

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - IP&D  
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

DANIELA OLIVEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE FORÇANTES GEOFÍSICAS E CLIMÁTICAS EM  
DADOS DENDROCRONOLÓGICOS UTILIZANDO A ANÁLISE DE  
COMPONENTES PRINCIPAIS**

São José dos Campos - SP

2020

DANIELA OLIVEIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE FORÇANTES GEOFÍSICAS E CLIMÁTICAS EM  
DADOS DENDROCRONOLÓGICOS UTILIZANDO A ANÁLISE DE  
COMPONENTES PRINCIPAIS**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alan Prestes  
Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Virginia Klausner de Oliveira

São José dos Campos - SP

2020

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Silva, Daniela Oliveira da  
Avaliação de forçantes geofísicas e climáticas em dados dendrocronológicos utilizando a análise de componentes principais / Daniela Oliveira da Silva; orientador, Alan Prestes; co-orientadora Virginia Klausner de Oliveira. - São José dos Campos, SP, 2020.  
1 CD-ROM, 113 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

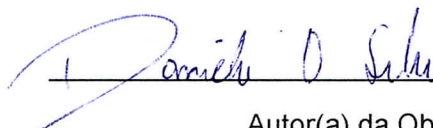
1. Física e Astronomia. 2. Dendrocronologia. 3. Registros naturais. 4. Series temporais. I. Prestes, Alan, orient. II. Oliveira, Virginia Klausner de, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Daniela Oliveira da Silva, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 8 de Maio de 2020.



Autor(a) da Obra

---

**DANIELA OLIVEIRA DA SILVA**

**“AVALIAÇÃO DE FORÇANTES GEOFÍSICAS E CLIMÁTICAS EM DADOS DENDROCRONOLÓGICOS UTILIZANDO A ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. IRAPUAN RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO

PROF. DR. ALAN PRESTES

PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> VIRGINIA KLAUSNER DE OLIVEIRA

PROF. DR. FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES

PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> MARIZA PEREIRA DE SOUZA ECHER - INPE

PROF. DR. LUIS EDUARDO ANTUNES VIEIRA – INPE

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 31 de janeiro de 2020.

*Aos meus pais, Luiz e Soraia, por toda a luta e sacrifícios para me proporcionar o melhor. Por todo amor, carinho, educação e incentivo que me fazem não desistir nas horas difíceis e de desânimo, e que foram essenciais para que eu obtivesse mais essa conquista. Tudo o que eu conquisto é graças a vocês e para vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e saúde.

Agradeço imensamente aos meus orientadores Dr. Alan Prestes e Dra. Virginia Klausner de Oliveira, por terem acreditado na minha capacidade e por todo apoio e amizade durante estes anos. Desejo que vocês sempre estejam presentes em minha vida.

Aos meus colegas do grupo de Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia (PPGFA) e alunos de iniciação científica, vocês foram essenciais em diversos aspectos, me tranquilizando e ajudando sempre que estive ao alcance de vocês. O horário do café com pipoca e boas conversas guardarei para sempre no meu coração. Obrigada.

Aos professores do PPGFA por compartilhar seus conhecimentos e também pela amizade que muito prezo. Aos colaboradores do Observatório de Astronomia e Física Espacial da UNIVAP, que me permitiram fazer parte deste grupo, enriquecendo meus conhecimentos.

Um agradecimento a Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), onde sinto como se fosse minha casa por estes 7 anos, e ao Instituto de Pesquisa de Desenvolvimento (IP&D) pela infraestrutura disponibilizada para a realização da Dissertação.

A CAPES pela disponibilização da bolsa de mestrado.

A Dra. Mariza Pereira de Souza Echer, ao Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes e ao Dr. Luis Eduardo Vieira pelas sugestões e apoio para o desenvolvimento do meu trabalho, as opiniões de vocês foram de grande ajuda.

Ao Dr. Iuri Rojahn da Silva, por disponibilizar suas séries dendrocronológicas de estudo, além de proporcionar parte de seu tempo para sanar minhas dúvidas e me ajudar com as análises.

À Dra. Alessandra Abe Pacini que é grande incentivadora de mulheres na pesquisa e graças aos seus empurrões fez com que eu me apaixonasse pela área acadêmica e pela física espacial.

Ao Dr. Oli Luiz Dors Junior que foi meu primeiro contato e incentivo para ingresso no mestrado da PPGFA da UNIVAP, e ao Dr. Arian Ojeda González que me orientou quanto aos procedimentos necessários durante o período do mestrado.

Por fim aos meus colegas Matheus Felipe de Oliveira, Marcus Vinicius Chemello, que compunham minha turma de mestrado e foram essenciais em diversos momentos nestes 2 anos, o Laboratório de Registros Naturais se tornava mais acolhedor quando com suas presenças.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*  
*(Arthur Schopenhauer)*

## RESUMO

As árvores para se desenvolverem dependem de fatores internos, fatores biológicos, e de fatores externos, fatores ambientais. Fatores biológicos determinam a tendência natural de crescimento da espécie, enquanto os fatores ambientais, como por exemplo a temperatura e a precipitação, influenciam no maior ou menor crescimento dependendo das condições serem favoráveis ou não, ou seja, um meio desfavorável reduz o crescimento, pois ele interfere em diversos processos fisiológicos essenciais. Assim, informações sobre essas variáveis são conservadas em seus anéis de crescimento. O Sol é um dos principais fatores que influenciam neste desenvolvimento, proporcionando a possibilidade da árvore realizar fotossíntese, e por sua influência na temperatura atmosférica. Devido a essa influência direta e indireta, podemos utilizar as árvores como um registro natural da relação Sol-Terra-Clima, avaliando séries temporais dos anéis de crescimento de árvores. Assim, utilizou-se amostras da espécie imbuia, (*Ocotea porosa* (Nees & Mart) Barroso), coletadas na cidade de General Carneiro, região Sudeste do Estado do Paraná (26°24'01 25"S 51°24'03 91"O), Brasil, para estudar a condições ambientais no passado desta região. As amostras selecionadas para este estudo foram obtidas por meio de Análise de Clusters, que classifica objetos (amostras) com base em suas semelhanças. Com a finalidade de obter melhores resultados, aplicou-se nas séries dendrocronológicas de imbuia o método estatístico Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* - PCA) para analisar os dados obtidos a partir da Análise de Clusters. Estudo este realizado com auxílio do Software Matlab, onde executou-se o cálculo das Componentes Principais (PC). Obtidas as PCs, reconstruiu-se as séries sem a 1ª PC, sendo esta uma estimativa da tendência que melhor representa o crescimento natural de todas as árvores do local. Esta remoção, junto com a criação de uma série dendrocronológica média, faz-se necessária para maximizar os sinais dos fatores climáticos/geofísicos, que influenciaram no desenvolvimento das árvores. Os resultados obtidos pelo método de análise por PCA foram comparados com resultados obtidos em outro estudo das mesmas amostras, que utilizou o método de ajuste de curva polinomial (ACP) para representar a tendência de crescimento de cada árvore, desta forma, validou-se a PCA como ferramenta para modelar a tendência de crescimento das árvores. O estudo dendroclimático foi realizado a partir de séries de precipitação e temperatura de reanálise obtidas em estações próximas ao local de estudo. Calculou-se a correlação de Pearson e sua significância entre a série dendrocronológica média e as séries climáticas anuais, mensais, e por estações. Os resultados obtidos mostram que as amostras da espécie imbuia do local de estudo tem estreita relação com a precipitação, apresentando melhor desenvolvimento durante as estações de primavera e verão. A partir desta conclusão, foi realizada a reconstrução dos padrões de precipitação para o local, utilizando a série de precipitação primavera-verão com a série dendrocronológica média, por meio do método de Análise de Componentes Principais e pelo método de Regressão Linear. A correlação entre

as séries reconstruídas com a série de precipitação da primavera-verão, durante os anos em que ambas as séries coexistem, deram os valores de 61,97% para a reconstrução da PCA e 39,45%, para a reconstrução da Regressão Linear. Já a correlação entre ambas as séries reconstruídas apresentou uma correlação de 91,02%. Com os resultados apresentados pela PCA para a obtenção da Série Dendrocronológica Média na reconstrução da precipitação, mostra que este método estatístico pode ser utilizado em todos os passos de análise de um estudo dendrocronológico/dendroclimático.

**Palavras-chaves:** Dendrocronologia. Análise de Componentes Principais. Registros Naturais. Dendroclimatologia. Séries Temporais.

# EVALUATION OF GEOPHYSICAL AND CLIMATE FORCES OF DENDROCHRONOLOGICAL DATA USING PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

## ABSTRACT

To develop trees depend of internal factors (biological factors), and external factors (environmental factors). Biological factors determine the natural growth trend of the species, while environmental factors, such as temperature and precipitation, influence the greater or lesser growth depending on whether conditions are favorable or not, that is, an unfavorable environment reduces growth, because it interferes with several essential physiological processes. Thus, information about these variables is conserved in their growth rings. The sun is one of the main factors that influence this development, providing the possibility for the tree to perform photosynthesis, and for its influence on atmospheric temperature. Due to this direct and indirect influence, we can use trees as a natural record of the Sun-Earth-Climate relation, evaluating time series of tree growth rings. Thus, samples of the species imbuia, (*Ocotea porosa* (Nees & Mart) Barroso), were used, collected in the city of General Carneiro, southeastern region of the State of Paraná (26°24'01 25 "S 51°24'03 91" O), Brazil, to study the environmental conditions in the past of this region. The samples selected for this study were obtained through Cluster Analysis, which classifies objects (samples) based on their similarities. In order to obtain better results, the statistical method of Principal Components Analysis was applied to the dendrochronological series of imbuia to analyze the data obtained from the Cluster Analysis. This study was carried out with the aid of the Matlab Software, where the calculation of the Principal Components (PC) was performed. Once the PCs were obtained, the series were reconstructed without the 1st PC, which is an estimate of the trend that best represents the natural growth of all trees in the place. This removal together with the creation of an average dendrochronological series is necessary to maximize the signs of climatic/geophysical factors, which influenced the development of the trees. The results obtained by the PCA analysis method were compared with results obtained in another study of the same samples, which used the polynomial curve adjustment method (*Ajuste de Curva Polinomial* - ACP) to represent the growth trend of each tree, thus validating the PCA as a tool to model the growth trend of trees. The dendroclimatic study was carried out based on precipitation and reanalysis temperature series obtained at stations close to the study site. Pearson's correlation and its significance between the average dendrochronological series and the annual, monthly, and season climatic series were calculated. The results obtained show that the samples of the imbuia species from the study site are closely related to precipitation, showing better development during the spring and summer seasons. From this conclusion, the reconstruction of precipitation patterns

for the site was performed, using the spring-summer precipitation series with the average dendrochronological series, applying the Principal Component Analysis method and also the Linear Regression method. The correlation between the reconstructed series and the spring-summer precipitation series, during the years when both series coexist, gave the values of 61.97 % for PCA reconstruction and 39.45 % for Linear Regression reconstruction. The correlation between both reconstructed series, however, showed a correlation of 91.02 %. With the results presented by the PCA to obtain the Average Dendrochronological Series in the reconstruction of precipitation, it shows that this statistical method can be used in all steps of analysis of a dendrochronological/dendroclimatic study.

**Keywords:** Dendrochronology. Principal Component Analysis. Natural Records. Dendroclimatology. Time Series.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A estrutura do Sol e suas regiões. . . . .	22
Figura 2 – Granulação da superfície solar em quatro diferentes comprimentos de onda do ultravioleta. . . . .	23
Figura 3 – O Sol gira mais rápido no equador, que cria e alonga as linhas do campo magnético ao redor da superfície solar. . . . .	24
Figura 4 – Número de ciclones do Oceano Índico e de grupos de manchas solares.	25
Figura 5 – Esq: O Sol em seu período de máximo solar (mais manchas, maior atividade magnética) em julho de 2000. Dir: O Sol no seu período de mínimo solar (menor atividade magnética), sem manchas solares, em março de 2009. . . . .	25
Figura 6 – Efeitos do clima espacial na tecnologia existente na superfície terrestre e no espaço, cujos sinais propagam-se pelo ambiente espacial. . . . .	26
Figura 7 – Estudo do Clima Passado. . . . .	27
Figura 8 – Estrutura de um anel de crescimento na qual é possível observar o lenho inicial e o lenho tardio. . . . .	29
Figura 9 – Informações retiradas da observação dos anéis de crescimento. . . . .	30
Figura 10 – Nomenclatura das mudanças climáticas. . . . .	31
Figura 11 – Comparação de um ano típico e um ano com a ocorrência do <i>El Niño</i> . Acima: Um ano normal sem a ocorrência do <i>El Niño</i> . Abaixo: Ano de ocorrência do fenômeno <i>El Niño</i> , onde a corrente oceânica se aquece na região do Oceano Pacífico Leste. . . . .	33
Figura 12 – Séries temporais de variáveis que são relacionadas ao fenômeno ENOS. Cada dado representa uma média de 1 ano ou estação, como indicado, os anos estão no eixo horizontal. (A) Temperatura da superfície do mar ( <i>Sea surface temperature</i> - TSM) do Pacífico Leste Equatorial (Costa Sul Americana), abril até março; (B) índice pluviométrico para as ilhas centrais do Pacífico Equatorial, abril até março; (C) pressão do nível do mar em Darwin, Austrália. abril até março; (D) pressão do nível do mar no Taiti, abril até março; (E) índice pluviométrico para o Pacífico Norte Subtropical, novembro até maio; (F) índice pluviométrico para a Índia, junho até setembro; (G) índice pluviométrico para o sudeste da África, novembro até maio; (H) índice de temperatura para as estações no sudoeste do Canadá e sudoeste dos Estados Unidos, novembro até abril; e (I) índice pluviométrico para estações no norte do México e a Costa do Golfo, novembro até fevereiro. Linhas verticais indicam episódios de ENOS. . . . .	35

Figura 13 – Local de coleta (em amarelo) das amostras de árvores da espécie Imbuia, em General Carneiro (marcador), Paraná, região Sul do Brasil. . . . .	40
Figura 14 – Imagem aproximada do local de coleta das amostras de árvores da espécie Imbuia, em General Carneiro, Paraná, região Sul do Brasil. . .	40
Figura 15 – Gráfico de barras da Série de Precipitação Anual (PA) e da Série de Temperatura Anual (TA) para a região de estudo. . . . .	41
Figura 16 – Diagrama de dispersão de dados simples. . . . .	42
Figura 17 – Fluxograma dos passos utilizados na programação, via MatLab. . . . .	44
Figura 18 – Árvore 16 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial. . . . .	46
Figura 19 – Árvore 20 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial. . . . .	46
Figura 20 – Árvore 21 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial. . . . .	47
Figura 21 – As quatro primeiras PCs calculadas para a Série Dendrocronológica de Imbuia deste estudo. . . . .	48
Figura 22 – Amostra A da árvore nº 1 . . . . .	51
Figura 23 – Amostra B da árvore nº 11 . . . . .	52
Figura 24 – Amostra B da árvore nº 5 . . . . .	53
Figura 25 – Amostra D da árvore nº 13 . . . . .	54
Figura 26 – Série Média . . . . .	57
Figura 27 – Comparação entre a Série Dendrocronológica e as Séries de Precipitação e Temperatura, e seus valores de correlação. . . . .	59
Figura 28 – Climatologia da precipitação (azul) e climatologia da temperatura (vermelho) distribuídas mensalmente (Janeiro à Dezembro). . . . .	61
Figura 29 – Climatologia da precipitação (azul) e climatologia da temperatura (vermelho) distribuídas em estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera). . . . .	62
Figura 30 – Gráfico da precipitação para os meses de Primavera-Verão. . . . .	63
Figura 31 – Comparação da série original de precipitação (curva em cinza) e a série reconstruída (curva pontilhada em preto), média da precipitação para os meses de setembro a março de 1907-2009 (linha horizontal tracejada) e a média móvel para 10 anos (linha em preto). . . . .	64
Figura 32 – Dispersão dos dados para a precipitação Primavera-Verão. <i>Fit</i> é o melhor ajuste entre os dados e <i>confidence bounds</i> são os limites de confiança. . .	65
Figura 33 – Reconstrução da precipitação utilizando a SDM pelo método de regressão linear. Linha em preto representa a reconstrução e a linha em vermelho é a suavização da curva. . . . .	65

Figura 34 – Reconstrução da precipitação utilizando a SDM pelo método de PCA. Linha em preto representa a reconstrução e a linha em vermelho é a suavização da curva. . . . .	66
Figura 35 – Rotação dos eixos principais. . . . .	81
Figura 36 – Amostra B pertencente à árvore nº1 . . . . .	82
Figura 37 – Amostra C pertencente à árvore nº1 . . . . .	83
Figura 38 – Amostra C pertencente à árvore nº5 . . . . .	84
Figura 39 – Amostra C pertencente à árvore nº7 . . . . .	85
Figura 40 – Amostra A pertencente à árvore nº10 . . . . .	86
Figura 41 – Amostra B pertencente à árvore nº10 . . . . .	87
Figura 42 – Amostra C pertencente à árvore nº10 . . . . .	88
Figura 43 – Amostra D pertencente à árvore nº10 . . . . .	89
Figura 44 – Amostra A pertencente à árvore nº11 . . . . .	90
Figura 45 – Amostra A pertencente à árvore nº12 . . . . .	91
Figura 46 – Amostra B pertencente à árvore nº12 . . . . .	92
Figura 47 – Amostra C pertencente à árvore nº12 . . . . .	93
Figura 48 – Amostra D pertencente à árvore nº12 . . . . .	94
Figura 49 – Amostra E pertencente à árvore nº12 . . . . .	95
Figura 50 – Amostra A pertencente à árvore nº13 . . . . .	96
Figura 51 – Amostra D pertencente à árvore nº13 . . . . .	97
Figura 52 – Amostra A pertencente à árvore nº15 . . . . .	98
Figura 53 – Amostra A pertencente à árvore nº16 . . . . .	99
Figura 54 – Amostra B pertencente à árvore nº16 . . . . .	100
Figura 55 – Amostra C pertencente à árvore nº16 . . . . .	101
Figura 56 – Amostra D pertencente à árvore nº16 . . . . .	102
Figura 57 – Amostra A pertencente à árvore nº17 . . . . .	103
Figura 58 – Amostra B pertencente à árvore nº17 . . . . .	104
Figura 59 – Amostra C pertencente à árvore nº17 . . . . .	105
Figura 60 – Amostra A pertencente à árvore nº18 . . . . .	106
Figura 61 – Amostra B pertencente à árvore nº18 . . . . .	107
Figura 62 – Amostra C pertencente à árvore nº18 . . . . .	108
Figura 63 – Amostra D pertencente à árvore nº18 . . . . .	109
Figura 64 – Amostra C pertencente à árvore nº19 . . . . .	110
Figura 65 – Amostra D pertencente à árvore nº19 . . . . .	111
Figura 66 – Amostra A pertencente à árvore nº20 . . . . .	112
Figura 67 – Amostra A pertencente à árvore nº21 . . . . .	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de amostras obtidas por árvore. . . . .	43
Tabela 2 – Amostras selecionadas pela Análise de Clusters . . . . .	44
Tabela 3 – Porcentagem que cada componente principal explica da Série Dendrocronológica de Imbuia. . . . .	49
Tabela 4 – Correlações (C) das amostras reconstruídas pela PCA com a série filtrada por Silva (2018) e, Valores de Erro Quadrático Médio para os Espectros de Frequência. . . . .	55
Tabela 5 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação Anual (PA) e a Temperatura Anual (TA), e utilizando a 2 Componente Principal (2ªPC) com a Precipitação Anual (PA) e a Temperatura Anual (TA). Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação. . . . .	58
Tabela 6 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação Mensal (PM) e com a Temperatura Mensal (TM). Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação. . . . .	60
Tabela 7 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação e com a Temperatura por estações do ano (PE e TE, respectivamente) no Hemisfério Sul. Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação. . . . .	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	- Ajuste de Curva Polinomial
ALS	- Mínimos Quadrados Alternados
C	- Correlação
EMC	- Ejeção de Massa Coronal
ENOS	- El Niño / Oscilação do Sul
EUV	- Radiação Ultravioleta Extrema
MCC	- Complexos Convectivos de Mesoescala
PA	- Precipitação Anual
PC	- <i>Principal Component</i> /Componente Principal
PCA	- <i>Principal Component Analysis</i> /Análise de Componentes Principais
PE	- Precipitação por Estação do Ano no Hemisfério Sul
PM	- Precipitação Mensal
PSE	- Partícula Solar Energética
SDM	- Série Dendrocronológica Média
TA	- Temperatura Anual
TE	- Temperatura por Estação do Ano no Hemisfério Sul
TM	- Temperatura Mensal
TSM	- Temperatura da Superfície do Mar
UV	- Radiação Ultravioleta
VS	- Valor de Significância
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos Gerais</b>	<b>18</b>
1.1.1	Objetivos Específicos	18
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da Dissertação</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Relação SOL-TERRA</b>	<b>21</b>
2.1.1	O Sol	21
2.1.2	Estudo da Relação SOL-TERRA por Registros Naturais	26
2.1.3	Dendrocronologia	28
<b>2.2</b>	<b>Mudanças Climáticas</b>	<b>30</b>
2.2.1	Forçantes Geofísicas e Climáticas	32
<b>2.3</b>	<b>Componentes Principais (PC)</b>	<b>36</b>
2.3.1	Utilização da Análise de Componentes Principais em Estudos Geofísicos	37
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Região de Estudo</b>	<b>38</b>
3.1.1	Climatologia da Região Sul do Brasil	38
3.1.2	Características do Município de General Carneiro e Séries Climáticas Regionais	39
<b>3.2</b>	<b>Regressão Linear</b>	<b>41</b>
<b>3.3</b>	<b>Material Utilizado</b>	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Obtenção das Séries Dendrocronológicas</b>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>Escolha das Amostras</b>	<b>43</b>
<b>3.6</b>	<b>Programação e Testes</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>Aplicação da PCA</b>	<b>48</b>
4.1.1	Obtenção da Série Dendrocronológica Média (SDM)	56
<b>4.2</b>	<b>Estudo Dendroclimático</b>	<b>58</b>
4.2.1	Reconstrução Climática	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>70</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A – APLICAÇÃO MATEMÁTICA DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE B – CONJUNTO DE GRÁFICOS DAS AMOSTRAS .</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dendrocronologia é o nome dado ao estudo dos anéis de árvores e nos permite inferir como eram as condições ambientais na época de formação de cada anel. O pioneirismo nesta área é dado ao Astrônomo Andrew Ellicott Doulgass, que notou por volta do ano 1900, variações na largura dos anéis em algumas árvores (SHEPPARD; GRAUMLICH, 1996). As árvores são importantes registros de uma variedade de processos naturais do ambiente, agindo como um monitor de mudanças causadas pela humanidade, como a poluição e a contaminação (SPEER, 1971).

