desenvolvido pelo método de visualização, contagem e medição. No entanto, outros tipos de análises poderiam revelar constituintes do lenho que aqui não puderam ser considerados.

\* Todas as análises foram feitas com o anel anual. Considera-se que uma investigação por densitometria de Raio X, por exemplo, poderia separar estes anéis em lenho claro e em lenho escuro e com isso identificar melhor os padrões que influenciam no crescimento da planta em cada época do ano.

\* Incluir uma gama maior de variáveis (climatológicas, ambientais, morfológicas...) poderia elencar mais ou até mesmo melhores resultados.

\* Diferentes respostas entre as localidades no estudo dendroclimatológico pode ter relação com o tipo de solo no qual as plantas cresceram e que não fez parte do foco de estudo deste trabalho.

\* Na reconstrução da precipitação primavera-verão, uma quantidade maior de amostras poderia acusar resultados mais precisos. De maneira geral, os resultados indicaram que há relação entre o crescimento da *A.angustifolia* e o clima local.

## Referências

- ALBIERO, A. *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 (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2014. Citado na página 83.
- ALVARADO, J. R. *Dendrocronologia de árvores de mogno, Swietenia macrophylla King, Meliaceae, ocorrentes na Floresta Amazônica do departamento Madre de Dios, Peru*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 51.
- ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor norte do nordeste e os eventos El Niño-Oscilação Sul (Enos). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 7, p. 583–592, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 19, 36 e 37.
- AMARAL, A. C.; FILHO, M. T. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* através de microdensitometria de raio-X. *Revista Ciência e Tecnologia*, v. 11/12, p. 17–23, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- ANDREACCI, F.; BOTOSSO, P. C.; GALVÃO, F. Sinais climáticos em anéis de crescimento de *Cedrela fissilis* Vell. Em diferentes tipologias de florestas ombrófilas do sul do Brasil. *Floresta*, v. 44, p. 323–332, 2014. Citado na página 38.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific Decadal Oscillation regimes. *Int. J. Climatol.*, v. 25, p. 2017–2030, 2005. Citado na página 37.
- BABCOCK, H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle. *Astrophys.*, v. 133, p. 572–587, 1961. Citado na página 25.
- BARBOSA, A. C.; BLITZKOW, D. *Ondaletas: Histórico e Aplicação. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional-Análise Espectral de Séries Temporais (não-Estacionárias))*. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 53.
- BARICHIVICH, J.; SAUCHYN, D. J.; LARA, A. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: responses to regional and large scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 281, p. 320–333, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 84.
- BEER, J.; MENDE, W.; STELLMACHER, R. The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, v. 9, p. 403–415, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 24, 29 e 30.
- BOTOSSO, C. P.; MATTOS, P. P. *Conhecer a idade das árvores: importância e aplicação*. [S.l.]: Embrapa Florestas, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 92.
- BRIGGS, R.; CARLISLE, R. J. *Solar Physics and Terrestrial Effects: A Curriculum Guide of teachers Grades 7-12*. [S.l.]: Space Environment Center - Boulder CO, 1996. Citado na página 28.