O estudo da dendrocronologia para inferir as condições ambientais, climáticas e fenômenos geofísicos, se justifica pela distribuição espacial das árvores e ótima definição temporal, devido à presença de anéis de crescimento anuais que providenciam uma longa escala de tempo, e dentro de determinadas condições, pela sensibilidade dos parâmetros analisados aos fenômenos ambientais (luz, temperatura, quantidade e disponibilidade de água, nutrientes e condições que sejam adversas) (FRITTS, 1976).

Utiliza-se a dendrocronologia para fornecer registros de longo prazo do passado, como temperatura, precipitação, incêndio, ataques de insetos, desmoronamentos, furacões, tempestade de gelo, entre outras (SPEER, 1971). Como exemplo de aplicação, Stuiver e Quay (1980) realizaram um estudo da variação relativa da atividade do  $C^{14}$  numa cronologia de 860 anos de anéis de crescimento de árvores de uma espécie, identificando três períodos correspondentes aos mínimos da atividade solar: o mínimo de Wolf (1282 a 1342 D.C), de Spörer (1416 a 1584 D.C); e o de Maunder (1645 a 1715 D.C), segundo Sonett e Finney (1990).

Existem diversos métodos para análise de dados, a escolha do método depende das características dos dados e o que se deseja evidenciar pela análise em questão. Para dendrocronologia, comumente tem-se grande variedades de dados, ou seja, um grande número de árvores, conseqüentemente de raios medidos, por um longo período de anos, sendo assim faz-se necessário escolher uma análise estatística que auxilia na visualização dessa grande massa de dados de uma forma mais simples, mas com a menor perda de informação possível. Devido à estas peculiaridades dos dados dendrocronológicos, a Análise de Componentes Principais, que segundo Anderson (2003) consistem em combinações lineares de variáveis com propriedades especiais em relação às suas variâncias, demonstrando melhor competência para trabalhar com estes dados.

Os dados dendrocronológicos são obtidos pela medição da espessura de cada anel de crescimento da árvore, este anel que representa um ano de crescimento daquela árvores. Realizada esta medição para diversos anéis, obtêm-se uma série temporal (série

dendrocronológica). São então feitas medições para diversas árvores com o objetivo de a partir de diversas séries dendrocronológicas obter-se uma série dendrocronológica média para a região de interesse do estudo. A aplicação da Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* - PCA) em dados dendrocronológicos não apresenta grande dificuldade, exceto pelo fato de haver árvores com diferentes idades, com isso é necessário trabalhar com o método dos mínimos quadrados alternados que realiza uma extrapolação dos dados baseando-se na base de dados original.

As componentes principais (PCs) calculadas pela PCA facilitam a visualização dos fatores internos e externos que influenciaram no crescimento do grupo de árvores, assim é possível avaliar fatores geofísicos e climáticos que influenciaram no clima refletindo no desenvolvimento de cada anel de crescimento, ou seja, como a resposta de crescimento da árvore está associada as variáveis climáticas, assim como realizar uma reconstrução climática para a região analisada, essa reconstrução dependerá da idade da série dendrocronológica.

Realizar reconstruções climáticas é de suma importância pois possibilita analisar mudanças no clima, como ela variou desde a época estudada até a atualidade, para poder entender e estimar as mudanças ambientais que já ocorreram ou que ocorrerão.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O principal objetivo deste trabalho é estudar as forçantes climáticos e geofísicas que influenciam no desenvolvimento dos anéis de crescimento de imbuia, empregando o método estatístico de Análise de Componentes Principais para obtenção de uma série dendrocronologia representativa da região onde as amostras de árvores cresceram, e a partir desta, obter uma reconstrução climática para o município de General Carneiro - PR (26°43'S e 51°23'O).

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Pode-se enumerar os objetivos específicos deste trabalho da seguinte forma:

- Aplicar o método da PCA em dados dendrocronológicos utilizando o software de programação MATLAB para criação de um modelo de tendência de crescimento das árvores de imbuia da região estudada.
- Retirar as tendências de crescimento de cada amostra, maximizando os sinais de fatores externos que atuaram no desenvolvimento da árvore.
- Obter a série dendrocronológica média de imbuia representativa do ambiente para General Carneiro.
- Realizar estudo dendroclimático para a região de estudo utilizando a série dendrocronológica média e séries de precipitação e temperatura para a região.

- Aplicar o método da PCA para realização da reconstrução climática para a região de estudo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A importância do estudo do clima das décadas passadas se deve à necessidade de entender e estimar as mudanças ambientais e climáticas que já ocorreram ou que irão ocorrer. Há pouca informação de registros climáticos do passado e para suprir essa falta de informação, se faz uso de registros naturais (*proxy data*), como os dados dendrocronológicos que apresentam uma boa relação com as condições ambientais e climáticas, permitindo obter registros destas condições na época de formação de cada anel de árvore.

O estudo da dendrocronologia se justifica pela distribuição espacial das árvores e ótima definição temporal, devido à presença de anéis de crescimento anuais que providenciam uma longa escala de tempo, e por sua sensibilidade aos fenômenos ambientais e forçantes atuantes no clima.

O alto potencial do uso da PCA para a análise de séries temporais se explica devido ao fato de realizar uma transformação em uma grande quantidade de dados inicialmente correlacionados, para um conjunto de dados menos massivo e descorrelacionados entre si, de forma a facilitar a análise dos fatores de interesse do estudo.

A escolha do Software MatLab se deu pela sua facilidade em trabalhar com matrizes, diminuindo o trabalho matemático empregado e encurtando o tempo gasto para tal análise.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A partir dos objetivos desta pesquisa, dividiu-se a dissertação de tal modo que facilite o entendimento dos resultados obtidos.

- Revisão da Literatura: Uma breve informação sobre a relação Sol-Terra, sendo uma das formas de se avaliar esta relação é a utilização da Dendrocronologia. Quais são as informações obtidas, como é feita a análise dendrocronológica. São dadas as informações necessárias para se entender como funciona a Análise de Componentes Principais.
- Materiais e Métodos: Para este capítulo descreve-se o material que foi utilizado para análise, como obteve-se a série dendrocronológica, características da região de General Carneiro e da região Sul do País, como se deu a escolha dos raios melhor correlacionados que foram utilizados na pesquisa. É apresentada uma breve aplicação da PCA nos dados brutos (com todos os raios medidos), com a série recortada e tamanhos iguais, aplicado por árvore, para testar o método e se ele traria resultados plausíveis.

- Resultados e Discussão: Aplicação da PCA nos dados (com os raios escolhidos, por amostra), seus resultados e comparações com os resultados obtidos por (SILVA, 2018) que utilizou outro método de análise, e estudo dendroclimático seguido pela reconstrução climática da região.
- Conclusões: Com base nas análises e comparações realizadas, neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo são apresentados conceitos básicos sobre a atividade solar e seus efeitos no clima da Terra em diferentes escalas de tempo, bem como, os meios de estudo desta relação no passado, os registros naturais, no caso, os anéis de crescimento de árvores. Também, é apresentado o método de Análise de Componentes Principais e sua aplicação em estudos geofísicos.

### 2.1 RELAÇÃO SOL-TERRA

O Sol é a maior fonte de energia do sistema solar, emitindo energia na forma de radiação eletromagnética, e é o responsável pela existência e manutenção da vida na Terra. Assumia-se na antiguidade que a relação entre o Sol e a Terra era apenas através da incidência de radiação solar visível e infravermelha na superfície da Terra. Provou-se o contrário quando balões com instrumentos foram lançados para sondar a atmosfera superior e diversas outras radiações foram observadas (SPEER, 1971).

Para entender como o Sol e a Terra se relacionam é necessário um estudo da atmosfera solar, como ela se propaga pelo meio interplanetário, e quais os efeitos causados quando atinge a atmosfera e o campo magnético da Terra. Estes estudos se iniciaram devido à importância do Sol em fornecer luz e calor para sobrevivência da vida na Terra, para realização de fotossíntese entre outros fatores, estudou-se então métodos para verificação de variações solares e outros fenômenos geofísicos.

Dentre estes métodos têm-se os diretos, como a observação das manchas solares e as medidas de parâmetros ambientais (temperatura do ar e do oceano, pluviosidade, níveis de rios, etc). Como métodos indiretos têm-se a análise de registros naturais, permitindo obter informações em uma escala maior de tempo passado (PRESTES, 2009).

Para este capítulo serão apresentados conceitos básicos do Sol, seus efeitos na Terra, e como podemos analisar esta interação Sol-Terra.

#### 2.1.1 O SOL

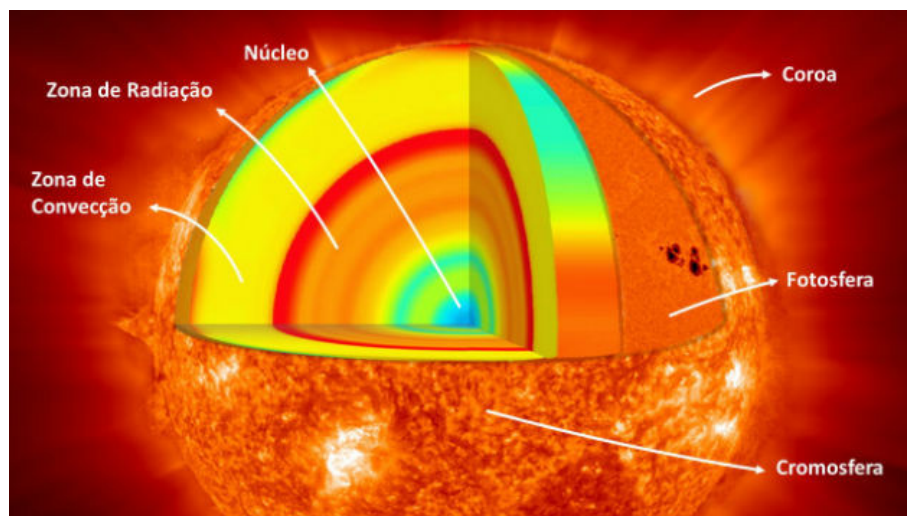
Considerado como uma estrela anã de segunda geração (emite a maior parte de sua radiação na região visível do espectro), o Sol é composto de 92,1% de hidrogênio e 7,8% de gás hélio, como também de 0,1% de diversos outros elementos químicos, como o oxigênio, o carbono, o nitrogênio, silício, magnésio, neônio, ferro, enxofre. O Sol produz energia por processo de fusão nuclear em seu centro, onde átomos de hidrogênio se combinam para produzir hélio e outros elementos, liberando energia. Esta energia ocasionalmente alcança

a superfície do Sol principalmente na forma de luz solar visível (HOYT; SCHATTEN, 1997) (MCFADDEN; WEISSMAN; JOHNSON, 2007).

O Sol perde massa por meio de três fenômenos: Vento Solar, Ejeção de Massa Coronal (EMC) e Partículas Solares Energéticas (PSE). Estes fenômenos indicam variabilidade solar pela perspectiva da matéria. Enquanto as erupções solares (*flares*) indicam a variabilidade por meio de radiação eletromagnética (GOPALSWAMY; MEWALDT; TORSTI, 2006).

A estratificação do Sol pode ser observada na Figura 1. A cadeia de reações nucleares no centro do Sol (com temperatura de 15,7 milhões de Kelvins) ocorre de forma ininterrupta, com quatro núcleos de hidrogênio se fundindo em um núcleo de hélio. Devido à diferença de massa entre estes elementos, o déficit de massa resultante é convertido em energia. Esta energia percorre a partir do núcleo, por todo o Sol, primeiro por radiação (Zona de Radiação), e depois por convecção (Zona de Convecção), por fim sendo depositada na camada superficial (fotosfera) (HOYT; SCHATTEN, 1997).

Figura 1 – A estrutura do Sol e suas regiões.



Fonte: Gouveia (2019)

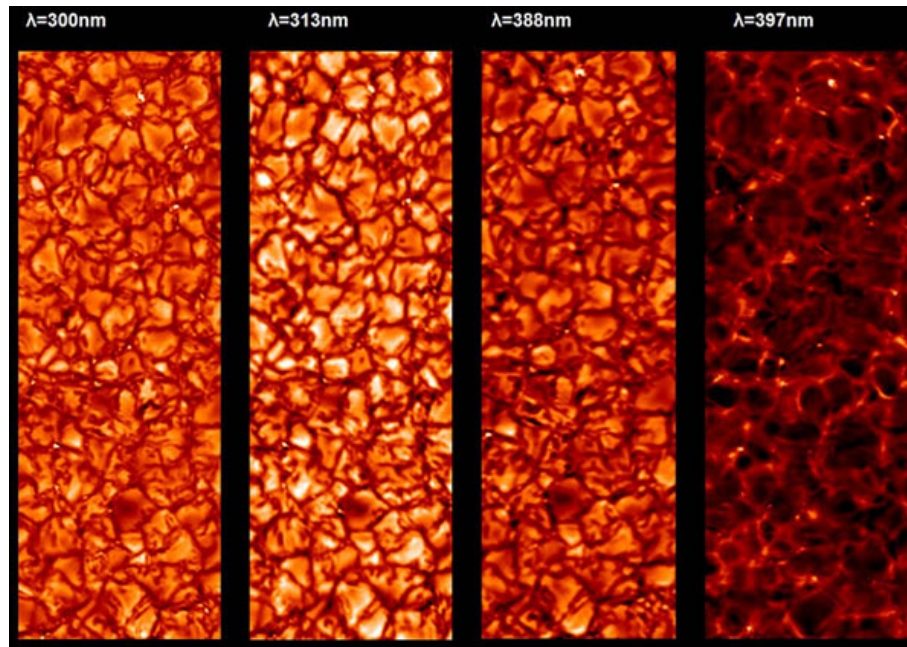
A divisão da atmosfera do Sol como mostra a Figura 1 pode ser descrita como se segue:

- Fotosfera: é a superfície visível do Sol, onde é possível visualizar as manchas solares, tem uma temperatura de em média 6400 Kelvin. A Figura 2 mostra uma imagem ampliada para observar o efeito de granulação, causada por processos de convecção na fotosfera (as áreas claras são gás quente que está subindo e as áreas escuras são gás com menor temperatura que está descendo (SOBRINHO, 2013).
- Cromosfera: esta camada é menos densa do que a fotosfera e só pode ser vista durante eclipses solares ou utilizando equipamentos especiais. É onde se registram

os fenômenos solares, como as espículas, as protuberâncias e as erupções solares (SOBRINHO, 2013).

- Coroa: é a última camada da atmosfera do Sol. Durante eclipses solares ou utilizando coronógrafos (telescópios projetados para observar a coroa solar) é possível visualizá-la (MCFADDEN; WEISSMAN; JOHNSON, 2007). A velocidade dos gases na coroa pode atingir valores superiores ao da velocidade de escape imposta pela gravidade solar, assim, algum gás da coroa consegue escapar, dando origem ao vento solar. Este vento solar atinge a Terra com velocidade entre 400 e 450 km/s (SOBRINHO, 2013).

Figura 2 – Granulação da superfície solar em quatro diferentes comprimentos de onda do ultravioleta.

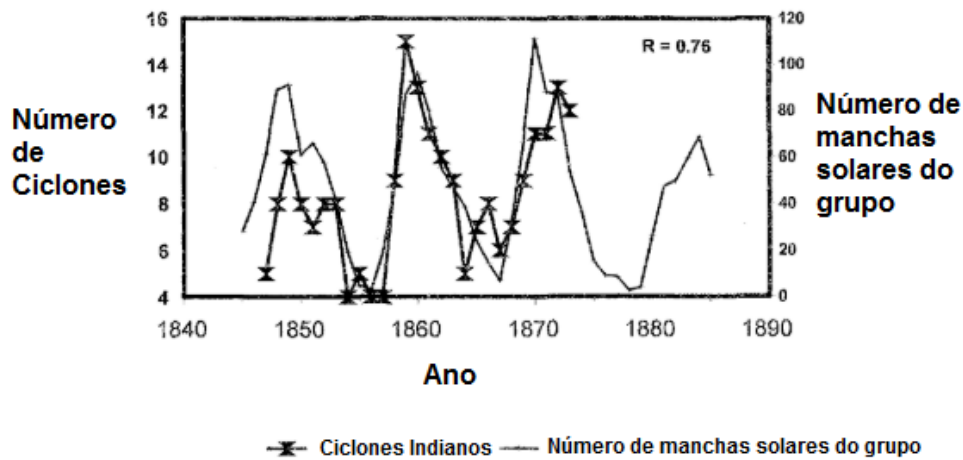


Fonte: G1 (2009) (Foto: MPI für Sonnensystemforschung).

A interação da camada convectiva do Sol e a sua rotação diferencial gera um campo magnético, pelo conhecido dínamo solar. Como o Sol tem diferentes valores de rotação para cada latitude e por possuir um campo magnético de dipolo, que é originado por uma corrente elétrica circular, o campo magnético começa a se distorcer conforme ilustra a Figura 3. Estes processos podem ocorrer em qualquer parte da zona de convecção, com diferentes resultados, sabe-se pouco sobre onde estes processos vão ocorrer (TSURUTANI; GONZALEZ, 1998; TOBIAS, 2003).



Figura 4 – Número de ciclones do Oceano Índico e de grupos de manchas solares.

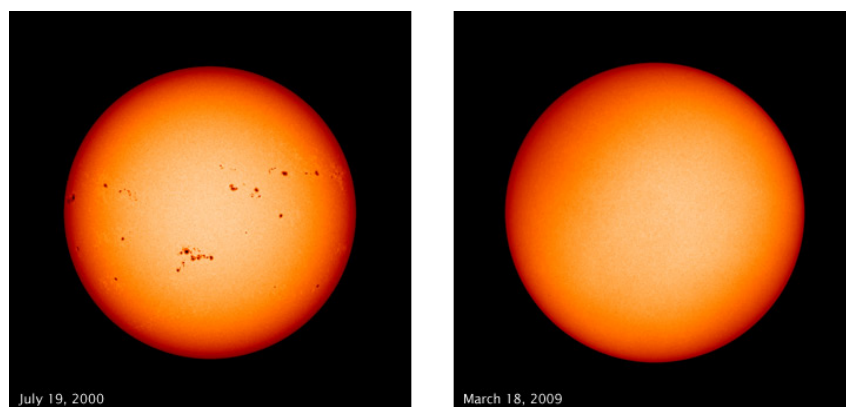


Fonte: Meldrum (1872), Meldrum (1885)

Estas manchas no Sol são regiões formadas por campos magnéticos intensos que inibem a convecção do plasma, sendo mais escuras devido à temperatura ser mais baixa que na vizinhança (por efeito de contraste, comparadas à fotosfera solar circunvizinha) (HOYT; SCHATTEN, 1997; ECHER et al., 2003).

O máximo do ciclo solar corresponde ao máximo da atividade magnética do Sol. No lado esquerdo da Figura 5 observa-se o período de atividade solar máxima do ciclo 23, com um maior número de manchas solares sendo observadas, e no lado direito, o mínimo solar deste mesmo ciclo, percebe-se a redução do número de manchas solares.

Figura 5 – Esq: O Sol em seu período de máximo solar (mais manchas, maior atividade magnética) em julho de 2000. Dir: O Sol no seu período de mínimo solar (menor atividade magnética), sem manchas solares, em março de 2009.



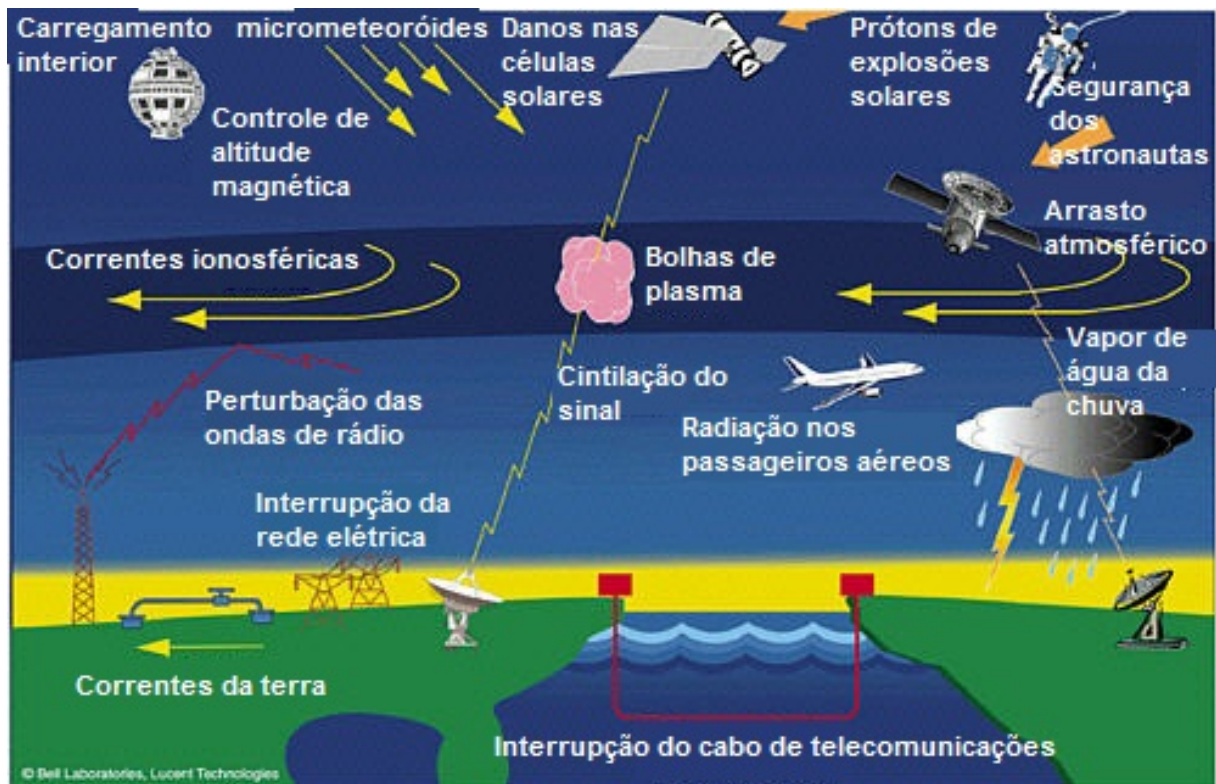
Fonte: NASA (2009)

O Sol emite partículas ionizadas para o meio interplanetário, que ganham velocidade e carregam consigo campo magnético do Sol, formando o que conhecemos como vento solar.

O vento solar se desloca pelo meio interplanetário atingindo a Terra, onde colide e interage com o campo magnético terrestre, causando perturbações neste campo e gerando efeitos no planeta como: problemas em sistemas tecnológicos terrestres, incidência de radiação em astronautas em órbita, e auroras (HOYT; SCHATTEN, 1997).

Estes efeitos gerados no planeta justificam os estudos da atividade solar. Com o crescimento de novas tecnologias e a maior dependência destas, é importante saber como a Terra é afetada pela atividade do Sol. Uma ilustração das possíveis interações do clima espacial com os sistemas tecnológicos no ambiente terrestre é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Efeitos do clima espacial na tecnologia existente na superfície terrestre e no espaço, cujos sinais propagam-se pelo ambiente espacial.

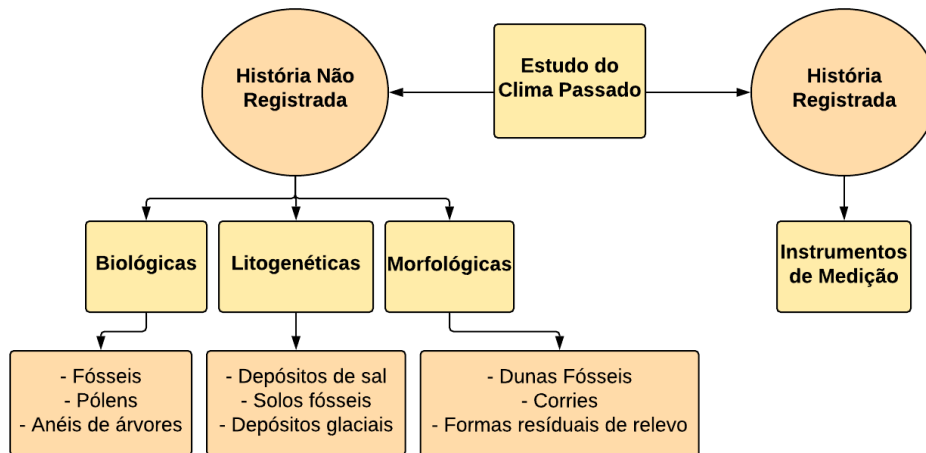


Fonte: Lanzerotti (2001)

### 2.1.2 ESTUDO DA RELAÇÃO SOL-TERRA POR REGISTROS NATURAIS

O estudo do clima passado pode ser dividido em duas partes, como mostra a Figura 7. O estudo da história registrada iniciou com o invento e utilização de equipamentos específicos para medição dos parâmetros desejados (temperatura, precipitação, entre outros).

Figura 7 – Estudo do Clima Passado.



Fonte: A autora.

Para se estudar a história não registrada é necessário utilizar evidências de fontes indiretas na crosta terrestre, que podem ser categorizadas, segundo Prestes (2009), em:

- **Biológicas:** fósseis, pólenes e anéis de árvores, etc.
- **Litogenéticas:** camadas anuais de aluviões lacustres, depósitos de sal, depósitos glaciais e solos fósseis.
- **Morfológicas:** inselbergs (relevos residuais de uma planície), terraços fluviais, dunas fósseis, corries (escavações circulares na encosta de uma montanha), eskers (depósito de materiais resultantes de erosão provocada pelo degelo de glaciares) e formas residuais de relevo.

Existem diferentes escalas de variações do clima. Nos estudos das variações de longos períodos no clima geralmente relaciona-se às mudanças das placas tectônicas, as variações associadas à rotação da Terra (causas dos ciclos glaciais e interglaciais), já os estudos das variações mais curtas (ciclo de erosão, mudança na vegetação, história da humanidade) são reconstruídos baseando-se nos ciclos de atividade vulcânica, variações dos gases na atmosfera e na atividade solar (FRITTS, 1991).

As informações sobre escalas de tempo dessas variações climáticas podem ser obtidas por registros naturais, como testemunhos de gelo, sedimentos de varves (camada anual de sedimentos ou rochas sedimentares), corais e anéis de crescimento de árvores (FRITTS, 1991).

### 2.1.3 DENDROCRONOLOGIA

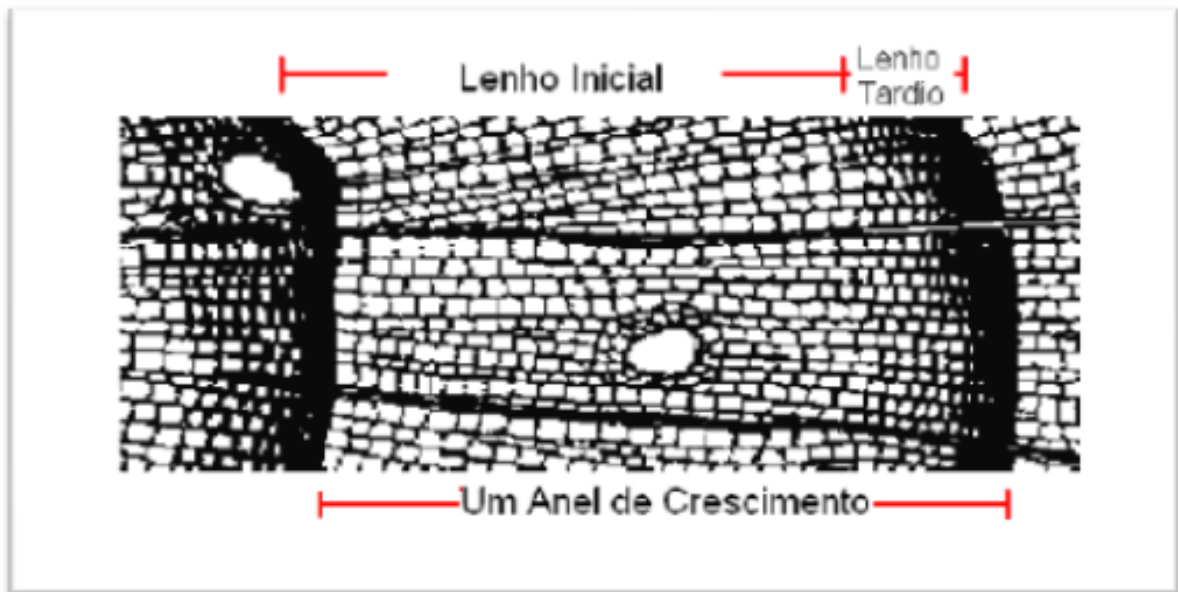
Utiliza-se os dados dos anéis de árvores para analisar os padrões espaciais e temporais da variação do clima diante de forçantes naturais (FYE; CLEAVELAND, 2001). O método dendrocronológico consiste em determinar a idade das árvores analisando seus anéis de crescimento formados em seus anos de crescimento, e retirar outras informações, como a ocorrência de eventos climáticos (SCHWEINGRUBER, 1988). Esta técnica também foi utilizada no estudo do ciclo das manchas solares, pois observou-se que as larguras de anéis de crescimento de diferentes espécies de árvores, estavam relacionadas aos períodos de mínima e máxima atividade solar (DERGACHEV; RASPOPOV, 2000; RASPOPOV et al., 2001; RIGOZO et al., 2004).

A dendrocronologia subdivide-se em várias áreas, algumas delas, segundo Seitz e Kanninen (1989), são:

- Dendroarqueologia - utiliza peças de madeira de sítios arqueológicos e de obras de arte, para estudar culturas.
- Dendroclimatologia - relaciona os anéis de árvores com as condições climáticas, o que possibilita a reconstrução do clima e das mudanças na temperatura do planeta.
- Dendroecologia - determina o desenvolvimento das árvores e define os processos de manutenção das áreas plantadas, para que haja um retorno positivo, estabelecendo também os efeitos do desmatamento.
- Dendrogeologia - relaciona a ocorrência de eventos geológicos, como erupções vulcânicas, terremotos, dunas, etc.

Os anéis de crescimento de algumas espécies de árvores apresentam zonas claras e zonas escuras, como observando na Figura 8, sendo as zonas claras a madeira formada no início do período de crescimento (lenho inicial), que têm paredes celulósicas finas e grandes diâmetros citoplasmáticos, e as zonas escuras sendo a madeira produzida no final do período de crescimento (lenho tardio), têm paredes celulósicas mais espessas e menores diâmetros citoplasmáticos (AMARAL, 1994; LISI, 2000).

Figura 8 – Estrutura de um anel de crescimento na qual é possível observar o lenho inicial e o lenho tardio.



Fonte: Prestes (2009)

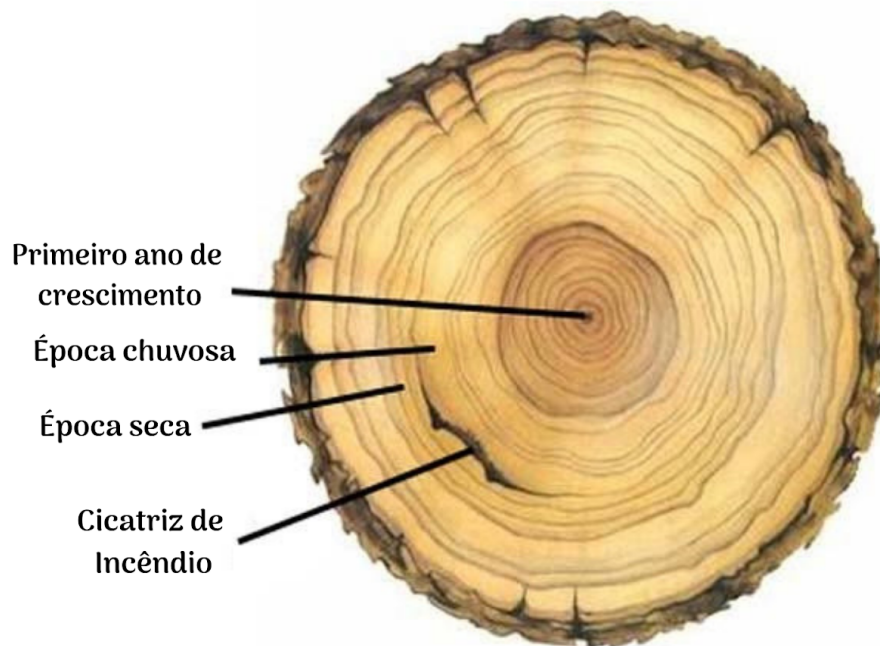
Usualmente, utiliza-se espécies arbóreas de regiões de clima temperado, devido ao inverno rigoroso causar a parada de crescimento do lenho. Mas é interessante o uso de espécies do clima subtropical e/ou tropical, pois apresentam maior biodiversidade e não há muitos estudos sobre elas (LISI, 2000).

Em regiões em que há grande contraste entre as estações, de latitude média e elevada, os anéis se apresentam bem marcados. Há também algumas espécies de árvores em que os anéis são muito nítidos, como as coníferas, por exemplo: pinheiros, araucárias, ciprestes (NORDEMANN; RIGOZO, 2003).

Nas montanhas, há excelentes fontes de registros paleoambientais, devido aos sistemas físico e biológico serem extremamente sensíveis às variações climáticas, fornecendo registros com boa resolução espacial e temporal, além disso, árvores de altas altitudes podem ter mil anos ou mais (LUCKMAN, 1994).

A Figura 9 mostra como são extraídas algumas informações nos anéis de crescimento, onde é possível observar os anéis mais espaçados (maior desenvolvimento) no período de chuvas, e um estreitamento dos anéis (menor desenvolvimento) durante o período de seca, além de uma cicatriz causada por incêndio.

Figura 9 – Informações retiradas da observação dos anéis de crescimento.



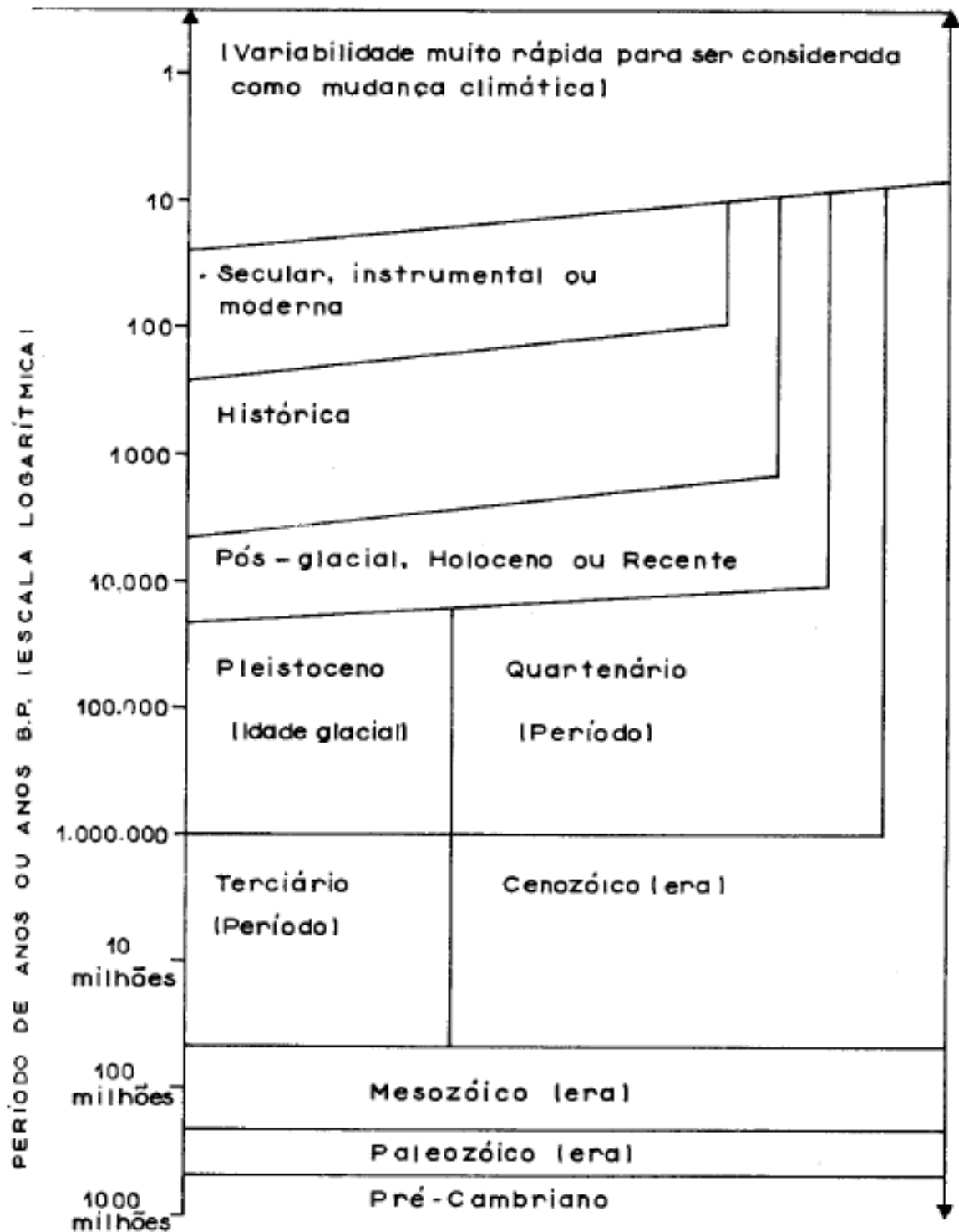
Fonte: Brasil (2019)

## 2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A atmosfera está sempre em movimento, pois existem interações dentro dela que podem gerar mudanças das características climáticas que variam dependendo do lugar, ou resultar nestas mudanças. Estes são conhecidos como mecanismos de realimentação, pois os efeitos retornam para alterar suas causas, sendo assim, fatores internos ao sistema Terra-Atmosfera podem interferir, assim como os externos (AYOADE, 1998).

O tempo atmosférico é variável, seja nos trópicos ou nas regiões temperadas, havendo mudanças diurnas e sazonais. Estas mudanças agregadas formam o clima, e há variações dele, podendo ser do tipo tendências climáticas ou ciclos climáticos. Se essas variações ocorrem por um longo período, elas provocam uma mudança no tipo de clima predominante na área, é a chamada "mudança climática" (AYOADE, 1998). As diferentes escalas das mudanças climáticas podem ser vistas na Figura 10.

Figura 10 – Nomenclatura das mudanças climáticas.



Fonte: Ayoade (1998)

O clima depende da natureza dos componentes que formam o sistema climático e como eles interagem entre si; e da natureza das condições geofísicas exteriores e quais influências exercem (HOYT; SCHATTEN, 1997; SEINFELD; PANDIS, 1998). O estado climático depende de: quantidade de energia recebida do Sol; como é a distribuição e

absorção dessa energia; interação do processo entre os componentes do sistema (PRESTES, 2009). As teorias existentes para explicação das mudanças climáticas podem ser classificadas de acordo com Ayoade (1998):

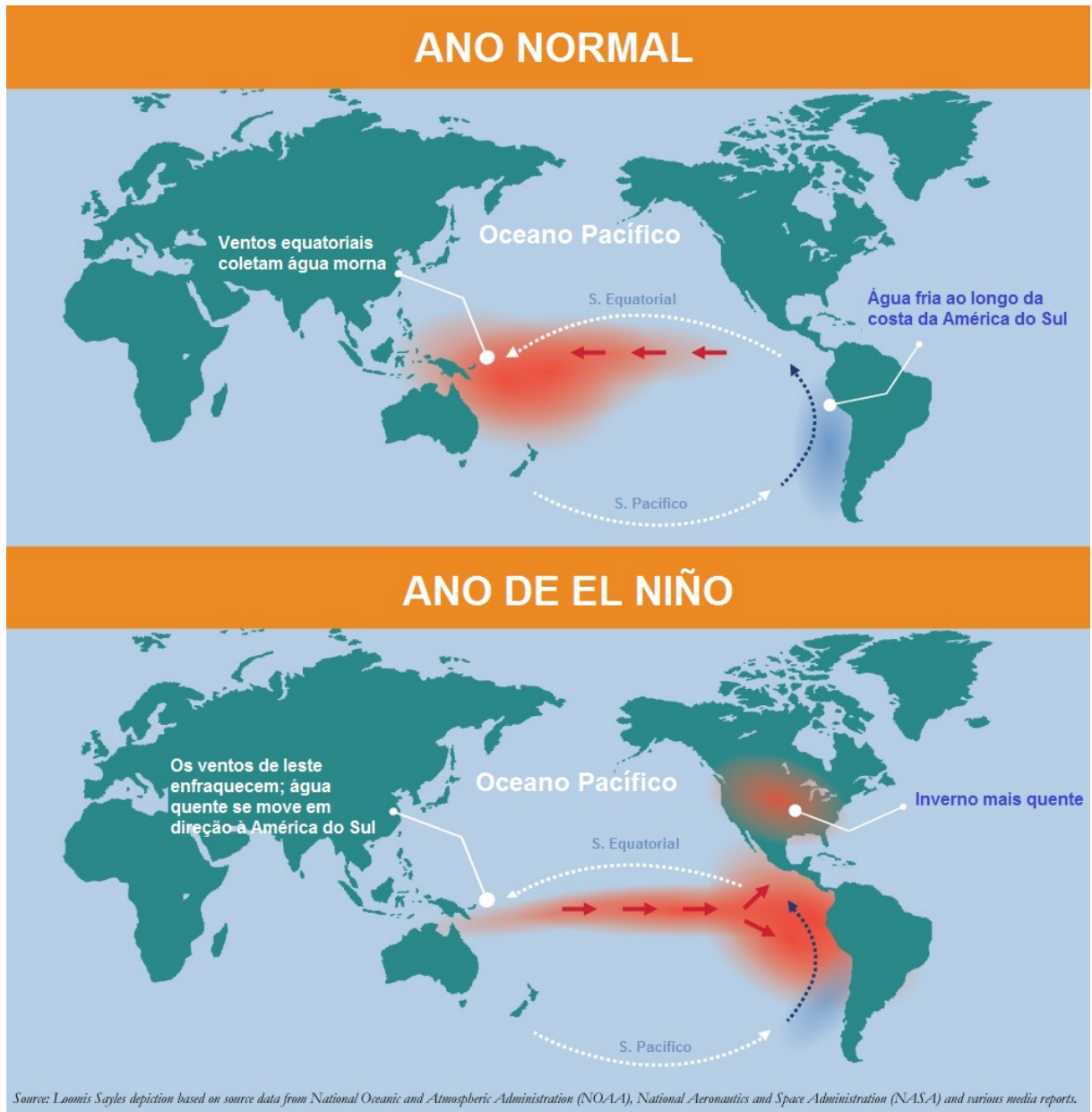
- Causas Terrestres: Migração polar e deriva continental. Mudanças na topografia da Terra. Variações na composição atmosférica. Mudanças na distribuição das superfícies continentais e hídricas. Variações na cobertura de neve e de gelo.
- Causas Astronômicas: Mudanças na excentricidade da órbita terrestre. Mudanças na precessão dos equinócios. Mudanças na obliquidade do plano da eclíptica.
- Causas Extra-terrestres: Variações na quantidade de radiação solar. Variações na absorção da radiação solar exterior à atmosfera terrestre.

### 2.2.1 FORÇANTES GEOFÍSICAS E CLIMÁTICAS

Todo o globo enfrenta diversas atuações da natureza em seu sistema, algumas delas, mais conhecidas como anomalias climáticas, ocorrem em diferentes regiões do planeta modificando a sua atmosfera padrão. De acordo com Council (1994) a radiação solar é um influenciador das circulações atmosféricas e oceânicas, podendo ter influência no surgimento de algumas anomalias climáticas.

Anomalias climáticas regionais, como recordes de temperatura, secas e tempestades incomuns podem ocorrer devido a fenômenos de interação de longa escala entre a atmosfera e o oceano. O *El Niño-Southern Oscillation* (ENOS) é um exemplo destes fenômenos. A Figura 11 exemplifica a ocorrência do mesmo.

Figura 11 – Comparação de um ano típico e um ano com a ocorrência do *El Niño*. Acima: Um ano normal sem a ocorrência do *El Niño*. Abaixo: Ano de ocorrência do fenômeno *El Niño*, onde a corrente oceânica se aquece na região do Oceano Pacífico Leste.



Fonte: Supdman (2018).

O nome “*El Niño*” se aplicava, inicialmente, à corrente oceânica fraca e quente ao longo da costa do Peru e Equador que ressurgia a época de Natal (*Niño* significa “o menino Cristo” em espanhol), posteriormente associou-se com os grandes aquecimentos que ocorrem a cada poucos anos, mudando a ecologia local (TRENBERTH, 1997).