- BRYSON, R. A.; DUTTON, J. A. Some aspects of the variance spectra of tree rings and varves. *Ann. New York Sci.*, v. 95, p. 580–604, 1961. Citado na página 38.
- CAMPOS, C.; ALVES, R.; BRAGA, H. J. Análise climática da variabilidade da precipitação e da temperatura do ar no estado de Santa Catarina. In: *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Florianópolis: [s.n.], 2006. Citado na página 35.
- CANE, M. A. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet Science Letters*, v. 164, p. 1–10, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 59.
- CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: Uma proposta de classificação qualitativa. *Geografia*, v. 13, p. 57–71, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 81.
- CLIMANALISE. *Boletim da Climanalise*. 1996. [climanalise.cptec.inpe.br/rcli-manl/boletim/cliesp10a/chuesp.html](http://climanalise.cptec.inpe.br/rcli-manl/boletim/cliesp10a/chuesp.html). Accessed: 2015-10-28. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 36.
- COELHO, J. V. *Dendrocronologia: Método matemático para determinação da idade das árvores*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Mato Grosso, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- COFREP, P. D.; PETERS, T.; BRAUNING, A. Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, v. 133, p. 65–78, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 89.
- COLESANTI, C. A. *Ciclo de Atividade Solar No.22 Contagem de Manchas Solares*. [S.l.]: REA-Reporter, 1993. Citado na página 30.
- COOK, E. R.; KAIRIUKSTIS, L. *Methods of dendrochronology: application on the environmental sciences*. [S.l.]: Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. Citado na página 51.
- CREBER, G. T.; CHALONER, W. G. Environmental influences on cambial activity. In: *Iqbal M, ed. The vascular cambium*. Taunton, Somerset: Research Studies Press, p. 159–199, 1990. Citado na página 41.
- CUSATIS, C. A. et al. Dendroecologia de *Cedrela fissilis* na Floresta Ombrófila Mista. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, p. 287–297, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 84.
- D'ARRIGO, R.; R.; WILES, G. Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability. *Climate Dynamics*, v. 18, p. 219–224, 2001. Citado na página 39.
- DELGADO, S. C. Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos. In: ROIG, F. A. (Ed.). *Dendrocronología En América Latina*. Mendoza: EDIUNC, 2000. Citado na página 51.
- DOROTOVIC, I. et al. Impact of solar activity on the growth of pine trees: case study. *Eur J Forest Res*, v. 133, p. 639–648, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 78.
- DOUGLASS, A. E. Evidences of cycles in tree ring records. *Geophysics*, v. 19, p. 350–36, 1933. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 66.

- DUARTE, T. S. S. *Investigando o Campo Magnético das Estrelas análogas e gêmeas solares através da espectropolarimetria*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- ECHER, E. et al. O Número de Manchas Solares, índice da Atividade do Sol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, p. 157–163, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 19, 26, 28 e 29.
- EDDY, J. M. The Maunder Minimum. *Science*, v. 192, p. 1189–1202, 1976. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 31.
- EDDY, J. M. The historical record of solar activity. In: *conference on the ancient sun: fossil record in the earth, moon and meteorites*. Boulder - EUA: [s.n.], 1980. Citado na página 30.
- ENCINAS, J. I.; SILVA, G.; PINTO, J. R. R. *Idade e crescimento das árvores*. 1. ed. [S.l.]: Comunicações Técnicas Florestais, 2005. Citado na página 43.
- ENFIELD, D. B. El Niño, past and present. *Rev. Geophysics*, v. 27, p. 159–187, 1989. Citado na página 37.
- ENQUIST, B. J.; LEFFLER, A. J. Long-term tree ring chronologies from sympatric tropical dry-forest trees: individualistic responses to climate variation. *Journal of Tropical Ecology*, v. 17, p. 41–60, 2001. Citado na página 50.
- FERRAZ, J. S. Iminência de uma "Grande" Sêca Nordestina. *Revista Brasileira de Geografia.*, v. 1, p. 3–15, 1950. Citado na página 32.
- FICHTLER, E. et al. Climatic signals in tree rings of *Burkea Africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forest in Namibia. *Trees*, v. 18, p. 422–451, 2004. Citado na página 51.
- FLOWER, A.; SMITH, D. J. A dendroclimatic reconstruction of June-July mean temperature in the northern Canadian Rocky Mountains. *Dendrochronologia*, v. 29, p. 55–63, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 40, 50 e 60.
- FOMIN, I. M.; DOURADO, M. S. Caracterização Sazonal da temperatura do ar em Pontal do Paraná. In: *In: Simpósio Internacional de Climatologia*. Florianópolis: [s.n.], 2013. Citado na página 34.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul (Enos) sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, p. 127–132, 1997. Citado na página 37.
- FRIIS-CHRISTENSEN, E. Solar variability and climate. *Space Science Reviews*, v. 94, p. 411–421, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.
- FRITTS, H. C. *Tree rings and Climate*. [S.l.]: London: Academic Press, 1976. Citado 4 vezes nas páginas 38, 40, 45 e 46.
- FROHLICH, C. *Solar Constant and Total Solar Irradiance Variations*. [S.l.]: Springer New York, 2012. Citado na página 24.