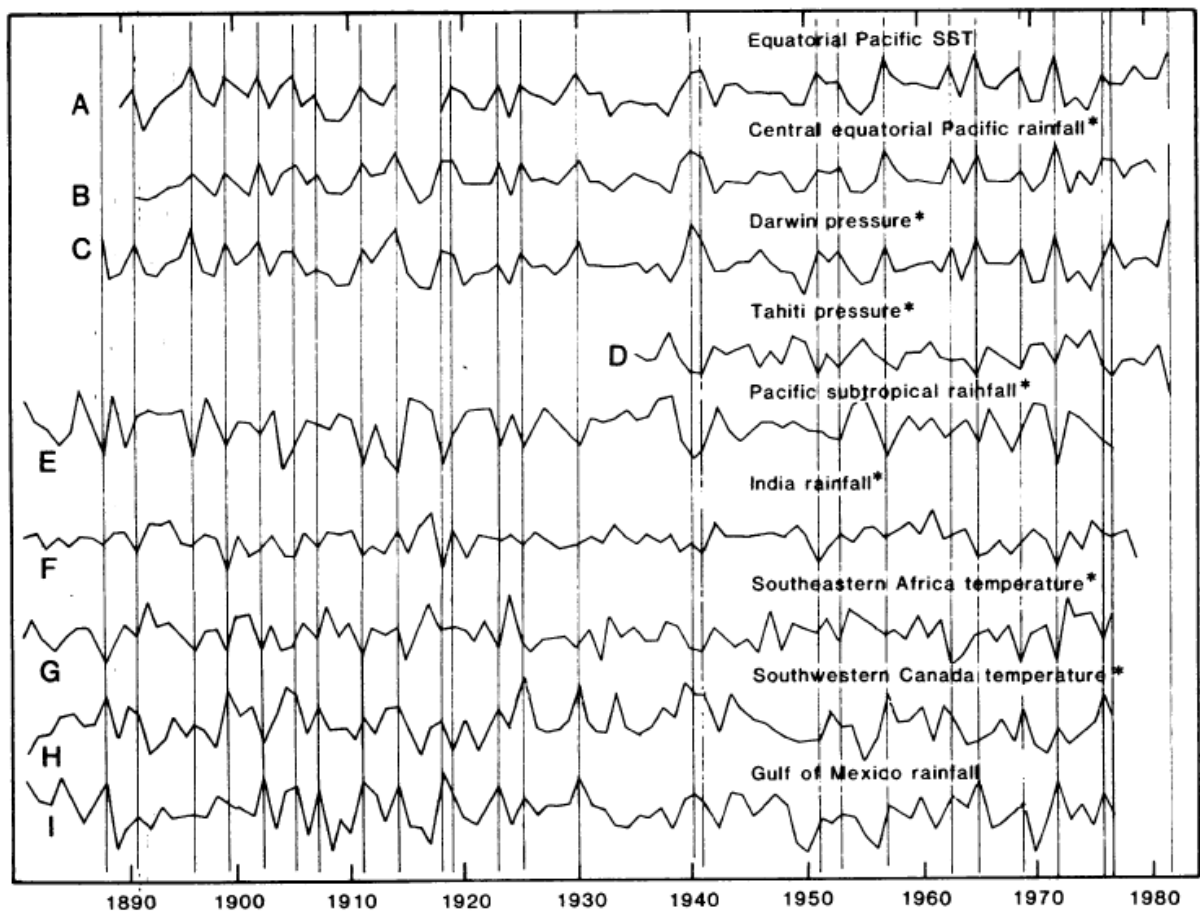
Segundo Sampaio (2000) o fenômeno ENOS é definido por anomalias positivas (*El Niño*) ou negativas (*La Niña*), sendo uma interação atmosfera-oceano associada as alterações dos padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios

na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa do Peru e no Pacífico oeste, onde fica a Austrália. Sua medição é feita a partir de índices, como a temperatura da superfície do mar (TSM) e o Índice de Oscilação Sul (IOS).

Essa interação é vista como uma evidência de como a circulação do oceano tem um papel importante no sistema climático, sendo responsável por anomalias atmosféricas (RASMUSSEN; WALLACE, 1983).

Na Figura 12 pode-se visualizar séries temporais que mostram as conexões entre a temperatura da superfície do oceano (TSM) Pacífico e as anomalias de temperatura e de precipitação em diferentes regiões do globo, onde as linhas verticais correspondem a episódios do ENOS.

Figura 12 – Séries temporais de variáveis que são relacionadas ao fenômeno ENOS. Cada dado representa uma média de 1 ano ou estação, como indicado, os anos estão no eixo horizontal. (A) Temperatura da superfície do mar (*Sea surface temperature* - TSM) do Pacífico Leste Equatorial (Costa Sul Americana), abril até março; (B) índice pluviométrico para as ilhas centrais do Pacífico Equatorial, abril até março; (C) pressão do nível do mar em Darwin, Austrália, abril até março; (D) pressão do nível do mar no Taiti, abril até março; (E) índice pluviométrico para o Pacífico Norte Subtropical, novembro até maio; (F) índice pluviométrico para a Índia, junho até setembro; (G) índice pluviométrico para o sudeste da África, novembro até maio; (H) índice de temperatura para as estações no sudoeste do Canadá e sudoeste dos Estados Unidos, novembro até abril; e (I) índice pluviométrico para estações no norte do México e a Costa do Golfo, novembro até fevereiro. Linhas verticais indicam episódios de ENOS.



Fonte: Rasmusson e Wallace (1983)

É possível perceber que as séries A até a C são bem parecidas, tendo coeficientes de correlação mútuos de 0,8 segundo relatado pelo estudo de (RASMUSSON; WALLACE, 1983). As séries C e D mostram as oscilações de pressão ao nível do mar em Darwin e Tahiti. Relações de precipitação em outras partes do trópico e do subtropico são indicadas nas séries E, F e I. Relações envolvendo anomalias climáticas regionais em latitudes extratropicais são vistas nas séries restantes (RASMUSSON; WALLACE, 1983).

Para a América do Sul, o ENOS tem grande importância, induzindo secas no Nordeste do Brasil e chuvas com inundações no Sul. Para épocas em que não havia o registro por instrumentos utiliza-se anéis de crescimento de árvores para identificá-los, assim como indentificar a influência da atividade solar (NORDEMANN et al., 2002).

### 2.3 COMPONENTES PRINCIPAIS (PC)

A Análise de Componentes Principais, ou do inglês, *Principal Component Analysis* (PCA) é geralmente aplicada em dados de grande volume. Este método pode ser utilizado em áreas distintas, como agronomia, fitotecnia, zootecnia, ecologia, biologia, psicologia, medicina, engenharia florestal, entre outras, pois auxiliam na redução da dimensionalidade, agrupando indivíduos por similiaridades, facilitando assim a análise e interpretação dos dados (REGAZZI, 2000).

O novo conjunto de variáveis conhecido como componentes principais (PC) é formado a partir de combinações lineares do conjunto original, possuindo propriedades especiais em relação às variâncias. A 1ª PC, por exemplo, é a combinação linear com a máxima variância. As PCs são apresentadas em ordem decrescente de relevância, da máxima variância até a mínima variância. A aplicação da PCA é uma transformação equivalente a uma rotação de eixos coordenados para um novo sistema de coordenadas (ANDERSON, 2003; JOHNSON; WICHERN, 2007).

Em resumo, um conjunto com grande quantidade de dados é simplificado em componentes principais. O número de componentes será equivalente ao número de variáveis do conjunto, sendo as primeiras PCs as que explicam grande parte da variabilidade dos dados originais, combinações de somente algumas PCs (geralmente as três primeiras) seriam satisfatórias para uma análise. Cada PC explica uma porcentagem do conjunto original, a 1ª PC sempre explicará a maior porcentagem, a 2ª PC explicará um pouco menos, e desta forma, até a última PC calculada, explicando sempre menos que a anterior. Uma aplicação matemática simples da PCA pode ser encontrado no Anexo 1 deste trabalho.

De acordo com PHILIPPEAU (1986), as aplicações da PCA são listadas a seguir:

1. redução dos ruídos. Quando a variação máxima é escolhida, as pequenas variações são ignoradas automaticamente;
2. redução do número de variáveis;
3. diminuição dos requisitos de capacidade e memória do computador;
4. identificação dos fatores essenciais para explicação de uma variável;
5. distinção das variáveis mais importantes em uma grande massa de variáveis e a relação entre elas;

6. geração de índices. Agrupando objetos ou indivíduos de acordo com suas similiaridades em um novo sistema de coordenadas independentes (geralmente dados pelas duas ou três primeiras PCs).

Segundo Enright (1984), a maior desvantagem da PCA é que ele necessita de um período comum de tempo entre as séries, limitando a análise ou perdendo informação ao realizar cortes na série. Para realizar o cálculo da PCA com dados faltantes, utilizou-se o método de mínimos quadrados alternados (ALS), que realiza o melhor ajuste dos dados faltantes com os dados existentes por meio da extrapolação.

### 2.3.1 UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS EM ESTUDOS GEOFÍSICOS

A PCA é frequentemente usada em estudos dendroclimatológicos como ferramenta de redução de dados, solução para questões de multicolinearidade e um método para avaliar a homogeneidade dentro de um conjunto de séries temporais (FLOWER; SMITH, 2011).

Enright (1984) realizou um estudo dendrocronológico aplicando a Análise de Componentes Principais em amostras de árvores de diferentes regiões do Canadá para comparar as respostas do crescimento das árvores com as séries de precipitação e temperatura.

Fekedulegn et al. (2002) realizaram um estudo semelhante, no qual aplicaram a Análise de Componentes Principais em seus dados já filtrados (sem o crescimento natural das árvores), mais especificamente, utilizaram a regressão de componentes principais como um método para lidar com a multicolinearidade entre variáveis independentes na análise de dados ecológicos, criando assim um modelo diagnóstico de clima em relação ao crescimento das árvores do estudo, especificamente, obtendo a sensibilidade das árvores em relação à temperatura e precipitação.

Flower e Smith (2011) utilizaram a PCA para criar uma segunda cronologia mestra de anéis de árvores da espécie *white spruce*, esta utilizada para reconstruir as temperaturas médias de junho a julho no norte das Montanhas Rochosas Canadenses para 1772 d.C.

Nordemann et al. (2008) aplicaram o método de regressão iterativa de mínimos quadrados em funções senoidais incorporadas nas componentes principais que foram extraídas de séries temporais geofísicas (número de manchas solares de 1750 a 2004), melhorando assim a análise quantitativa da periodicidade destas séries.

Estudos desenvolvidos em árvores da espécie *Araucaria araucana* (*Molina*) *K. Koch*, na Argentina, utilizaram a PCA para realizar o estudo climático, onde concluíram que o crescimento das árvores da região de estudo está fortemente relacionado de forma negativa às temperaturas durante a primavera, e associado positivamente na primavera, em relação à precipitação (MUNDO et al., 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados dados e informações quanto a região de estudo, como: as características climáticas da região Sul, dados da cidade de General Carneiro, as séries de precipitação e temperatura que são utilizadas neste trabalho para o estudo dendroclimático, as amostras utilizadas, um teste preliminar da aplicação da PCA em dados dendrocronológicos.

#### 3.1 REGIÃO DE ESTUDO

A região estudada, de onde foram retiradas as amostras das árvores de Imbuia, é a cidade de General Carneiro (26°24'01 25"S 51°24'03 91"O), estado do Paraná, Brasil, hemisfério Sul. As estações neste hemisfério são divididas da seguinte forma:

- Verão - Inicia aproximadamente 21 de dezembro, terminando aproximadamente no dia 21 de março. Apresenta temperaturas mais elevadas e dias longos.
- Outono - Inicia aproximadamente no dia 22 de março e termina aproximadamente no dia 20 de junho. Os dias são mais curtos, frescos, e inicia-se a queda de folhas e frutas já maduras.
- Inverno - Inicia em torno do dia 21 de junho encerrando aproximadamente em 23 de setembro. Geralmente ocorre queda de temperatura.
- Primavera - Com início próximo de 23 de setembro e término ao dia 21 de dezembro. É na primavera que ocorre o reflorescimento da flora.

##### 3.1.1 CLIMATOLOGIA DA REGIÃO SUL DO BRASIL

A região Sul do Brasil é localizada abaixo do Trópico de Capricórnio, zona temperada do sul. O regime térmico padrão do local é considerado frio, durante o inverno, e quente, durante o verão. A temperatura média anual para a região fica entre 14°C e 22°C, e para altitudes acima de 1.100 metros, a temperatura média é de 10°C. A precipitação média anual está entre 1.250 e 2.000 mm, com o máximo pluviométrico ocorrendo no inverno e o mínimo no verão (NERY, 2005).

Tempo e clima são duas características da atmosfera, de particular interesse da climatologia. A climatologia estuda, mais especificamente, o clima, mas buscando a compreensão do tempo, pois estão interligados. O clima é um sistema complexo, no qual ocorrem múltiplas interações entre seus componentes, por exemplo, a atmosfera, o oceano,

a hidrosfera, a criosfera, etc (VANHONI; MENDONCA, 2008). Desta forma, estudos sobre fenômenos atmosféricos e climáticos têm crescido nos últimos tempos.

O Brasil, devido à sua extensa dimensão territorial, possui regimes climáticos distintos, com condições diversificadas que são influenciadas de diferentes formas, dependendo da região do país (VANHONI; MENDONCA, 2008).

O sul do Brasil sofre maior influência dos sistemas de latitudes médias, como os sistemas frontais, sendo estes os mecanismos de chuvas durante o ano (NERY, 2005).

Para latitudes médias, a variação de temperatura anual é de suma importância para a definição do clima. No inverno, massas de ar frio de altas latitudes ingressam no sistema de média latitude, isto ajuda na predominância de temperaturas mais baixas (QUADRO, 1999).

Segundo Nery (2005), entradas de massas polares já são consideradas comuns pelos pesquisadores. O que gera maior polêmica seriam as previsões de chuvas ou massas de ar frio que vêm do continente Sul Americano. Nery (2005) afirma que os estudos de sistemas convectivos a partir de sistemas frontais são recentes se forem comparados aos estudos de massas polares. Existem outros sistemas importantes atuando na região, como os Complexos Convectivos de Mesoescala, que ocorrem, principalmente, na primavera e no verão; assim como as Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que atuam de setembro/outubro até março/abril. Estes sistemas são fundamentais para a explicação das famosas “chuvas de verão” (NERY, 2005).

Os Eventos *El Niño* – Oscilação Sul (ENOS) e *La Niña* também influenciam as chuvas na região sul do país, e são monitorados por satélites, bóias, navios e aviões, devido às suas probabilidades em alterar dinâmicas climáticas em todo o mundo. Segundo Nery (2005), na região Sul do Brasil, o *El Niño* e o *La Niña* provocam episódios de chuvas acima e abaixo do normal, respectivamente.

### **3.1.2 CARACTERÍSTICAS DO MUNICÍPIO DE GENERAL CARNEIRO E SÉRIES CLIMÁTICAS REGIONAIS**

Segundo o site da Prefeitura de General Carneiro, o município foi criado em 25 de janeiro de 1961, com população de 14.039 habitantes, em 2014, e área de extensão territorial de 1.070,30  $Km^2$ , densidade demográfica de 13,10/ $Km^2$  e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,652 em 2013. O município faz parte da mesorregião do Sudeste Paranaense e microrregião da União da Vitória, e esta a uma altitude de 983,00 m (CARNEIRO, 2020).

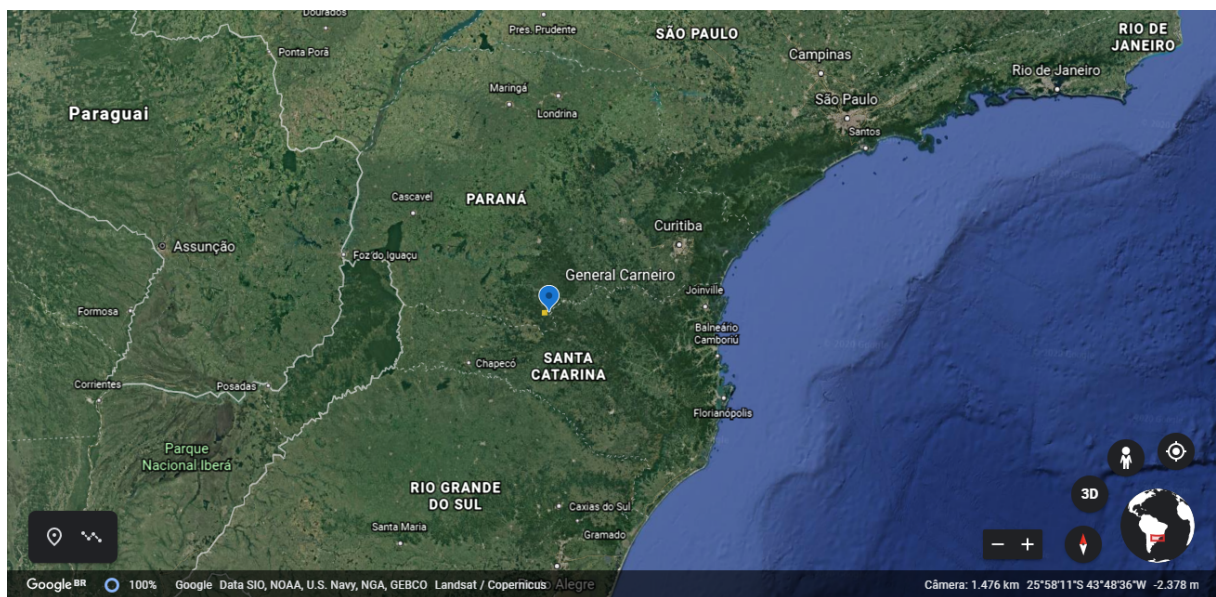
As Figuras 13 e 14 mostram o local de coleta das amostras utilizadas neste estudo, dentro do município de General Carneiro, no Paraná, região Sul do Brasil.

Figura 13 – Local de coleta (em amarelo) das amostras de árvores da espécie Imbuia, em General Carneiro (marcador), Paraná, região Sul do Brasil.



Fonte: Google Earth.

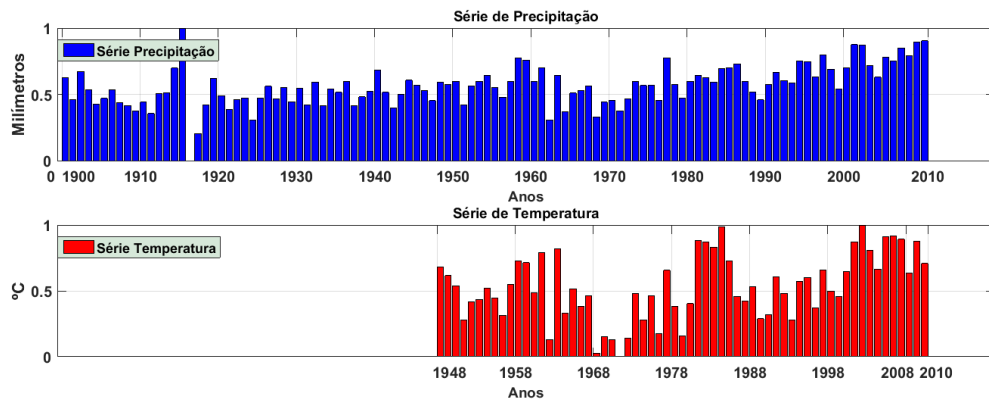
Figura 14 – Imagem aproximada do local de coleta das amostras de árvores da espécie Imbuia, em General Carneiro, Paraná, região Sul do Brasil.



Fonte: Google Earth.

Na Figura 15, são apresentadas as séries temporais anuais normalizadas da precipitação e da temperatura para a região de General Carneiro.

Figura 15 – Gráfico de barras da Série de Precipitação Anual (PA) e da Série de Temperatura Anual (TA) para a região de estudo.



Fonte: A autora.

A série de precipitação foi obtida a partir de reanálise, ou seja, obtida através da assimilação e reanálise de dados observados em diversos pontos de coleta, para período de 1900-2010, com resolução espacial de  $0,5^\circ$  Latitude x  $0,5^\circ$  Longitude grade global ( $720 \times 360$ ) mais próximo de General Carneiro Latitude =  $-26,25^\circ$  e Longitude =  $-51,25^\circ$ . Destaca-se as últimas décadas da série, nas quais houve maiores amplitudes de precipitação, e um menor volume ocorreu em 1916.

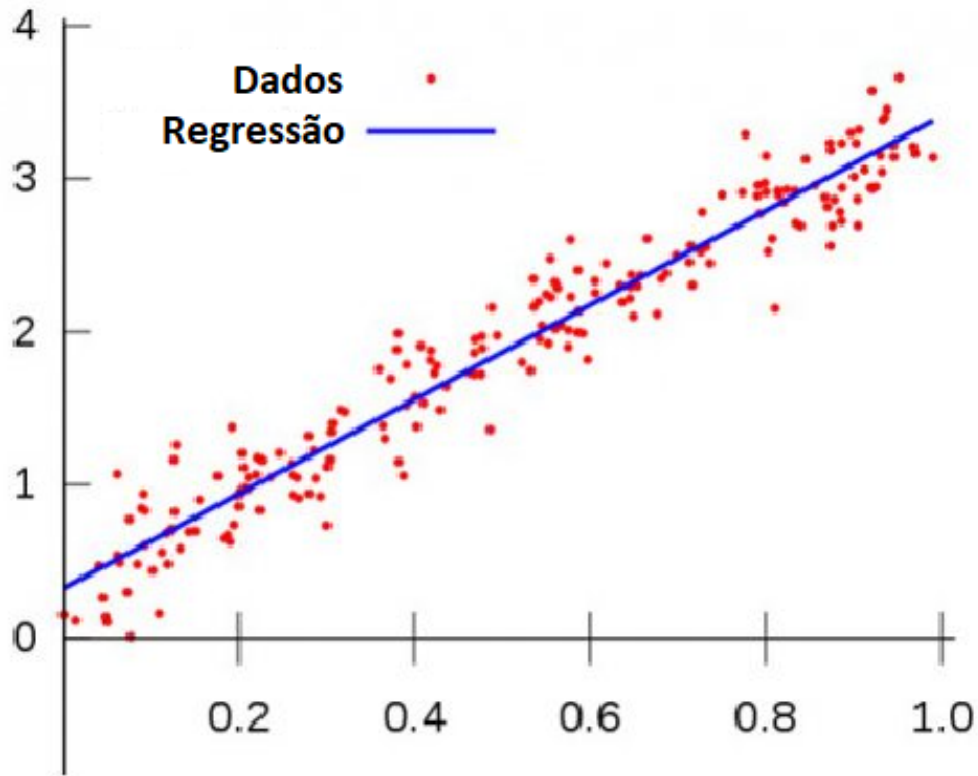
A série de temperatura, com tempo amostral de 1948 a 2010, foi obtida também por reanálise, com resolução espacial de  $0,5^\circ$  Latitude x  $0,5^\circ$  Longitude grade global ( $720 \times 360$ ) mais próximo de General Carneiro Latitude =  $-26,25^\circ$  e Longitude =  $-51,25^\circ$ . Em 1971, observa-se a menor média anual, já em 1984 ocorreu a maior média anual.

### 3.2 REGRESSÃO LINEAR

A regressão linear é utilizada neste trabalho para a reconstrução climática, e por ser o método mais utilizado nos estudos dendroclimáticos ela será comparada a aplicação da PCA para realizar a mesma reconstrução.

Uma regressão linear simples tem como base um diagrama de dispersão dos dados de estudo como mostra a Figura 16 que utiliza uma base de dados exemplo.

Figura 16 – Diagrama de dispersão de dados simples.



Fonte: Coutinho (2019)

Para criar um modelo de regressão linear simples realizamos o cálculo das variáveis pertencentes a Equação 3.1. As variáveis  $Y$ ,  $X_1$ ,  $a$  e  $b$ , que significam, respectivamente, o valor da previsão de  $Y$  para uma observação  $X_1$ , o valor de  $X$  para a observação  $i$ , parâmetro de intercepto da reta, parâmetro de inclinação da reta (MARTINS; DOMINGUES, 2001).

$$Y = a + bX_1 \quad (3.1)$$

Existem diversos métodos para determinar estas variáveis, sendo a mais eficaz o Método dos Mínimos Quadrados. Ressalta-se que estes cálculos podem ser realizados utilizando linguagem de programação, que é como foi realizada por este trabalho (MARTINS; DOMINGUES, 2001).

### 3.3 MATERIAL UTILIZADO

O conjunto de dados utilizado nesta dissertação são séries de anéis de crescimento de árvores da espécie *Ocotea porosa* (Nees & Mart) Barroso, conhecida como imbuia,

provindas da região Sudeste do estado do Paraná, município de General Carneiro. Foram obtidas 64 amostras a partir de 21 árvores, coletadas em janeiro de 2013 por método não-destrutivo, com auxílio de sondas de Pressler, na altura do DAP (1,30 m). O número de amostras obtidas de cada árvore é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de amostras obtidas por árvore.

<b>Árvore</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>Amostras</b>	3	2	3	2	4	3	3	3	3	4	2	5	4	2	2	4	3	4	4	1	3

Fonte: Silva (2018)

### 3.4 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DENDROCRONOLÓGICAS

As amostras foram, inicialmente, polidas na superfície transversal com diferentes lixas (de 50 a 600 granos). Para realizar as medidas dos anéis de crescimento, utilizou-se uma mesa de mensuração VELMEX, com precisão de 0,001 mm, conectado a um microscópio estereoscópico com retículo micrométrico do Laboratório de Registros Naturais, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP. A datação foi feita no sentido da casca para a medula, o último anel formado até a data de coleta foi o anel correspondente ao ano de 2011, pois o início de formação de um anel se dá na Primavera/Verão, desta forma, o anel correspondente ao ano de 2012 não havia completado seu crescimento em Janeiro de 2013. Os valores foram inseridos em planilhas eletrônicas.

### 3.5 ESCOLHA DAS AMOSTRAS

A escolha das amostras foi feita por Silva (2018), utilizando o processo hierárquico aglomerativo, com a medida de dissimilaridade entre os elementos (Análise de Clusters) dada pela distância Euclidiana Quadrática, empregando o método de variância de Ward. Representou-se os grupos formados por dendrogramas, com o Software IBM SPSS Statistics. Então, das 64 amostras, foram escolhidas 37 amostras listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Amostras selecionadas pela Análise de Clusters

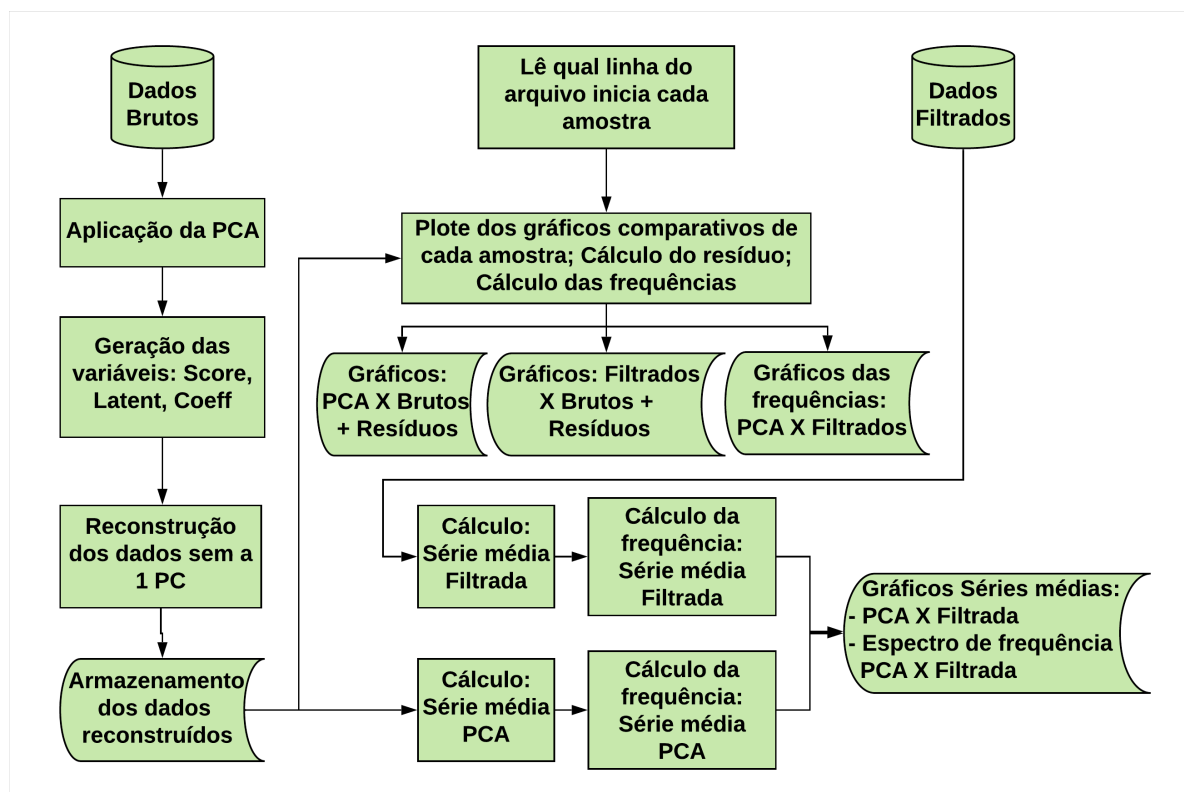
Árvore	Amostra(s)
1	A, B e C.
4	A e B.
5	B e C.
7	C.
10	A, B, C e D.
11	A e B.
12	A, B, C, D e E.
13	A e D.
15	A.
16	A, B, C e D.
17	A, B e C.
18	A, B, C e D.
19	C e D.
20	A.
21	A.

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

### 3.6 PROGRAMAÇÃO E TESTES

Os passos para a programação se deram conforme o fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma dos passos utilizados na programação, via MatLab.



Fonte: A Autora.

Com base no fórum do Software Matlab e segundo Enright (1984), o PCA não é bem aplicado quando existem muitos valores faltantes (lacunas ou dados de tamanhos diferentes), como é o caso dos dados utilizados no presente trabalho. Mas, seguindo a base de dados do MatLab, fez-se o uso do comando interno do MatLab “pca” utilizando o algoritmo de Mínimos Quadrados Alternados (*Alternating least squares*), ou “als”, para fazer as aproximações dos dados faltantes. Este algoritmo procura a melhor aproximação de classificação, realizando uma fatoração no dado de entrada, pelo método iterativo, que inicia com valores iniciais aleatórios. A utilização deste algoritmo se deu devido á sua capacidade de trabalhar com valores ausentes (*Not a Number* - NaN). Este comando facilita a aplicação do método, pois já contém a devida programação do procedimento do PCA, e foi testado por um vasto número de usuários do MatLab.

O comando “pca” tem um bom desempenho para conjuntos de dados com uma pequena porcentagem de valores ausentes, e desempenho ruim para conjuntos de dados com grandes quantidades de valores faltantes. Para calcular os dados faltantes, o comando gera uma matriz de índices randômicos para iniciar os cálculos, sendo gerada uma matriz diferente para cada vez que o programa é executado. Devido este fato, fez-se necessário uma alteração dentro do comando “pca”, para sempre manter a primeira matriz gerada. No entanto, ainda é necessário um estudo mais aprofundado em como obter a melhor matriz de índices.

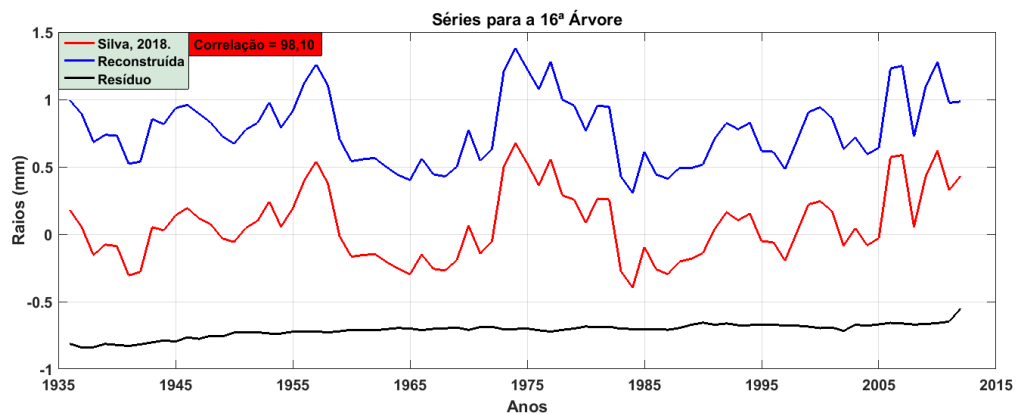
O comando “pca” retorna todas variáveis necessárias para avaliação dos dados de estudo, estas estão relacionadas a seguir.

- **coeff**: Coeficientes ou autovetores das componentes principais. Cada coluna do coeff contém coeficientes para uma PC. As colunas estão na ordem de variação descendente.
- **score**: Pontuações dos componentes principais. São as projeções em cada componente principal retornadas como uma matriz. Linhas de pontuação correspondem a observações e colunas a componentes.
- **latent**: Desvios das componentes principais, ou seja, os autovalores. São os valores próprios da matriz de covariância de X.
- **explained**: Porcentagem da variação total explicada. Porcentagem da variação total explicada por cada componente principal.
- **mu**: Média estimada. Média estimada das variáveis em X, retornada como um vetor de linha quando “Centered” está definido como verdadeiro. Quando “Centered” é falso, o software retorna um vetor de zeros.

Para a validação de que o método de PCA é aplicável aos dados dendrocronológicos, ele foi aplicado primeiramente em um recorte nos dados brutos (antes da seleção das 37 amostras específicas que entraram na análise final), e fez-se a média das amostras de acordo com a sua respectiva árvore. O recorte fez-se necessário para que as árvores iniciem e terminem no mesmo período, ou seja, que iniciassem no mesmo ano e terminassem no mesmo ano. Todas as amostras então iniciam no ano de 1935.

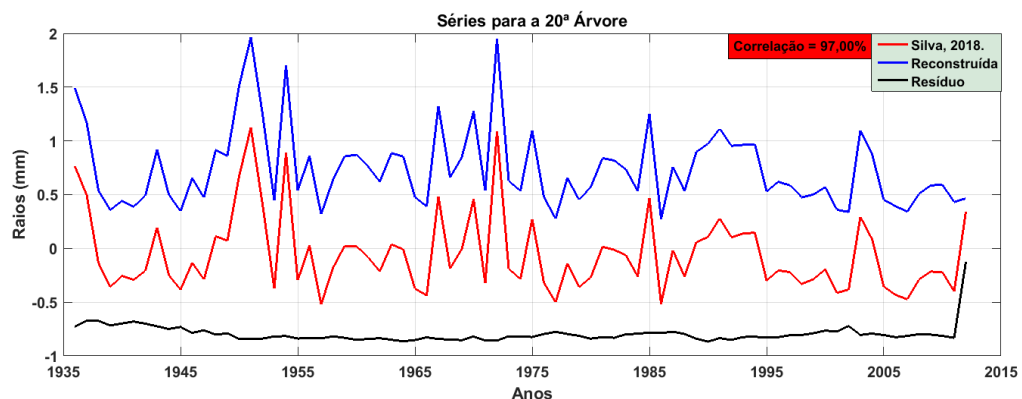
Aplicou-se a PCA e foram obtidos gráficos comparativos do método da PCA com o Ajuste de Curva Polinomial realizado por Silva (2018). Para o teste, foi aplicado inicialmente para cada árvore (para árvores com mais de uma amostra, foi feita uma média). É possível ver a comparação dos métodos nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Árvore 16 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial.



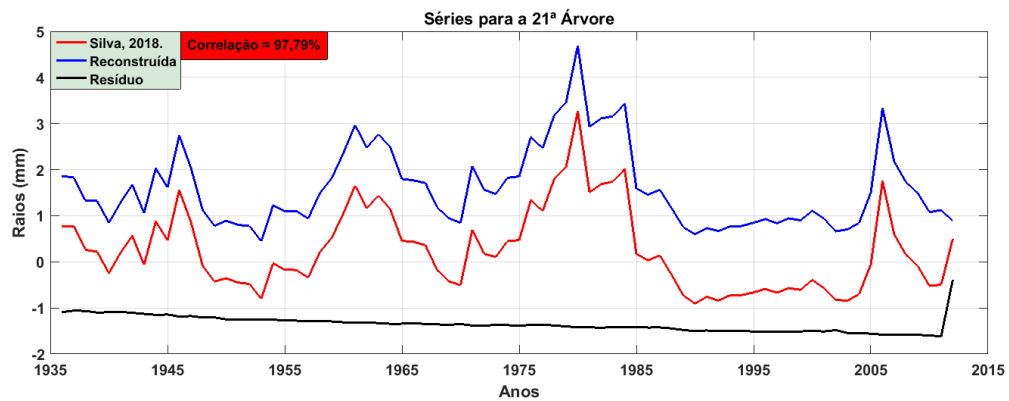
Fonte: A Autora.

Figura 19 – Árvore 20 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial.



Fonte: A Autora.

Figura 20 – Árvore 21 - Comparação dos métodos: Análise de Componentes Principais e Ajuste de Curva Polinomial.



Fonte: A Autora.

Em sua maioria (de todas as 21 árvores analisadas), a porcentagem de correlação foi maior que 70%. Os três gráficos acima (Figura 18, Figura 19, e Figura 20) foram os que obtiveram as melhores correlações para os dados recortados em tamanhos idênticos (mesmo período de anos).

Para aplicar este teste, realizou-se o cálculo da média das amostras pertencentes a uma mesma árvore, desta forma, aplicou-se a PCA em árvores, e não em amostras isoladas. Após este teste optou-se por realizar a aplicação da PCA por amostras isoladas, pois verificou-se que os resultados são melhores aumentando o número amostral.

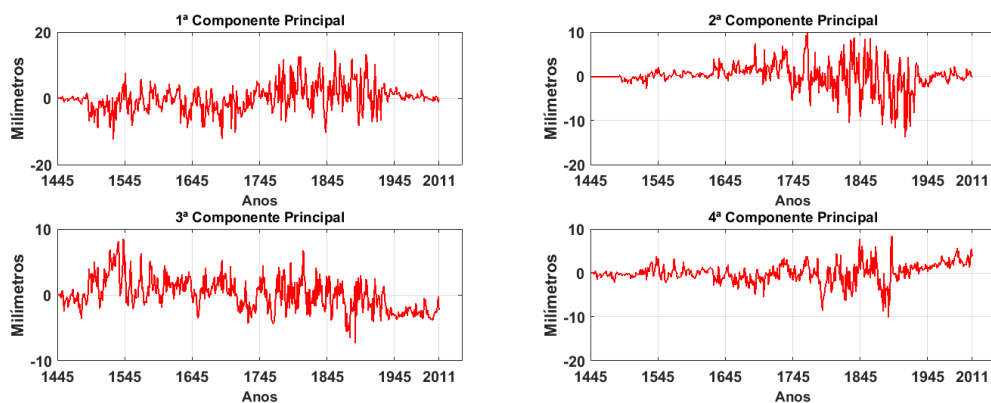
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são apresentados os procedimentos de análise das séries temporais da espessura dos anéis de crescimento por PCA e a obtenção da série dendrocronológica média de imbuia. Também, é descrito o estudo dendroclimático e uma reconstrução climática para o local de estudo.

### 4.1 APLICAÇÃO DA PCA

Seguindo metodologia do fluxograma da Figura 17, foram calculadas as Componentes Principais dos dados de entrada. As quatro primeiras PCs podem ser visualizadas na Figura 21.

Figura 21 – As quatro primeiras PCs calculadas para a Série Dendrocronológica de Imbuia deste estudo.



Fonte: A Autora.

Escolheu-se representar graficamente apenas as primeiras 4 PCs, pois, elas são as componentes que contêm maior variância da série. As porcentagens de variância calculadas para as primeiras 24 PCs estão representadas na Tabela 3, sendo esta porcentagem o quanto cada PC explica dos dados de entrada, que são os valores de raios medidos ano a ano, para 37 amostras de árvores. As 13 PCs restantes não foram mostradas pois seus valores são muito pequenos.

Tabela 3 – Porcentagem que cada componente principal explica da Série Dendrocronológica de Imbuia.

	Variância		Variância		Variância
<b>1<sup>a</sup>PC</b>	21,01 %	<b>9<sup>a</sup>PC</b>	2,82 %	<b>17<sup>a</sup>PC</b>	1,12 %
<b>2<sup>a</sup>PC</b>	17,32 %	<b>10<sup>a</sup>PC</b>	2,61 %	<b>18<sup>a</sup>PC</b>	1,06 %
<b>3<sup>a</sup>PC</b>	10,48 %	<b>11<sup>a</sup>PC</b>	2,03 %	<b>19<sup>a</sup>PC</b>	0,95 %
<b>4<sup>a</sup>PC</b>	8,89 %	<b>12<sup>a</sup>PC</b>	1,77 %	<b>20<sup>a</sup>PC</b>	0,83 %
<b>5<sup>a</sup>PC</b>	6,26 %	<b>13<sup>a</sup>PC</b>	1,52 %	<b>21<sup>a</sup>PC</b>	0,79 %
<b>6<sup>a</sup>PC</b>	4,67 %	<b>14<sup>a</sup>PC</b>	1,41 %	<b>22<sup>a</sup>PC</b>	0,75 %
<b>7<sup>a</sup>PC</b>	3,92 %	<b>15<sup>a</sup>PC</b>	1,26 %	<b>23<sup>a</sup>PC</b>	0,67 %
<b>8<sup>a</sup>PC</b>	2,93 %	<b>16<sup>a</sup>PC</b>	1,24 %	<b>24<sup>a</sup>PC</b>	0,56 %

Fonte: A Autora.

Em seguida, foi realizada a transformação de volta para o espaço original, ou seja, a reconstrução dos dados, mas sem a 1<sup>a</sup> Componente Principal (1<sup>a</sup> PC), considerando que ela é representativa da tendência de crescimento natural (modelo de crescimento) de todas das árvores do local, para a espécie imbuia, ou seja, o fator de influência interna no desenvolvimento das árvores. Com isso, procura-se maximizar os sinais dos fatores externos (forçantes climáticos e geofísicos) que atuaram em seu desenvolvimento, melhorando o estudo dendroclimático e a reconstrução climática para a região.

Obteve-se três tipos de gráficos comparativos para cada amostra individual: um gráfico com os dados originais e a série reconstruída, empregando o método de componentes principais; um gráfico do método de Ajuste de Curva Polinomial, com a remoção das tendências naturais de crescimento utilizado por Silva (2018), no qual também são apresentados os dados originais (com a tendência de crescimento natural) e a série filtrada (sem a tendência de crescimento); e por fim, um gráfico da espectro de frequência das amostras, comparando ambos os métodos.

As Figuras 22, 23, 24 e 25 trazem os gráficos selecionados para apresentar os resultados obtidos e ilustrar a aplicação da PCA. Os gráficos das demais amostras se encontram no Apêndice A.

Utilizou-se a série original para comparação entre os métodos. Primeiramente, por meio das componentes encontradas construiu-se uma série sem a 1<sup>a</sup> PC. Fazendo a subtração da série original pela série reconstruída, obtem-se um série residual. Cada série residual é a tendência de crescimento natural de cada amostra de árvore.

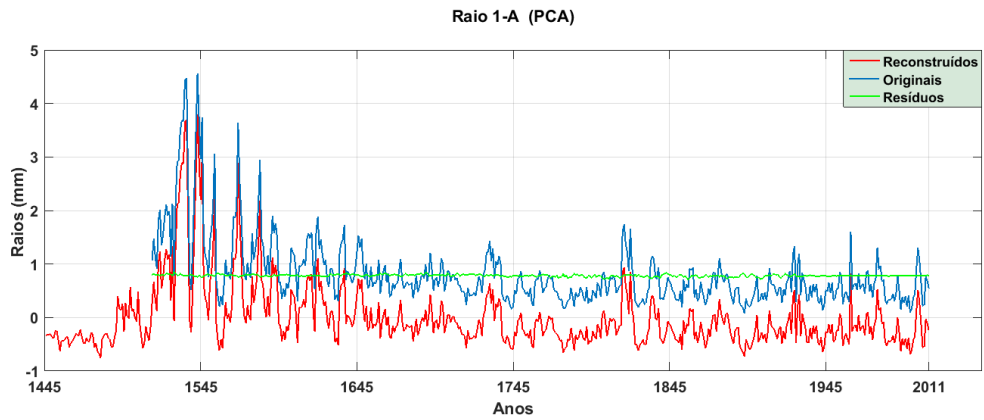
Outra questão importante para se observar nos gráficos das séries reconstruídas pela PCA, é que o método realiza uma reconstrução para os anos anteriores ao nascimento das menores amostras (as que são mais jovens). Essa reconstrução é baseada nos demais valores de raios das séries temporais, ou seja, baseado em todas as amostras.

Observa-se nos gráficos das amostras 1-A (Figura 22) e 11-B (Figura 23) que as tendências resultantes da aplicação da PCA e do método de ACP aplicado por Silva (2018) se assemelham, esta semelhança é demonstrada a partir do cálculo das correlações entre as amostras reconstruídas pela PCA e as amostras filtradas por Silva (2018) (ACP). Esse cálculo foi feito para anos em que ambas as séries apresentam valores, ou seja, desprezando os anos reconstruídos pela PCA, pois é necessário que ambas séries tenham o mesmo tamanho amostral para entender o quanto elas são realmente parecidas. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

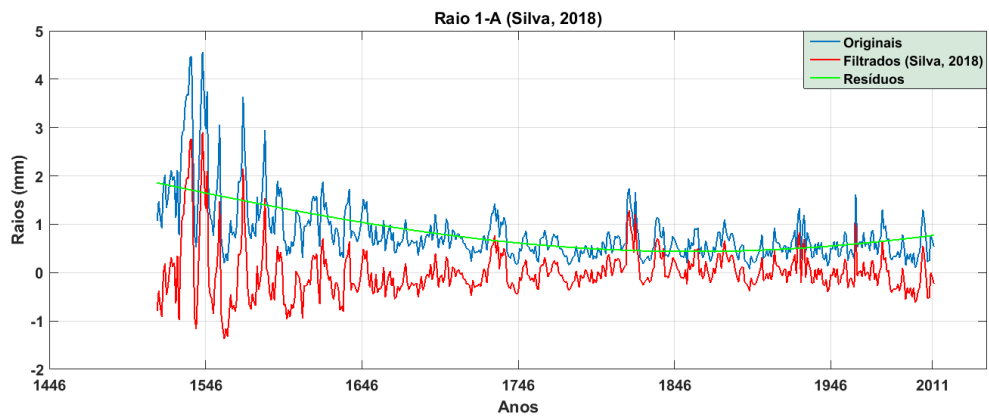
Os gráficos (c) das figuras apresentam o espectro de frequência das séries obtidos pelos dois métodos. Estes são praticamente iguais, contendo valores de erros quadráticos médios entre elas que também estão representados na Tabela 4. É desejado que o valor do erro quadrático médio seja o mais próximo possível de 0, que é quando obtêm-se maior exatidão dos resultados obtidos.