- GARCIA-SUAREZ, A. M.; BUTLER, C. J.; BAILLIE, M. G. L. Climate signal in tree-ring chronology in a temperate climate: A multi-species approach. *Dendrochronologia*, v. 27, p. 183–198, 2009. Citado na página 38.
- GONÇALVES, G. V. *Dendrocronologia no Alto de S. Bento, em Évora: curva de calibração para datações no âmbito da arqueologia*. [S.l.], 2008. Citado na página 41.
- GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Ed.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 13, p. 35–58, 2000. Citado na página 37.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2863–2880, 1998. Citado na página 37.
- GUERRERO, M. El mínimo solar de Gleissberg podría afectar al "calentamiento global". Se acercan tiempos de frío o de calor? *Planetaria - Boletín oficial da la Agrupación Astronómica de la Safor mayo*, v. 78, p. 18–29, 2009. Citado na página 31.
- HAIGH, J. The Sun and the Earth's Climate. *Living Reviews in Solar Physics*, v. 4, p. 5–64, 2007. Citado na página 38.
- HOYT, D. V.; SCHATTEEN, K. H. *The role of Sun in Climate Change*. [S.l.]: Oxford University Press, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 19, 22, 32 e 65.
- JACOBY, G. C. Application of tree ring analysis to paleoseismology. *Rev. Geophys.*, v. 35, p. 109–124, 1997. Citado na página 38.
- JACOBY, G. C. et al. Temperature and precipitation in Mongolia based on dendroclimatic investigation. *LAWA Journal*, v. 20, p. 339–350, 1999. Citado na página 40.
- KANIESKI, M. R. et al. Influência da precipitação e da temperatura no incremento diamétrico de espécies florestais aluviais em Araucária- PR. *Floresta e Ambiente*, v. 19, p. 17–25, 2012. Citado na página 79.
- KITAGAWA, H.; MATSUMOTO, E. Climate implication of variation in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) during the last two millenniums. *Geophys. Res. Lett.*, v. 22, p. 2155–2158, 1995. Citado na página 31.
- KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. *Introduction to Space Physics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.
- LAMARCHE, V. C.; FRITTS, H. C. Tree-rings and sunspots number. *Tree-ring Bulletin*, v. 32, p. 19–33, 1972. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 78.
- LAMPRECHT, H. *Silvicultura nos trópicos: Ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas - possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado*. [S.l.]: Instituto de Silvicultura da Universidade Gottingen. Eschborn, 1990. Citado na página 79.

- LEITE, C. C. et al. Análise da precipitação pluviométrica no Estado do Paraná utilizando o Suffer 5.0. In: *In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Fortaleza: [s.n.], 2004. Citado na página 34.
- LISI, C. S. et al.  $^{14}\text{C}$  Bomb effect in tree rings of Tropical and Subtropical species of Brazil. *Tree Ring Research*, v. 57, p. 191–196, 2001. Citado na página 40.
- MARQUES, A. A. P. S. *The role of hydrogen and beryllium isotopes as tracers of solar and climate variability*. Dissertação (Tese de doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 25, 26 e 31.
- MATTOS, P. P. et al. Dendrocronologia de espécies da Floresta Ombrófila Mista no Município de Candói-PR. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 54, p. 153–156, 2007. Citado na página 84.
- MOLION, L. C. B. *Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico*. [S.l.]: Climanálise, 2005. Citado na página 32.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. In: . Rio de Janeiro - Brasil: [s.n.], 2000. Citado na página 32.
- MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do Estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Geosul*, v. 16, p. 69–78, 2001. Citado na página 33.
- MOREIRA, T. C. L. *Interação da vegetação arbórea e poluição atmosférica na cidade de São Paulo*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2010. Citado na página 38.
- MORI, Y. Evidence of an 11-year periodicity in tree-ring series from Formosa related to the sunspot cycle. *Journal of Climatology*, v. 1, p. 345–353, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 78.
- MURAKI, Y. et al. Solar variability and width of tree ring. *Space Sci. Trans.*, v. 7, p. 395–401, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 31, 39 e 65.
- MURPHY, J. O. Australian tree ring chronologies a proxy data for solar variability. *ASA*, v. 8, p. 292–297, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 78.
- MURPHY, J. O.; VEBLEN, T. T. Proxy data from tree-ring time series for the eleven-year solar cycle. *ASA*, v. 10, p. 64–67, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 78.
- NEELIN, J. D.; LATIF, M. El Niño dynamics. *Physics Today*, v. 51, p. 32–36, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- NERY, T. J.; CARFAN, A. C. Análise da Chuva no Estado do Paraná. In: *In: Congresso Argentino de Meteorologia*. Mendoza: [s.n.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 37.
- NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R. Árvores contam uma história do sol. *Scientific American*, v. 14, p. 30–37, 2003. Citado na página 32.
- NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R.; FARIA, H. H. Solar-terrestrial relations observed in South America tree ring records. First Latin American Advanced School on Space Environment - ASSE. 2004. Citado 3 vezes nas páginas 27, 65 e 78.