Figura 22 – Amostra A da árvore nº 1

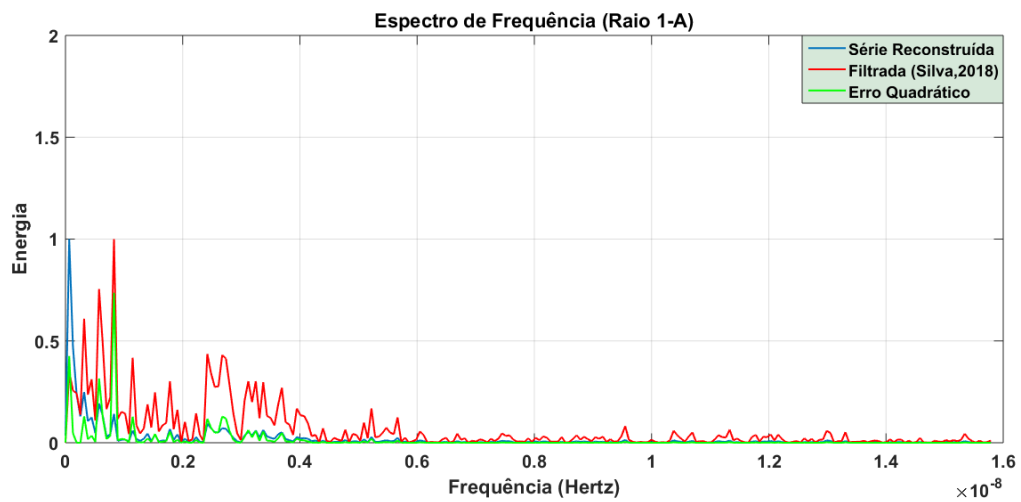
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



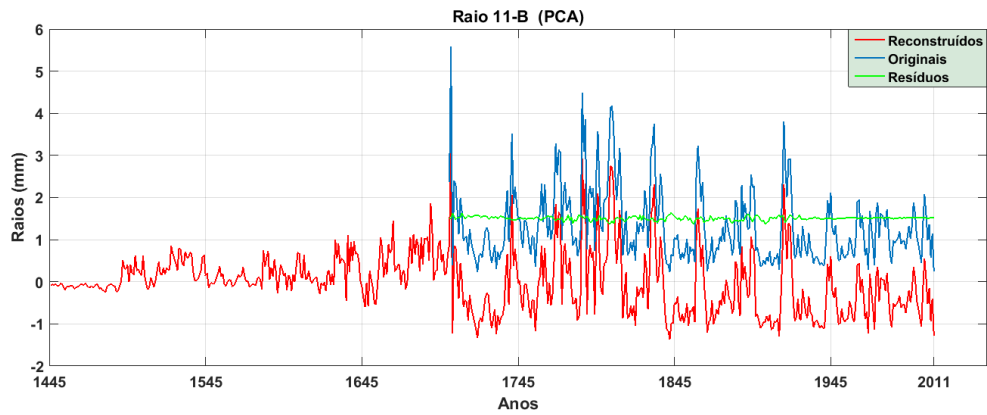
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



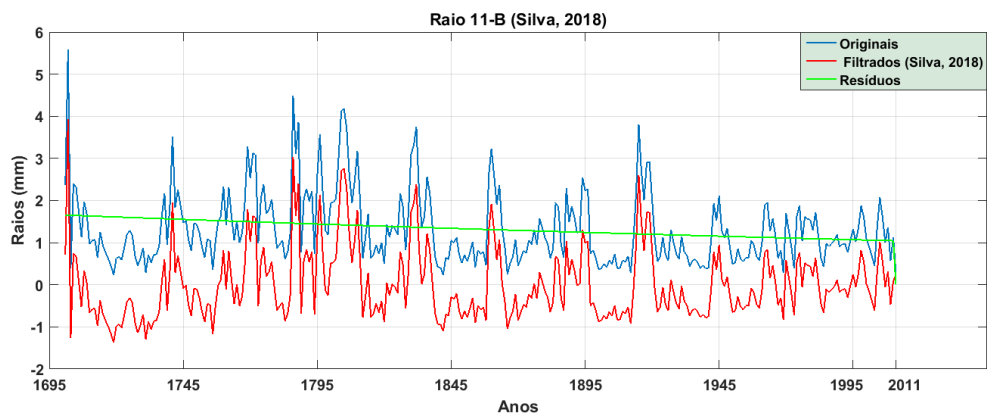
Fonte: A autora.

Figura 23 – Amostra B da árvore nº 11

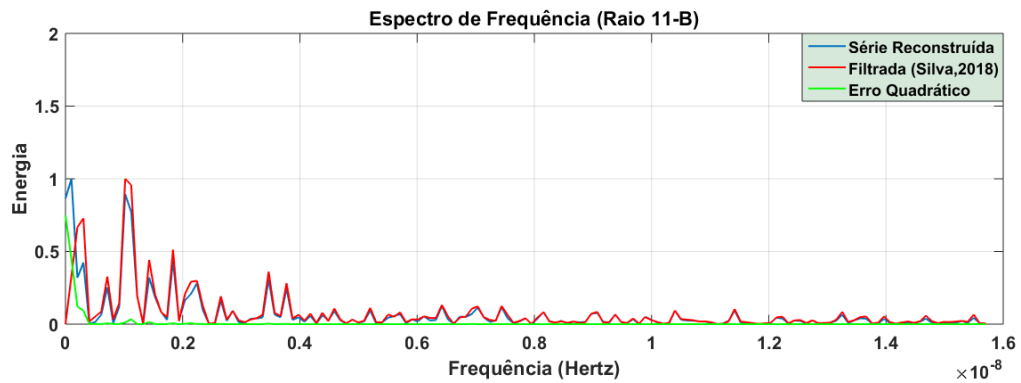
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.

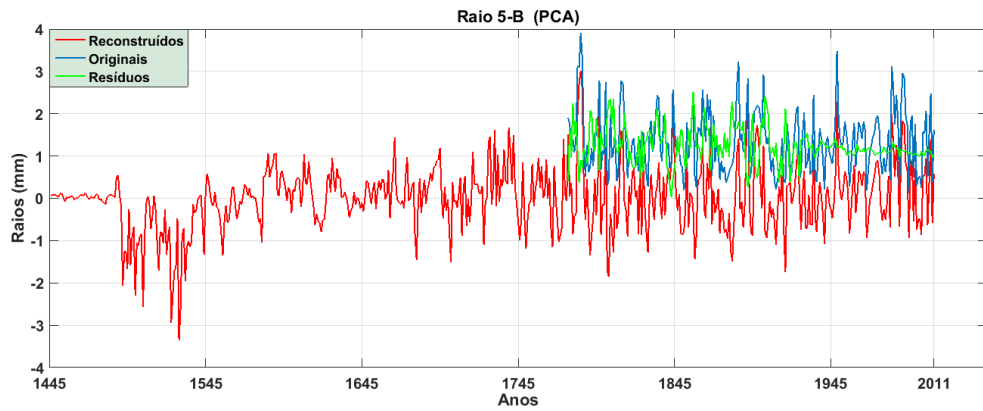


Fonte: A autora.

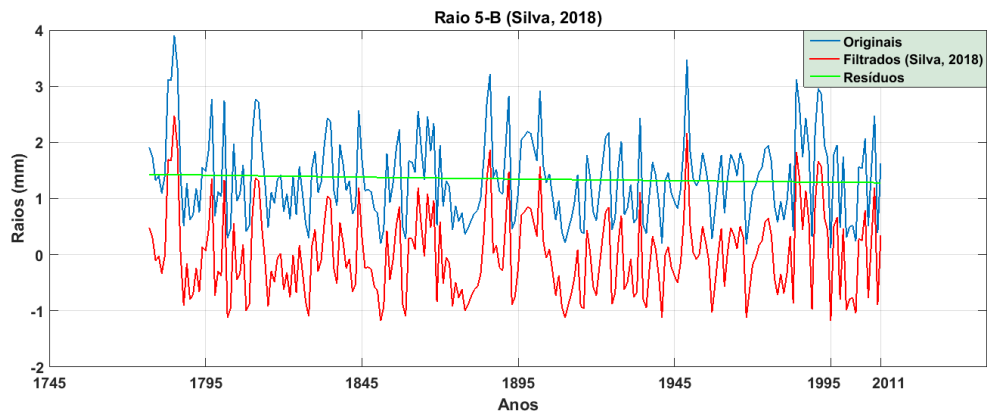
As amostras representadas nas Figuras 24 e 25 mostram um comportamento um pouco mais variável nos dados reconstruídos por PCA. Porém, os espectros de frequência mostram que ambos os métodos apresentam um conteúdo espectral bastante semelhante.

Figura 24 – Amostra B da árvore nº 5

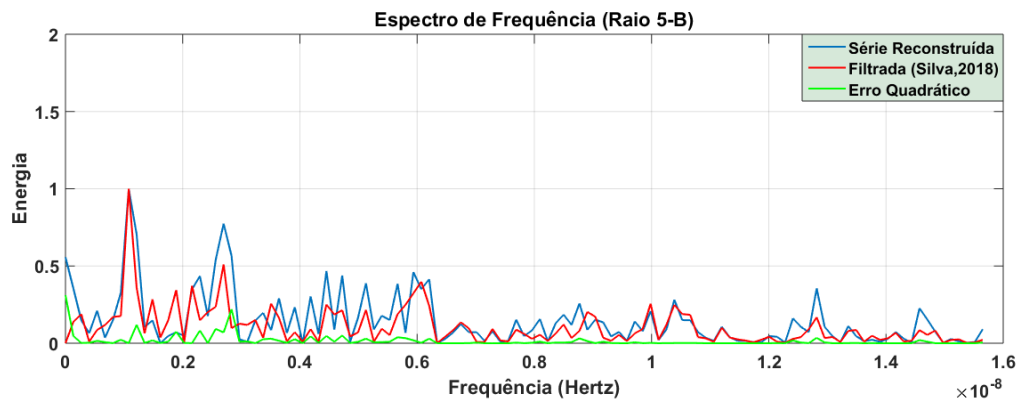
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



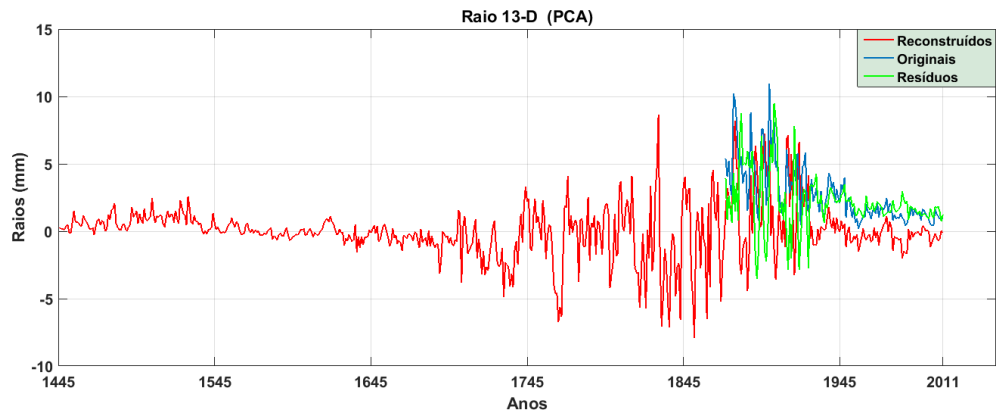
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



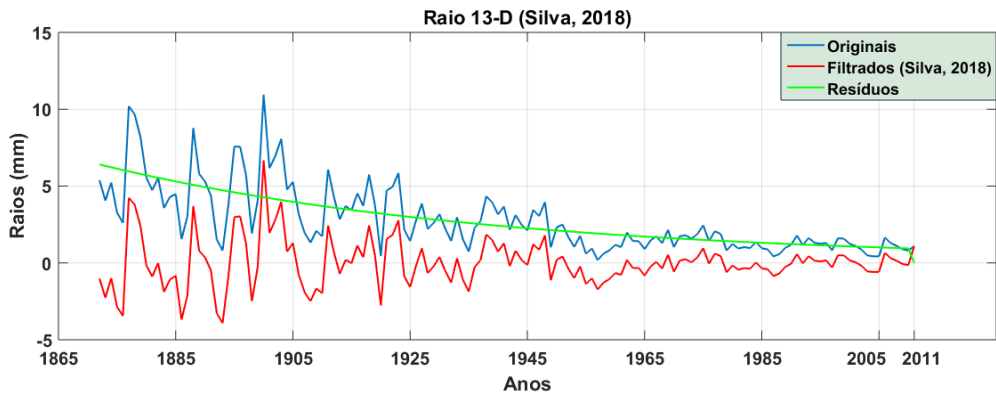
Fonte: A autora.

Figura 25 – Amostra D da árvore nº 13

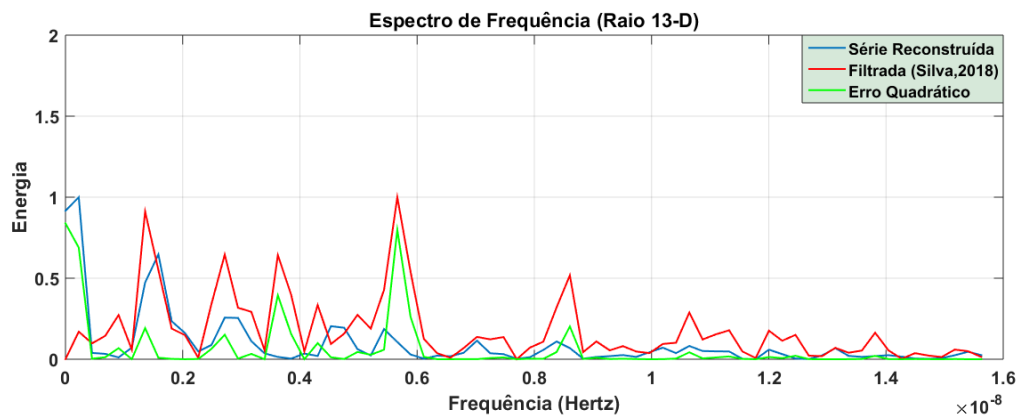
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



Fonte: A autora.

Tabela 4 – Correlações (C) das amostras reconstruídas pela PCA com a série filtrada por Silva (2018) e, Valores de Erro Quadrático Médio para os Espectros de Frequência.

<b>Amostras</b>	<b>Correlações</b>	<b>Erro Quadrático Médio</b>
1-A	78,95%	0,0135
1-B	64,74%	0,0092
1-C	95,22%	0,0036
4-A	17,25%	0,0274
4-B	5,63%	0,0488
5-B	87,26%	0,0138
5-C	99,62%	0,00004
7-C	99,27%	0,00035
10-A	80,56%	0,0213
10-B	87,96%	0,0123
10-C	87,81%	0,0203
10-D	80,44%	0,0192
11-A	77,72%	0,0200
11-B	97,44%	0,0073
12-A	88,43%	0,0126
12-B	83,42%	0,0146
12-C	98,21%	0,0027
12-D	91,35%	0,0029
12-E	88,89%	0,0617
13-A	89,83%	0,0336
13-D	36,19%	0,0566
15-A	75,76%	0,0624
16-A	83,03%	0,0120
16-B	80,00%	0,0043
16-C	96,72%	0,0036
16-D	99,49%	0,0011
17-A	75,10%	0,0149
17-B	94,10%	0,0069
17-C	96,82%	0,0199
18-A	96,70%	0,0416
18-B	90,21%	0,0074
18-C	75,05%	0,0242
18-D	83,98%	0,0073
19-C	98,16%	0,0005
19-D	79,34%	0,0118
20-A	87,83%	0,0134
21-A	92,40%	0,0087

Fonte: A autora.

Nota-se que 37,84% das amostras apresentam valores de correlação acima de 90%, e 35,13% das amostras apresentaram valores de correlação entre 80% e 90%, comprovando

a eficiência do método.

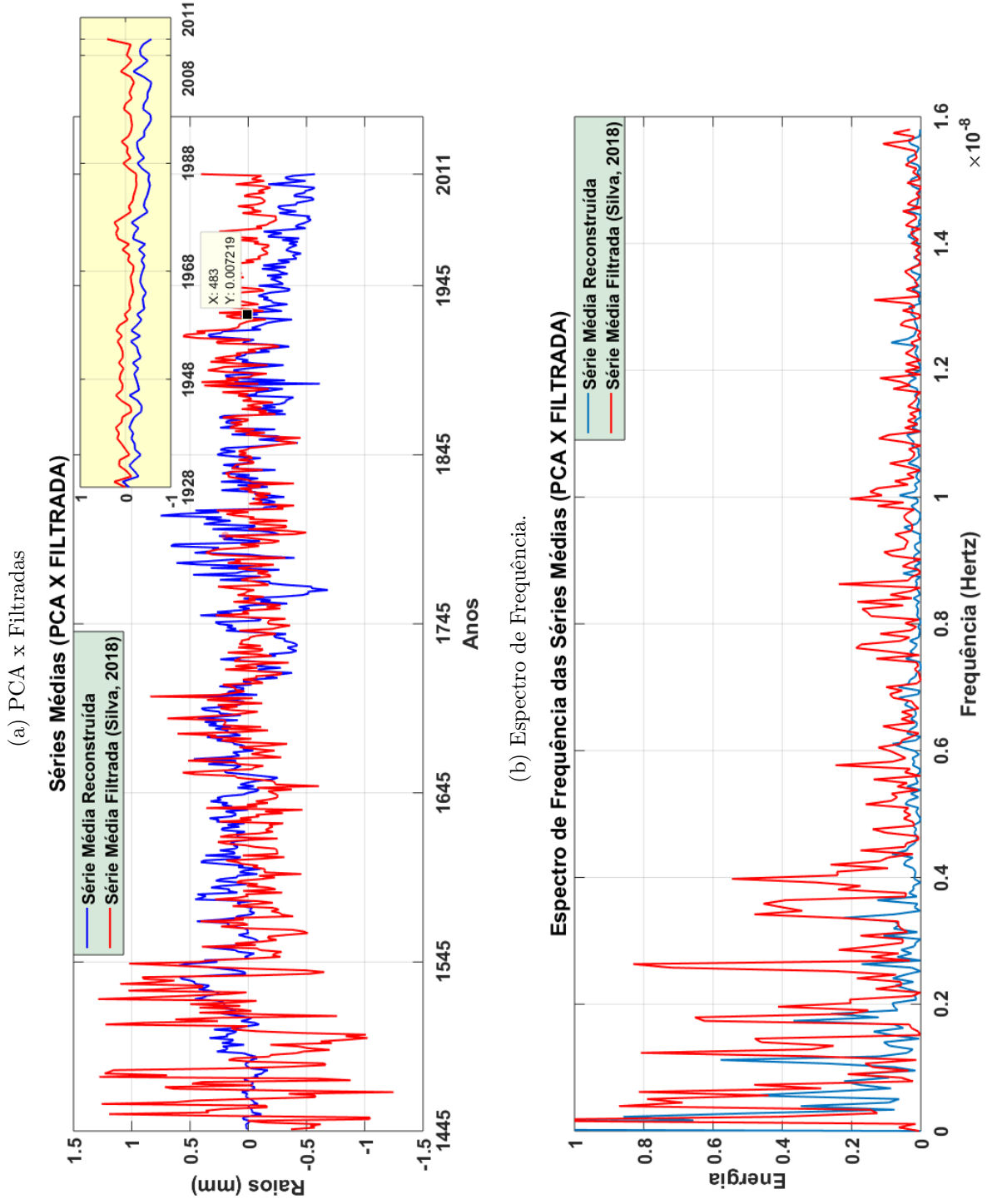
#### 4.1.1 OBTENÇÃO DA SÉRIE DENDROCRONOLÓGICA MÉDIA (SDM)

Obteve-se dois os gráficos das séries médias reconstruídas por PCA e por ACP (Figura 26) realizando a média com todas as 37 amostras deste estudo. A correlação entre ambas as séries é de **23,18%**. Esse número não é maior devido ao número amostral da série média filtrada pelo ACP ser muito menor em alguns períodos de anos comparada à série média reconstruída pela PCA. Isto se deve ao fato da PCA realizar uma reconstrução para cada amostra de árvore no período em que ela não existiria ainda, fazendo com que sua série média seja construída com 37 amostras em todos os pontos.

O gráfico (a) representa as séries médias calculadas por ambos os métodos, com uma janela destacando 1928 e 2011, período no qual ambos os métodos utilizaram 37 amostras para compor a série média, apresentando valor de correlação de 74,57%. Na janela de destaque é possível visualizar a semelhança dos resultados obtidos por ambos os métodos, no qual seguem um padrão espectral muito semelhante. A ACP é o método mais utilizado para analisar dados dendrocronológicos de amostras, esta comparação então mostra a eficiência da aplicação da PCA para estas análises.

No gráfico (b) é apresentado o espectro de frequência de ambas as séries médias calculadas pelos dois métodos. Observa-se que ambas as séries seguem um padrão espectral semelhante, mesmo que não idêntico em todos do espectro de frequências. O erro quadrático médio calculado entre as séries foi de **0,024**.

Figura 26 – Série Média



Fonte: A autora.

## 4.2 ESTUDO DENDROCLIMÁTICO

Para a realização do estudo dendroclimático, primeiro foi necessário escolher com qual cronologia trabalhar; com a Série Dendrocronológica Média (SDM), que é a série cronológica filtrada de fatores internos que influenciam o desenvolvimento da árvore (crescimento natural); ou com o autovetor que representa a 2ª PC, que em teoria descreveria o segundo fator que mais influencia no desenvolvimento da árvore, o fator climático. Foi necessário aplicar a correlação de *Pearson* entre a SDM e as séries climáticas de temperatura e de precipitação, e depois da mesma forma, para a série feita a partir da 2ª PC, desta forma foram obtidas as relações clima-crescimento para cada cronologia.

Realizou-se também, o cálculo do valor de significância. Este valor diz se o coeficiente de correlação é significativo de acordo com o número amostral e grau de liberdade da série estudada. O valor obtido deve ser comparado aos valores tabelados no Anexo H disponível para consulta no livro de Martins e Domingues (2001), utilizando o método de distribuição t de *Student*. No cálculo do teste de hipótese para existência de correlação (valor de significância), quando  $n > 30$ , utilizou-se a Fórmula 4.1.

$$t_{cal} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (4.1)$$

No caso da precipitação, têm-se um grau de liberdade de 109 ( $n - 2$ ) e nível de significância de 5,0%. Os valores obtidos do teste de significância que se apresentam maiores que **1,9818**, estão dentro da região crítica tabelada do teste t de *Student*, e foi considerado que, para estes, há correlação entre as variáveis analisadas.

De forma análoga para a temperatura, com diferente grau de liberdade que é de 61 ( $n - 2$ ), e os valores obtidos no teste de significância que foram maiores que **1,9996**, tem correlação significativa.

De acordo com os valores de correlação e valor de significância obtidos (Tabela 5), escolheu-se trabalhar com a Série Dendrocronológica Média (SDM).

Tabela 5 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação Anual (PA) e a Temperatura Anual (TA), e utilizando a 2 Componente Principal (2ªPC) com a Precipitação Anual (PA) e a Temperatura Anual (TA). Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação.

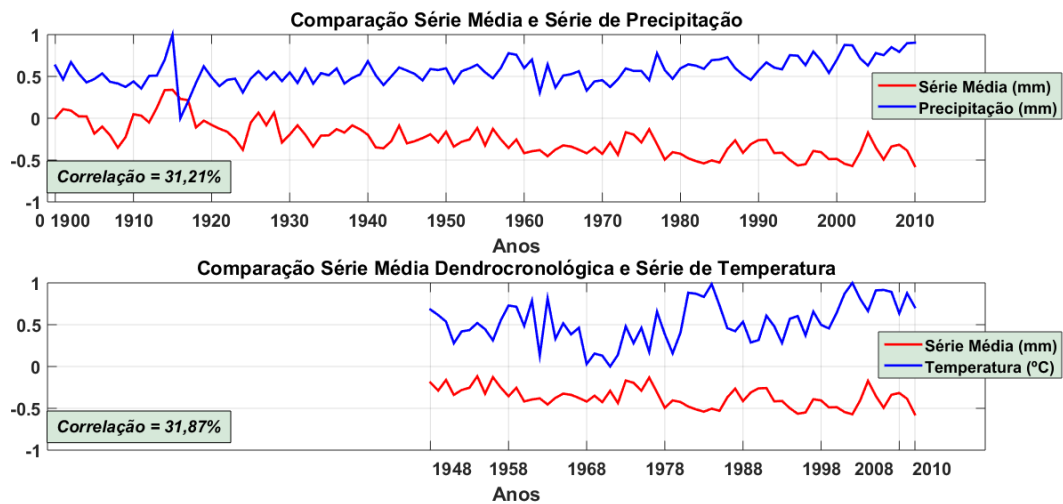
	C - 2ª PC	C - SDM	VS - 2ª PC	VS - SDM
TA	27,99%	31,87%	2,2771	2,6260
PA	32,51%	31,21%	3,5891	3,4456

Fonte: A autora.

Os valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação entre as séries comparadas anteriormente citados, isso indica que, há influência da temperatura e da precipitação no desenvolvimento destas árvores da região de estudo, permitindo então analisar mais detalhadamente (mensalmente e por estações do ano) esta influência.

Pode-se visualizar a comparação da SDM com as séries climáticas anuais na Figura 27, na qual a série de precipitação tem um total de 111 anos, e a série de temperatura tem um total de 63 anos.

Figura 27 – Comparação entre a Série Dendrocronológica e as Séries de Precipitação e Temperatura, e seus valores de correlação.



Fonte: A autora.

Dessa forma, partindo para uma análise mais detalhada, os cálculos das correlações e dos valores de significância foram repetidos também para séries mensais de precipitação e temperatura. Os resultados destes cálculos se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação Mensal (PM) e com a Temperatura Mensal (TM). Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação.

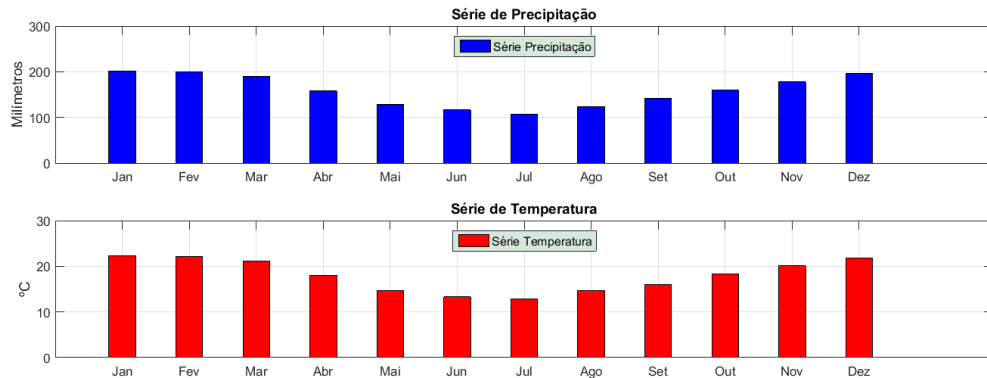
Meses	C-TM e SDM	C-PM e SDM	VS-TM e SDM	VS-PM e SDM
Janeiro	0,24%	24,58%	0,0187	2,6474
Fevereiro	15,31%	23,70%	1,2099	2,5469
Março	28,76%	29,74%	2,3453	3,2520
Abril	14,60%	8,68%	1,1526	0,9096
Maio	17,67%	15,65%	1,4022	1,6543
Junho	12,16%	15,28%	0,9568	1,6142
Julho	19,70%	15,68%	1,5693	1,6575
Agosto	25,84%	27,06%	2,0891	2,9346
Setembro	5,32%	5,55%	0,4161	0,5803
Outubro	27,64%	28,92%	2,2462	3,1541
Novembro	11,22%	18,49%	0,8819	1,9643
Dezembro	18,52%	28,28%	1,4719	3,0781

Fonte: A autora.

Assim como para a série anual, os valores em verde representam os meses de precipitação e de temperatura que estão dentro do valor limite para existência de correlação entre as séries comparadas. Nota-se que a precipitação tem 6 meses com valores significativos, enquanto a temperatura tem apenas 3 meses. Desta forma, considerou-se a precipitação como o fator externo climático que tem maior influência no desenvolvimento das árvores de Imbuia da região de estudo. Verifica-se que os meses pertencentes à estações de Primavera e Verão (Outubro-Março) tem ótimos valores de correlação e de significância.

A Figura 28 apresenta a climatologia da precipitação e da temperatura para a região de General Carneiro, obtidas dos dados de reanálise. Observa-se que as maiores correlações e significâncias correspondem aos meses com maiores níveis de precipitação.

Figura 28 – Climatologia da precipitação (azul) e climatologia da temperatura (vermelho) distribuídas mensalmente (Janeiro à Dezembro).



Fonte: A autora.

Por fim, realizou-se novamente os cálculos das correlações e dos valores de significância para séries por estações do ano, de precipitação e temperatura. Os resultados destes cálculos se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 – Correlações (C) e Valores de Significância (VS) obtidos utilizando a Série Dendrocronológica Média (SDM) com a Precipitação e com a Temperatura por estações do ano (PE e TE, respectivamente) no Hemisfério Sul. Valores de significância em verde estão dentro do valor limite para existência de correlação.

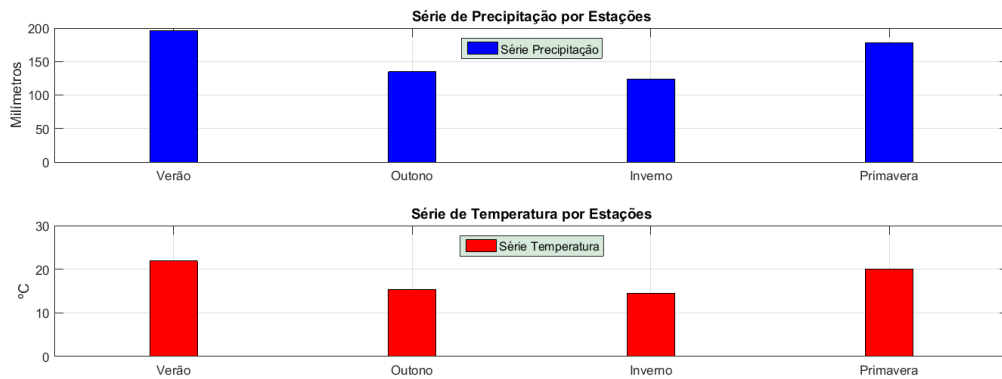
Estações	C-TE e SDM	C-PE e SDM	VS-TE e SDM	VS-PE e SDM
Verão	21,23%	35,69%	1,6968	3,9888
Outono	21,58%	18,91%	1,7261	2,0106
Inverno	23,55%	24,35%	1,8925	2,6211
Primavera	27,10%	32,77%	2,1989	3,6212

Fonte: A autora.

Da mesma forma, valores em verde representam as estações do ano, de precipitação e de temperatura, que estão dentro do valor limite para existência de correlação entre as séries comparadas anteriormente citados. Observa-se novamente que a precipitação foi a dominante quanto ao valor de significância, onde todas as estações estiveram dentro do valor limite, já a temperatura apenas apresentou valor aceitável de significância para a primavera.

A Figura 29 apresenta os valores médios da precipitação e da temperatura por estações do ano para a região de General Carneiro. Valores obtidos dos dados de reanálise.

Figura 29 – Climatologia da precipitação (azul) e climatologia da temperatura (vermelho) distribuídas em estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera).



Fonte: A autora.

Novamente, os maiores valores de correlação e significância ocorreram para os níveis de precipitação mais elevados, indicando que a precipitação tem maior influência no desenvolvimento das árvores estudadas.

Um estudo feito por Coile (1936), realizado na Flórida, mostra que o fator de temperatura não teve um efeito importante no crescimento do pinheiro de folha longa, *P. palustris*, enquanto em Missouri, Robbins (1921), verificou-se que as temperaturas médias de alguns meses variam inversamente com a largura do anel dos carvalhos. Em ambos os locais, no entanto, existiu uma correlação entre a precipitação e a largura anual do anel das árvores estudadas. Isto mostra que o fator de maior influência pode ser somente um dos fatores climáticos, mesmo que eles sejam relacionados. Pearson (1918) comparou a altura anual das árvores e a precipitação por vários períodos. Ele descobriu que a precipitação da primavera (abril e maio para o Hemisfério Norte) era aparentemente o fator de controle das árvores de seu estudo.

Analisando os nossos resultados, nota-se que as correlações entre a série dendrocronológica e a precipitação são significativas em todas as estações do ano, com maiores valores principalmente para níveis mais elevados de precipitação, e isso pode estar relacionado à ocorrência de fenômenos ENOS, que causa um maior volume de água precipitada e maior número de dias de precipitação na região Sul do Brasil, durante a primavera e o verão. Desta forma, o ENOS é um fenômeno geofísico diretamente ligado aos fenômenos climáticos e pode estar influenciando no desenvolvimento das árvores.

É importante ressaltar que o crescimento de uma árvore no ano T (ano corrente), é decorrente também do clima do mesmo ano, mas também do que a árvore sofreu no ano T-1 (ano anterior), pois este tem influência na fisiologia da árvore (SCHMELTER, 2000). Ou seja, o ano de crescimento de uma árvore começa em um ano T-1 e termina no ano T. Diller (1935) mostrou em seu estudo utilizando anéis de árvores, que em 1922 ocorreram

chuvas muito abaixo do normal, e apresentou uma deficiência de 10% no mês de junho de 1923. Isto pode ocorrer não só para a precipitação, mas também para temperatura, e outros fatores, como a umidade do solo, desta forma, é possível entender que o crescimento da árvore é afetado por eventos do ano T-1 e do ano T, sendo estes identificáveis na análise dendrocronológica.

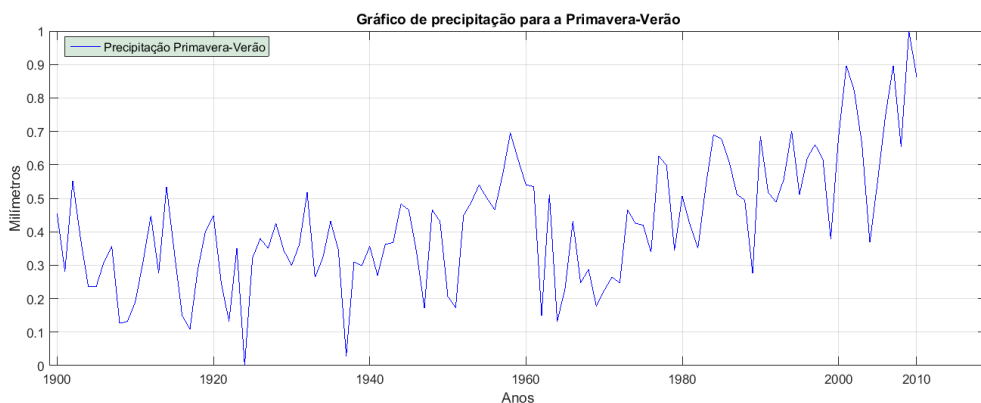
Para o presente estudo, considerando as estações do Hemisfério Sul, a precipitação para a primavera-verão foi tida como o melhor fator de controle do desenvolvimento das árvores de Imbuia de General Carneiro, apresentando 6 meses de maior atividade cambial e 6 meses de menor atividade cambial, de forma análoga ao que ocorreu com as espécies estudadas por Botosso, Vetter e Tomazello (2000). Eles também obtiveram que a temperatura da primavera apresentou boa correlação com a Série Dendrocronológica Média.

Segundo Stokes e Smiley (1996), Botosso e Mattos (2002), o período de crescimento das plantas (lenho inicial) é primavera-verão. Este foi o período mais chuvoso dos anos para a região de estudo, período em que obteve-se as maiores correlações da série dendrocronológica com a precipitação. O período de dormência das plantas acontece no Outono-Inverno (lenho tardio), o que condiz com os menores valores de correlação com a precipitação obtidos para estas estações.

#### 4.2.1 RECONSTRUÇÃO CLIMÁTICA

A partir dos resultados obtidos pelo estudo Dendroclimático, as estações primavera e verão foram tidas como os períodos de maior influência no crescimento das árvores da espécie Imbuia, desta forma criou-se uma série de precipitação para a primavera-verão onde utiliza-se os meses correspondentes à primavera e ao verão, (Figura 30, dados normalizados).

Figura 30 – Gráfico da precipitação para os meses de Primavera-Verão.

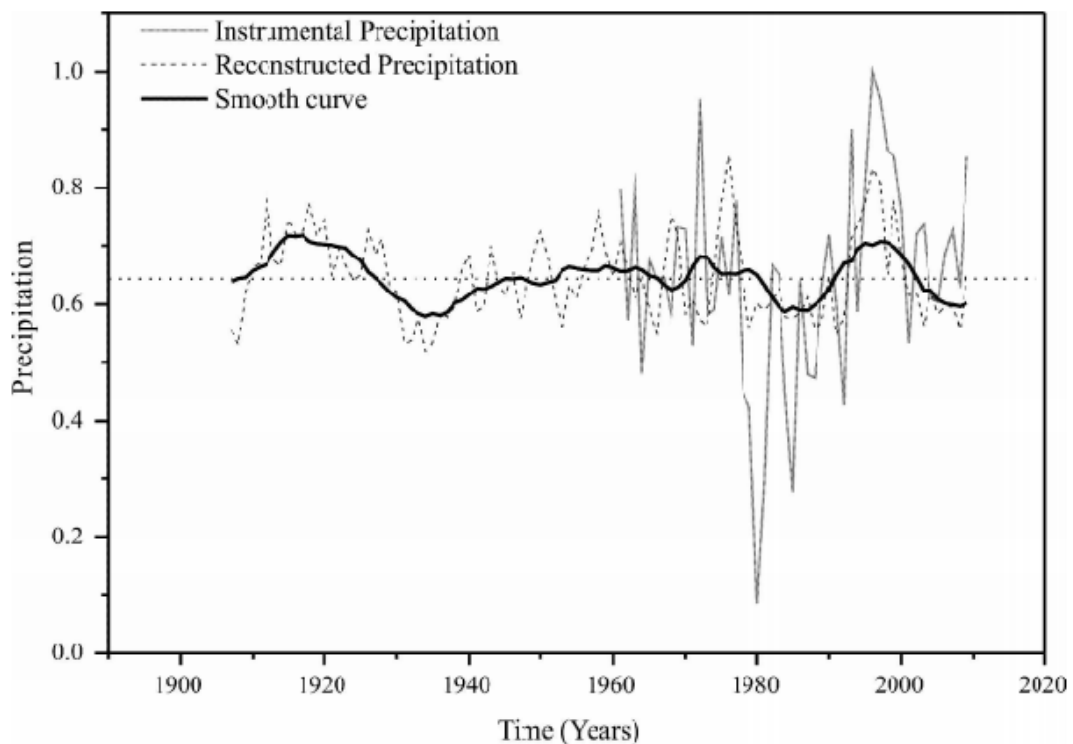


Fonte: A Autora.

Partindo disto, reconstruiu-se o perfil de precipitação para os meses de primavera-verão, utilizando dois métodos distintos.

O primeiro é o método de regressão linear, de forma semelhante ao estudo realizado por Lorensi e Prestes (2016). A reconstrução feita pelos autores é apresentado na Figura 31. Este método é o mais comum de reconstrução de padrões na dendrocronologia.

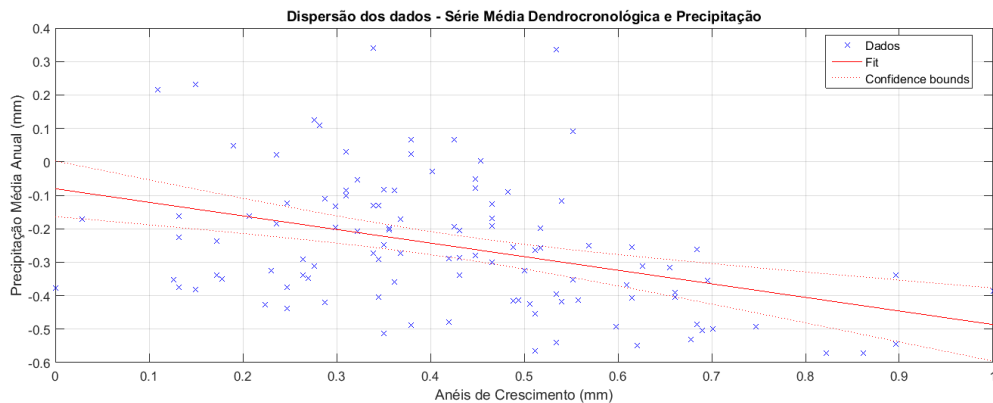
Figura 31 – Comparação da série original de precipitação (curva em cinza) e a série reconstruída (curva pontilhada em preto), média da precipitação para os meses de setembro a março de 1907-2009 (linha horizontal tracejada) e a média móvel para 10 anos (linha em preto).



Fonte: Lorensi e Prestes (2016).

A dispersão dos dados de entrada na Regressão Linear (SDM e Precipitação Anual) pode ser visualizada na Figura 32

Figura 32 – Dispersão dos dados para a precipitação Primavera-Verão. *Fit* é o melhor ajuste entre os dados e *confidence bounds* são os limites de confiança.



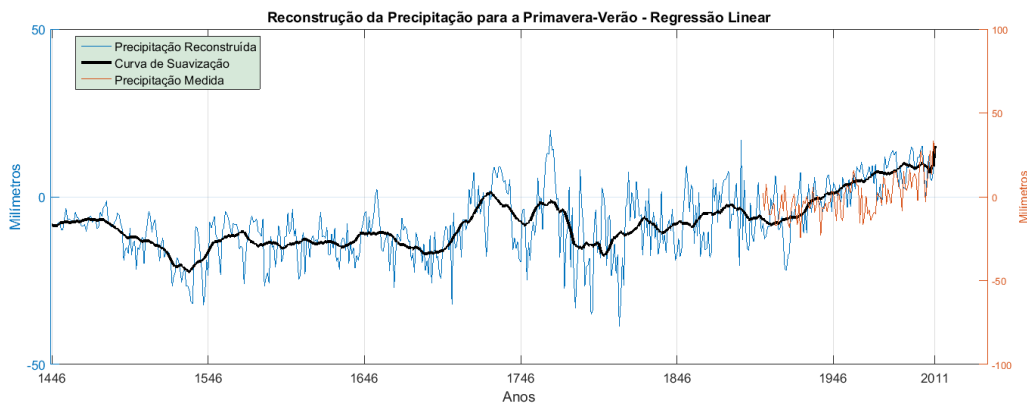
Fonte: A Autora.

Calculando-se os coeficientes lineares e angulares para a série de precipitação a partir da dispersão dos dados, obteve-se a Equação 4.2 para o cálculo da reconstrução, no qual,  $X_1$  representa a série de anéis de crescimento.

$$Y = (-0,080324) + (-0,40606)X_1 \quad (4.2)$$

O gráfico obtido por esta reconstrução é apresentado na Figura 33. Foi realizado o cálculo da correlação entre a precipitação e a reconstrução para os mesmos anos existentes de precipitação, o valor encontrado foi de **39,45%**. O valor de  $R^2$ , que diz o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, foi de **15,6%**.

Figura 33 – Reconstrução da precipitação utilizando a SDM pelo método de regressão linear. Linha em preto representa a reconstrução e a linha em vermelho é a suavização da curva.



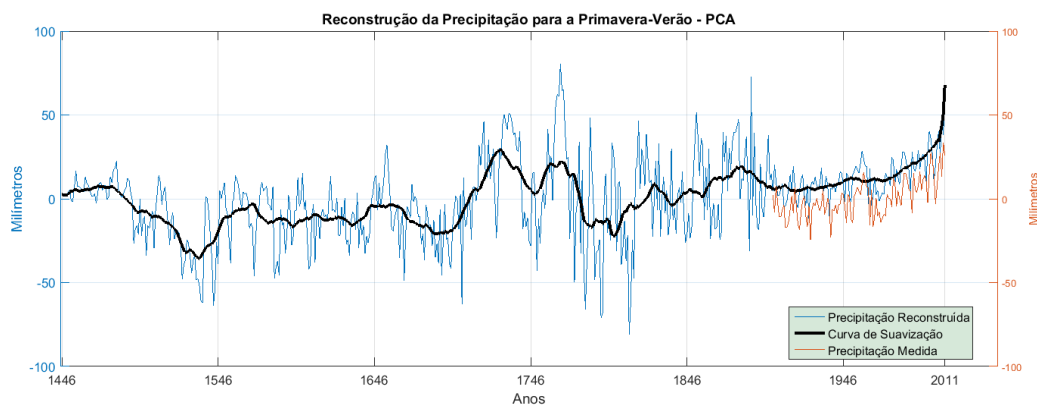
Fonte: A Autora.

Avaliando a linha de suavização desta primeira reconstrução obtida, é possível observar alguns períodos onde a precipitação teve decréscimo e acréscimo em relação ao seu nível médio. O primeiro pico de decréscimo pode ser visto um pouco após o ano de 1.500, normalizando por volta de 1546. Outros dois decréscimos podem ser vistos por volta de 1670-1696 e 1770-1820. Houveram dois picos de acréscimo de precipitação, praticamente seguidos, o primeiro por volta de 1696-1746 e antes de chegar ao nível considerado médio de precipitação, houve o segundo pico no período de 1750-1770. Observa-se que a partir do ano de 1820 o nível médio de precipitação apresenta uma tendência de crescimento, e isso ocorre até o ano de 2011.

O outro método utilizado para reconstruir o perfil de precipitação para General Carneiro foi a Análise de Componentes Principais (Figura 34). Aplicou-se a PCA para os dados da SDM junto da precipitação anual, reconstruiu-se a série de precipitação com apenas a 1ªPC, que explicava **99%** do conjunto de dados original.

Desta forma, realizou-se o cálculo para a correlação entre os períodos existentes da série de precipitação primavera-verão e para a série reconstruída da precipitação, o resultado obtido foi de **61,97%**.

Figura 34 – Reconstrução da precipitação utilizando a SDM pelo método de PCA. Linha em preto representa a reconstrução e a linha em vermelho é a suavização da curva.



Fonte: A Autora.