OLIVEIRA, A. G.; ROCKENBACH, M.; PACINI, A. A. Raios Cósmicos e a Heliosfera. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, p. 2–13, 2014. Citado na página 23.

OLIVEIRA, A. S. *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1986. Citado na página 32.

OLIVEIRA, G. S. O. *O El Niño e você: o fenômeno climático*. [S.l.]: Transtec Editorial, 1971. Citado na página 37.

OLIVEIRA, J. M. *Anéis de crescimento de Araucaria angustifolia (Bertol) O. Kuntze: bases de dendroecologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

OLIVEIRA, J. M.; ROIG, F. A.; PILLAR, V. D. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. *Austral Ecology*, v. 35, p. 134–147, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 50, 61 e 84.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. *Physics of Climate*. [S.l.]: Springer Verlag, USA: American Institute of Physics, 1992. Citado na página 36.

POLGE, H. Établissement des courbes de variation de la densité des bois par exploration densitométrique de radiographies de échantillons prélevés à la tarière de sur des arbres vivants. Application dans les domaines technologique et physiologique. *Annales Science Forestières*, v. 23, p. 1–206, 1996. Citado na página 41.

PRESTES, A. *Relação Sol-Terra estudada através de anéis de crescimento e coníferas de holoceno recente e do triássico*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 39, 65 e 66.

PRESTES, A. et al. Sun-earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano de Almeida, Southern Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, p. 1587–1593, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 38, 65 e 78.

PRESTES, A. et al. Imprint of climate variability on Mesozoic Fossil tree rings: Evidences of solar activity signals on environmental records around 200 million years ago? *Pure and applied Geophysics*, v. 171, p. 1983–1991, 2013. Citado na página 23.

PRIEST, E. R. *Solar magneto-hydrodynamics*. [S.l.]: Dordrecht: D. Reidel, Geophysics and Astrophysics Monographs, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

PUCHALSKI, L. A. *Efeitos associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e no déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 37.

RAKOWSKI, A. Z. et al. Increase of radiocarbon concentration in tree rings from Kujawy (SE Poland) around AD 774-775. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 361, p. 564–568, 2015. Citado na página 38.

- RASPOPOV, O. M. et al. The influence of the Vries ( 200-year) solar cycle on climate variations: Results from the Central Asian Mountains and their global link. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 259, p. 6–16, 2008. Citado na página 38.
- RASPOPOV, O. M. et al. Variations in climate parameters at time intervals from hundreds to tens of millions of years in the past and its relation to solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 73, p. 388–399, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 66.
- RASPOPOV, O. M. et al. 35-Year climatic Bruckner Cycle - Solar control of climate variability? In: . Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Spain: [s.n.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 72.
- REBELLO, E. *Anomalias climáticas e seus impactos no Brasil durante evento de El Niño de 1982-83 e previsão para o evento El Niño de 1997-98*. [S.l.]: Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1997. Citado na página 37.
- RIGOZO, N. R. *Análise por regressão iterativa de periodicidades nas variações dos cosmonuclídeos atmosféricos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$* . Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994. Citado na página 52.
- RIGOZO, N. R. *Registros da atividade solar e de outros fenômenos geofísicos em anéis de crescimento de árvore*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 51.
- RIGOZO, N. R. et al. Comparative study between four classical spectral analysis methods. *Applied Mathematics and Computation*, v. 168, p. 3411–430, 2005. Citado na página 52.
- RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R. Análise por Regressão Iterativa de Periodicidades em Séries Temporais de Registros Geofísicos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 16, p. 149–158, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 52.
- RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R. Registros da atividade solar nos anéis de crescimento de árvores em São Francisco de Paula-RS (Brasil). *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, p. 91–97, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 65.
- RIGOZO, N. R. et al. Solar variability effects by tree-ring data wavelets analysis. *Advance Space Research*, v. 29, p. 1985–1988, 2002. Citado na página 38.
- RIGOZO, N. R. et al. Search for Solar Periodicities in Tree-Ring Widths from Concórdia (S.C., Brazil). *Pure and Applied Geophysics*, v. 161, p. 221–233, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 78.
- RIGOZO, N. R. et al. Solar and climate imprint differences in tree ring width from Brazil and Chile. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 69, p. 449–458, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 32, 53 e 89.
- RIGOZO, N. R. et al. Solar maximum epoch imprints in tree-ring width from Passo Fundo, Brazil (1741-2004). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 70, p. 1025–1033, 2008. Citado na página 78.
- RIGOZO, N. R. et al. Searching ozone periodicities in Southern Brazil (29°S, 53°W). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, p. 243–252, 2012. Citado na página 52.

- RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 22, p. 135–151, 2004. Citado na página 34.
- RODRIGUEZ, R. et al. El Niño events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. *Dendrochronologia*, v. 22, p. 181–186, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 88.
- SANTAROSA, E. et al. Crescimento Sazonal em *Araucaria angustifolia*: Evidências Anatômicas. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 5, p. 618–620, 2007. Citado na página 44.
- SANTIAGO, J. M. B. *The fine structure of the sunspot penumbra*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universität zu Göttingen, 2004. Citado na página 27.
- SAVVA, Y. et al. Genetic and environment signals in tree rings from different provenances of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia. *Trees*, v. 16, p. 313–324, 2002. Citado na página 51.
- SAZONOV, B. I. Brückner cycle of droughts. In: . Leningrad - Russia: [s.n.], 1979. Citado na página 72.
- SCHWEINGRUBER, F. H. *Tree Rings and Environment: Dendroecology*. [S.l.]: Haupt Press, 1996. Citado na página 40.
- SHINDELL, D. T. et al. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, v. 294, p. 2149–2152, 2001. Citado na página 31.
- SHUMILOV, O. I. et al. Palaeovolcanos, Solar activity and pine tree-rings from the Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years. *Int. J. Environ. Res.*, v. 5, p. 855–864, 2011. Citado na página 38.
- SILVA, A. *Nossa estrela: O Sol*. 1. ed. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Física, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 22, 24, 29, 31 e 32.
- SILVA, A. C. da. *Análise dendroclimática da região de Três Barras e Canoinhas-SC*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Vale do Paraíba, 2013. Citado na página 84.
- SOUSA, P. *Estudo da Variabilidade da Precipitação no Estado do Paraná Associado à Anomalia da TSM no Oceano Pacífico*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Maringá, 2006. Citado na página 37.
- SPEER, J. H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. [S.l.]: The University Arizona Press, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 45.
- STAHL, D. et al. Recent tree-rings research in Mexico. In: ROIG, F. (Ed.). *Dendrocronologia en América Latina*. Mendoza: EDIUNC, 2000. Citado na página 41.
- STEINHILBER, F. et al. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *PNAS*, v. 109, p. 5967–5971, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 30.
- STEPKA, T. F. *Modelagem do crescimento e dendrocronologia em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa* no sul do Brasil*. Dissertação (Tese de doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2012. Citado na página 84.

- STOKES, M. A.; SMILEY, T. L. *An introduction to tree-ring dating*. [S.l.]: Tucson: University of Arizona Press, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 92.
- STUIVER, M.; BRAZIUNAS, T. F. Sun, ocean, climate and atmospheric  $^{14}\text{CO}_2$ , an evaluation of causal and spectral relationships. *The Holocene*, v. 3, p. 289–305, 1993. Citado na página 23.
- SVENSMARK, H. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Physical Review Letters*, v. 81, p. 5027–5030, 1998. Citado na página 23.
- SVENSMARK, H. Cosmoclimatology: a new theory emerges. *Astronomy & Geophysics*, v. 48, p. 18–24, 2007. Citado na página 23.
- SVENSMARK, H.; FRISS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage- a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 59, p. 1225–1232, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- TAVARES, M. Aprendendo com o Sol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 22, p. 78–82, 2000. Citado na página 19.
- THERRELL, M. D. et al. Tree-ring reconstructed rainfall variability in Zimbabwe. *Climate Dynamics*, v. 26, p. 677–685, 2006. Citado na página 40.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, v. 79, p. 61–78, 1998. Citado na página 73.
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 78, p. 2771–2777, 1997. Citado na página 85.
- TRENBERTH, K. E.; CARON, J. M. The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. *J. Climate*, v. 13, p. 4358–4365, 2000. Citado na página 36.
- TROVATI, L. R.; FERRAZ, E. S. B. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. *IPEF*, v. 26, p. 31–36, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- USOSKIN, I. G. et al. Phase evolution of solar activity and cosmic-ray variation cycles. *Solar Physics*, v. 170, p. 447–452, 1997. Citado na página 23.
- VAQUERO, J. M. A forgotten naked-eye sunspot recorded by Galileo. *Solar Physics*, v. 233, p. 283–286, 2004. Citado na página 28.
- VAQUERO, J. M. Historical sunspot observations: A review. *Adv. Space Res.*, v. 40, p. 929–941, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- VAQUERO, J. M.; VASQUEZ, M. *The Sun Recorded Through History: Scientific Data Extracted from Historical Documents, Astrophysics and Space Science Library*. [S.l.]: Springer - Berlin NY, 2009. Citado na página 28.
- VENKATAKRISHNAN, P.; GOSAIN, S. Physics of the Sun and its Atmosphere. In: *National Workshop (India) on Recent Advances in Solar Physics, World Scientific*. Meerut - India: [s.n.], 2006. Citado na página 27.

- VIEIRA, S. *Princípios de Estatística*. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2003. Citado na página 54.
- VILLALBA, R. Metodos en dendrogeomorfologia y su potencial uso en América del Sur. In: ROIG, F. A. (Ed.). *Dendrocronologia en América Latina*. Mendoza: EDIUNC, 2000. Citado na página 38.
- VINCENT, L. et al. Tree-rings and the climate of New Caledônia (SW Pacific) Preliminary results from Araucaraceae. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, v. 257, p. 477–489, 2007. Citado na página 65.
- WANG, X.; ZHANG, Q. B. Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 73, p. 1959–1966, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 78.
- WILLSON, R. C.; HUDSON, H. S. Solar luminosity variations in solar cycle 21. *Nature*, v. 332, p. 810–812, 1988. Citado na página 19.
- WOLBERG, J. R. *Prediction analysis*. [S.l.]: Van Nostrand Company, 1967. Citado na página 52.
- WORBES, M. Variety in structure of annual growth zones in *Tabebuia Barbarta* (E. Mey) Sandew., Bignoniaceae, a tropical tree from Central Amazonian inundation forests. *Dendrochronologia*, v. 6, p. 71–89, 1988. Citado na página 20.
- ZANON, M. L. *Crescimento da Araucaria angustifolia (Bertol.)Kuntze diferenciado por dioiccia*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Citado na página 42.