Analisando a linha de suavização da reconstrução obtida pela PCA, é possível observar que os mesmos períodos de acréscimo e decréscimo de precipitação encontrados pelo método de Regressão Linear, também aparecem aqui. Os três períodos de diminuição da precipitação média também ocorrem por volta de 1.500-1546, 1670-1696 e 1770-1820. E da mesma forma, dois picos de aumento da precipitação média nos períodos de 1696-1746 e 1750-1770. Mostra-se a mesma tendência de aumento da média de precipitação para a região a partir de 1820.

A correlação entre os resultados obtidos por ambos os métodos foi de **91,02%**, no entanto, entendeu-se que a PCA é a melhor forma de reconstruir estes padrões, devido ao seu alto valor de correlação com a série de precipitação medida.

## 5 CONCLUSÕES

Realizou-se uma análise estatística conhecida como Análise de Componentes Principais (PCA) para criar um modelo de tendência de crescimento natural das 37 amostras de árvores da espécie Imbuia coletadas na região de General Carneiro. Esta aplicação da PCA em estudos dendrocronológicos para este fim é inovadora. Os dados de entrada foram analisados previamente por Silva (2018) por meio do método estatístico de Ajuste de Curva Polinomial (ACP), que faz um ajuste de curva para cada amostra de árvore, calculando o erro e procurando a melhor curva que se ajuste a cada amostra.

A PCA cumpriu o objetivo de fazer um único ajuste aplicável a todas as amostras coletadas (modelo de tendência de crescimento), facilitando assim o trabalho matemático e a análise destes dados, além de ser empregado utilizando linguagem de programação, tornando-o semi-automático, o que acelerou a etapa de processamento dos dados.

Verificou-se que os dados processados pela PCA se assemelham aos resultados obtidos pela ACP, sendo reforçado pelos altos valores de correlação obtidos. A maioria das amostras teve uma boa relação com o espectro de frequência comparando com os dados filtrados por Silva (2018), no qual os valores de erro quadrático médio foram muito pequenos para todas as amostras.

Quanto a retirada de tendência de crescimentos, obteve-se melhores resultados de correlação entre os métodos para as maiores amostras, ou seja, as amostras de árvores mais velhas, isto também pode ter ocasionado alguma interferência (ruídos ou picos) na análise das árvores mais novas (menor série). Nas árvores menores foram realizadas reconstruções para os anos que a árvore não existia, desta forma, todas as amostras obtiveram valores do ano 1446 até o ano 2011.

A análise dendroclimática permitiu concluir que a primavera-verão são as estações mais propícias para crescimento e desenvolvimento das árvores de Imbuia, da região de General Carneiro, pois apresentam ótima correlação com a precipitação e a temperatura de primavera.

As amostras de Imbuia de General Carneiro são estreitamente relacionadas à precipitação, de acordo com os valores de correlação e valores de significância obtidos para todas as estações.

A PCA foi aplicada como método de reconstrução da precipitação, bem como o método de regressão linear. O cálculo de correlação entre as reconstruções obtidas com a série de precipitação da primavera-verão, durante os anos em que ambas as séries coexistem, deram os valores de 61,97% e 39,45%, respectivamente.

Com os resultados apresentados pela PCA para a obtenção da Série Dendrocronológicas Média e na reconstrução da precipitação, mostra que este método estatístico pode ser utilizado em todos os passos de análise de um estudo dendrocronológico/dendroclimático.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. C. B. *Implantação da Metodologia de Densitometria de Raios-X em Madeira*. 1994. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1994.
- ANDERSON, T. W. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- ANTON, H.; RORRES, C. *Álgebra Linear com Aplicações*. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- AYOADE, J. O. *Introdução à Climatologia para os Trópicos*. [S.l.]: Ed. Bertrand Brasil, 1998.
- BOTOSSO, P. C.; MATTOS, P. P. *Conhecer a idade das árvores: importância e aplicação*. Colombo: Embrapa Florestas, 2002.
- BOTOSSO, P. C.; VETTER, R. E.; TOMAZELLO, M. Periodicidade e taxa de crescimento de árvores de cedro (*Cedrela odorata L., Meliaceae*), jacareuba (*Calophyllum angulare A. C. Smith, Clusiaceae*) e muirapiranga (*Eperua bijuga Mart. ex Benth, Leg. Caesalpinoideae*) de floresta de terra firme, em manaus-am. In: *Dendrocronologia en America Latina*. [S.l.: s.n.], 2000.
- BRASIL, F. *Anéis de crescimento das árvores denunciam aumento do aquecimento global*. 2019. Disponível em: <<http://www.florestalbrasil.com/2019/07/aneis-de-crescimento-das-arvores.html>>.
- CARNEIRO, P. de G. *Dados Gerais*. 2020.
- COILE, T. S. The effect of rainfall and temperature on the annual radial growth of pine in the southern united states. *Ecological Monographs*, Ecological Society of America, v. 6, n. 4, p. 533–562, 1936.
- COUNCIL, N. R. *Solar Influences on Global Change*. Washington, DC: The National Academies Press, 1994.
- COUTINHO, T. *Diagrama de Dispersão: o que é, quando usar e como montar*. 2019. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/diagrama-de-dispersao>>. Acesso em: 27 de dezembro de 2019.
- DERGACHEV, V. A.; RASPOPOV, O. M. The long-term solar cyclicity (210 and 90 years) and variations of the global terrestrial air temperatures since 1868. In: *SOLAR & SPACE WEATHER EUROCONFERENCE, THE SOLAR CYCLE AND TERRESTRIAL CLIMATE, 1., 2000. Proceedings...* Santa Cruz de Tenerife: [s.n.], 2000.
- DILLER, O. D. The relation of temperature and precipitation to the growth of beech in northern indiana. *Ecology*, v. 16, n. 1, 1935.
- ECHER, E. et al. O Número de Manchas Solares, Índice da Atividade do Sol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 25, p. 157 – 163, 06 2003. ISSN 1806-1117. Acesso em 23 de novembro de 2019. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172003000200004&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172003000200004&nrm=iso)>.

- ENRIGHT, N. J. Principal components analysis of tree-ring/climate relationships in white spruce (*Picea Glauca*) from schefferville, canada. *Journal of Biogeography*, Wiley, v. 11, n. 4, p. 353–361, 1984.
- FEKEDULEGN, D. et al. Coping with multicollinearity: an example on application of principal components regression in dendroecology. *USDA Forest Service Northeast. Res. Station. Res. Pap.*, 2002.
- FLOWER, A.; SMITH, D. A dendroclimatic reconstruction of june-july mean temperature in the northern canadian rocky mountains. *Dendrochronologia*, v. 29, p. 55–63, 12 2011.
- FRITTS, H. C. *Tree Rings and Climate*. [S.l.]: The University of Arizona Press, 1976.
- FRITTS, H. C. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. [S.l.]: The University of Arizona Press, 1991.
- FYE, F. K.; CLEAVELAND, M. K. Paleoclimatic analyses of tree-ring reconstructed summer drought in the united states, 1700-1978. *Thee-Ring Research*, v. 57, p. 31–34, 2001.
- G1. *Imagens inéditas obtidas por telescópio alemão mostram superfície do Sol*. 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1376224-5603,00-IMAGENS+INEDITAS+OBTIDAS+POR+TELESCOPIO+ALEMAO+MOSTRAM+SUPERFICIE+DO+SOL.html>>. Acessi em 10 de outubro de 2019.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. Solar eruptions and energetic particles: An introduction. In: *Processamento de Imagens Digitais*. [S.l.]: Addison Wesley Pub. Co., 1993.
- GOPALSWAMY, N.; MEWALDT, R.; TORSTI, J. Solar eruptions and energetic particles: An introduction. In: : *NATCHIMUTHUKONAR GOPALSWAMY, Richard. Solar eruptions and energetic particles*. Washington DC: American Geophysical Union, 2006.
- GOUVEIA, R. *Características do Sol*. 2019. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/caracteristicas-do-sol/>>. Acesso em 13 de maio de 2019.
- HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de componentes principais: Resumo teórico, aplicação e interpretação. v. 5, p. 83–90, 2016.
- HOYT, D. V.; SCHATTEN, K. H. *The Role of the Sun in Climate Change*. [S.l.]: Oxford University Press, 1997.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. [S.l.]: Pearson Education, Inc., 2007.
- LANZEROTTI, L. J. Space weather effects on technologies. In: *Space Weather*. [S.l.]: American Geophysical Union, 2001.
- LISI, C. S. *Atividade de  $^{14}C$  do Fallout e Razão Isotópica  $^{13}C/^{12}$  em Anéis de Crescimento de Clima Tropical e Subtropical do Brasil. 2000*. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2000.
- LORENSI, C.; PRESTES, A. Dendroclimatological Reconstruction of Spring-Summer Precipitation for Fazenda Rio Grande, PR, with samples of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Revista Árvore*, scielo, v. 40, p. 347 – 354, 2016.

- LUCKMAN, B. H. Using multiple high-resolution proxy climate records to reconstruct natural climate variability: An example from the canadian rockies. In: *Mountain environments in changing climates*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 42–59.
- MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. *Estatística Geral e Aplicada*. 4. ed. [S.l.]: Atlas S.A., 2001.
- MCFADDEN, L. A.; WEISSMAN, P.; JOHNSON, T. *Encyclopedia of the Solar System*. 2nd. ed. [S.l.]: Academic Press, 2007. ISBN 9780120885893,0120885891.
- MELDRUM, C. On a periodicity in the frequency of cyclones in the indian ocean south of the equator. In: *REPORT OF THE BRITISH ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE, 42nd., Brighton, 1872. Proceedings...*, Brighton: [s.n.], 1872.
- MELDRUM, C. On a supposed periodicity of the cyclones of the indian ocean south of the equator. *Nature*, v. 32, p. 613–614, 1885.
- MUNDO, I. et al. Araucaria araucana tree-ring chronologies in argentina: Spatial growth variations and climate influences. *Trees*, v. 26, p. 443–458, 2012.
- NASA. *Sunspots at Solar Maximum and Minimum*. 2009. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/37575/sunspots-at-solar-maximum-and-minimum>>. Acesso em 30 de abril de 2019.
- NERY, J. T. Dinâmica climática da região sul do brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, 2005.
- NORDEMANN, D. et al. Principal components and iterative regression analysis of geophysical series: Application to sunspot number (1750–2004). *Computers & Geosciences - COMPUT GEOSCI*, v. 34, p. 1443–1453, 2008.
- NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R. Árvores contam uma história do sol. *Scientific American*, v. 2, n. 14, p. 30–37, 2003.
- NORDEMANN, D. J. R. et al. Solar activity and el niño effects on southern brazil araucaria ring widths (1955–1997). In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON DENDROCHRONOLOGY, 6., 2002. Quebec City. Proceedings...* Québec: [s.n.], 2002. (Poster).
- PARKER, E. N. Space weather and the changing sun. In: *Space Weather*. [S.l.]: American Geophysical Union, 2001.
- PEARSON, G. A. The Relation between Spring Precipitation and Height Growth of Western Yellow-Pine Saplings in Arizona. *Journal of Forestry*, v. 16, n. 6, p. 677–689, 1918.
- PHILIPPEAU, G. *Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales*. [S.l.]: ITCF., 1986.
- PRESTES, A. *Relação Sol-Terra Estudada Através de Anéis de Crescimento de Coníferas do Holoceno Recente e Triássico*. 2009. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

- QUADRO, M. Estudo de episódios de zonas de convergência do atlântico sul (zcas) sobre a américa do sul. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 17, 1999.
- RASMUSSEN, E. M.; WALLACE, J. M. Meteorological aspects of the el niño/southern oscillation. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 222, n. 4629, p. 1195–1202, 1983.
- RASPOPOV, O. M. et al. Dendrochronological evidence of long-term variations in solar activity and climate. In: *International Conference Tree Rings and People*. Davos: [s.n.], 2001.
- REGAZZI, A. J. *Análise Multivariada, notas de aula INF 766*. [S.l.]: Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- 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.
- ROBBINS, W. J. Precipitation and growth of oaks at columbia, missouri. *Res. Bull*, v. 44, p. 1–22, 1921.
- SAMPAIO, G. *El niño e você – o fenômeno climático*. Editora Transtec, São José dos Campos, 2000.
- SCHMELTER, A. *Climatic response and growth-trends of Nothofagus pumilio along altitudinal gradients from arid to humid sites in northern Patagonia - A progress report*. Berlin: [s.n.], 2000.
- SCHWEINGRUBER, F. H. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. [S.l.]: D. Reidel Publishing Company, 1988.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- SEITZ, R. A.; KANNINEN, M. Tree ring analysis of araucaria angustifolia in southern brazil. In: *IAWA Bulletin*. [S.l.: s.n.], 1989. v. 10, p. 170–174. Preliminary results.
- SHEPPARD, P. R.; GRAUMLICH, L. J. A reflected-light video imaging system for tree-ring analysis of conifers. In: *Proceedings of the 1994 International Conference on Tree Rings, Environment and Humanity*. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson: [s.n.], 1996. p. 879–889.
- SILVA, I. R. *Relações Entre o Crescimento da (Ocotea porosa (Nees & Mart) Barroso) e as Forçantes Climatológicas do Sudeste do Paraná. 2018*. Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2018.
- SOBRINHO, J. L. G. *O Sol e o seu interior*. Madeira: [s.n.], 2013.
- SONETT, C. P.; FINNEY, S. A. The Spectrum of Radiocarbon. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, v. 330, p. 413–425, 1990.
- SPEER, J. H. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. [S.l.]: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1971.
- STOKES, M. A.; SMILEY, T. L. *An introduction to tree-ring dating*. Tucson: University of Arizona Press, 1996.

STUIVER, M.; QUAY, P. D. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science*, v. 207, n. 4426, p. 11–19, 1980.

SUPDMAN. *El Niño present in Pacific, could mean drier 2019 for Pacific Northwest*. 2018. Disponível em: <<https://spudman.com/news/el-nino-dry-pacific-northwest/>>. Acesso em 17 de março de 2019.

TOBIAS, S. M. The solar dynamo. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, v. 360, 2003.

TRENBERTH, K. E. The definition of el niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 12, 1997.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. Magnetic storms. In: *From the sun: Auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays*. [S.l.]: American Geophysical Union, 1998.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do paranÁ. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 3, n. 0, 2008.

WESLEY, A. *Ciclo Solar 24 surpreende: É o mais fraco em 100 anos...* 2017. Disponível em: <<https://thoth3126.com.br/ciclo-solar-24-surpreende-e-o-mais-fraco-em-100-anos/>>. Acesso em 11 de março de 2019.

## **Apêndices**

## APÊNDICE A – APLICAÇÃO MATEMÁTICA DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Neste apêndice será tratada a aplicação matemática da Análise de Componentes Principais (PCA) com um exemplo número simples.

As componentes principais são obtidas com a diagonalização de matrizes simétricas positivas semi-definidas. Existem diversos programas com capacidade para cálculos matriciais como esta diagonalização (HONGYU; SANDANIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2016).

O exemplo numérico fornecido por Gonzalez e Woods (1993) e apresentado a seguir ilustra a obtenção das componentes principais (PCs).

A covariância (ou variância) representa o grau com que cada variável é linearmente correlacionada com a outra, a fórmula para cálculo de dados de 2 dimensões é:

$$cov(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n [(\bar{x}_i - \bar{x}) \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})]}{n} \quad (\text{A.1})$$

sendo  $x$  e  $y$  listas de dados, com  $x$  sendo a primeira dimensão e  $y$  sendo a segunda dimensão;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias das listas;  $\bar{x}_i$  e  $\bar{y}_i$  são cada um dos elementos das listas, na  $i$ -ésima posição;  $n$  é o número de itens dos dados. Quando os dados iniciam no índice 0 (representando uma amostra), no denominador e no somatório usa-se  $n-1$ , caso seja o conjunto total, usa-se o próprio  $n$ .

Para dados com mais de duas dimensões, faz-se a covariância (Equação A.1) entre cada par de dimensões. Caso seja uma matriz de três dimensões ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), temos a seguinte matriz de covariância:

$$matrizcov = \begin{pmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Para dados dendrocronológicos, cada dimensão da matriz é dada por uma amostra de árvore diferente. Da diagonal principal desta matriz obtêm-se as variâncias, e nas outras posições têm-se as correlações entre as direções. Como esta matriz é simétrica e real, sempre pode-se encontrar um conjunto de autovetores ortonormais (ANTON; RORRES, 2004), que são os eixos principais da matriz. Considerando  $M$  amostras de vetores, pode-se

calcular o vetor médio por:

$$mx = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (\text{A.3})$$

Para exemplificar, usaremos um conjunto de vetores 3D com 4 amostras para cada passo destes cálculos. Supondo os seguintes valores para cada uma das 4 amostras:

$$x_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$x_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$x_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Teremos o seguinte vetor médio:

$$mx = \begin{bmatrix} 3/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Faz-se a subtração de cada  $x_i$  de do vetor médio ( $mx$ ) para o cálculo da matriz de covariância:

$$x_1 - mx = \begin{bmatrix} -3/4 \\ -1/4 \\ -1/4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$x2 - mx = \begin{bmatrix} 1/4 \\ -1/4 \\ -1/4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$x3 - mx = \begin{bmatrix} 1/4 \\ 3/4 \\ -1/4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$x4 - mx = \begin{bmatrix} 1/4 \\ -1/4 \\ 3/4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Usam-se essas subtrações para calcular o produto de cada subtração por ela mesma, a partir da matriz transposta:

$$(x1 - mx)(x1 - mx)^T = \begin{bmatrix} 9/16 & 3/16 & 3/16 \\ 3/16 & 1/16 & 1/16 \\ 3/16 & 1/16 & 1/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$(x2 - mx)(x2 - mx)^T = \begin{bmatrix} 1/16 & -1/16 & -1/16 \\ -1/16 & 1/16 & 1/16 \\ -1/16 & 1/16 & 1/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$(x3 - mx)(x3 - mx)^T = \begin{bmatrix} 1/16 & 3/16 & -1/16 \\ 3/16 & 9/16 & -3/16 \\ -1/16 & -3/16 & 1/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$(x4 - mx)(x4 - mx)^T = \begin{bmatrix} 1/16 & -1/16 & 3/16 \\ -1/16 & 1/16 & -3/16 \\ 3/16 & -3/16 & 9/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Faz-se a média desta soma, sendo este resultado a matriz de covariância, como é mostrado a seguir:

$$(Cx) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 12/16 & 4/16 & 4/16 \\ 4/16 & 12/16 & -4/16 \\ 4/16 & -4/16 & 12/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

ou

$$(Cx) = \begin{bmatrix} 3/16 & 1/16 & 1/16 \\ 1/16 & 3/16 & -1/16 \\ 1/16 & -1/16 & 3/16 \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

Temos que um vetor  $v$  é um autovetor de uma matriz quadrada  $M$  quando temos a multiplicação de  $M$  e  $v$ , resultando em um múltiplo de  $v$ , isto é, na multiplicação de um escalar  $\lambda$  por  $v$ .  $\lambda$  é então chamado de autovalor da matriz  $M$  associado ao autovetor  $v$ .

A propriedade desejada dos autovetores é apenas a direção. Então quando se diz autovetores, pode-se entender como “autovetores de comprimento 1”, ou seja, não nulos. Eles são ortogonais entre si, então se pode apresentar os dados utilizando-os no lugar dos eixos  $x, y, z$ .

Utilizou-se a equação característica de  $M$  para calcular os autovalores de matrizes  $2 \times 2$  ou  $3 \times 3$ :

$$\det(M - \lambda \cdot I) = 0 \quad (\text{A.19})$$

sendo  $I$  a matriz identidade,  $M$  a matriz cedida e os escalares não nulos,  $\lambda$  serão os autovalores, podemos visualizar no exemplo a seguir:

$$\det = \begin{pmatrix} m_{11} - \lambda & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} - \lambda \end{pmatrix} = 0 \quad (\text{A.20})$$

Têm-se como resultado uma equação do 2º grau, assim, pode-se calcular e substituir as raízes no sistema a seguir, assim encontra-se os autovetores que correspondem a cada autovalor:

$$\begin{pmatrix} m_{11} - \lambda & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} - \lambda \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.21})$$

Para dimensões maiores é aplicado um algoritmo numérico iterativo. Como último passo, tem que se ordenar de forma decrescente os autovalores e autovetores associados, ou seja, do maior autovalor para o menor autovalor.

Deve-se rearranjar os autovetores de forma decrescente, de acordo com os valores dos autovalores associados, então teremos na primeira posição o autovetor com o maior autovalor, na segunda posição o autovetor com o segundo maior autovalor, e por assim em

diante. Considerando “ $\epsilon$ ” como os autovetores e “ $\lambda$ ” como os autovalores, teremos  $\epsilon_{n-1}$  e  $\lambda_{n-1}$ .

Considerando uma matriz  $A$ , onde as colunas são os autovetores de  $Cx$  ordenados de forma decrescente, considerando uma transformação definida como:

$$y = A(x - mx) \quad (\text{A.22})$$

Esta transformação irá esquematizar os valores  $x$  em valores  $y$ , onde a média será 0, ou seja,  $my = 0$ . Poderá se obter a matriz de covariância dos  $y$  de  $A$  e  $Cx$  por:

$$Cy = ACxA^T \quad (\text{A.23})$$

A matriz  $Cy$  tem elementos na diagonal principal que são os autovalores de  $Cx$ , podemos afirmar então que  $Cx$  e  $Cy$  possuem os mesmo autovalores e autovetores (ANTON; RORRES, 2004). Obtêm-se:

$$(Cy) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.24})$$

Os elementos que não fazem parte da diagonal principal de  $Cy$  são zeros, então os elementos dos vetores  $y$  são descorrelacionados.

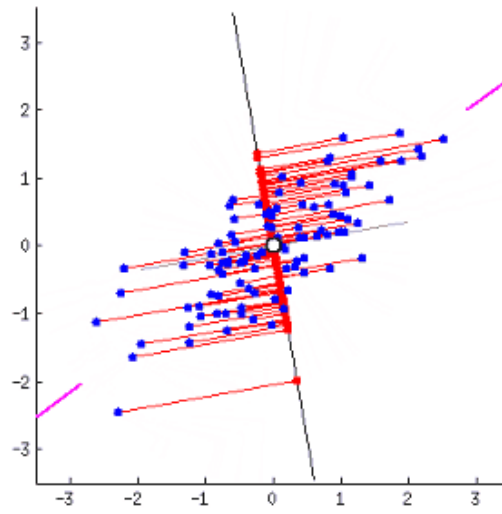
Então, a transformação dita no início desta seção:  $y = A(x - mx)$ , é conhecida como a Transformada de Hotelling, que é o alinhamento dos autovetores por rotação do sistema de eixos, sendo este alinhamento quem descorrelaciona os dados. É possível visualizar essa rotação dos eixos segundo Figura 35.

Os pontos azuis das figuras são os dados, as linhas em vermelho são as distâncias, e os pontos em vermelho as variâncias. É desejável que as distâncias sejam mínimas e os pontos em vermelho mais espaçados (máxima variância). A figura C mostra o alinhamento que corresponde a 1ª Componente Principal.

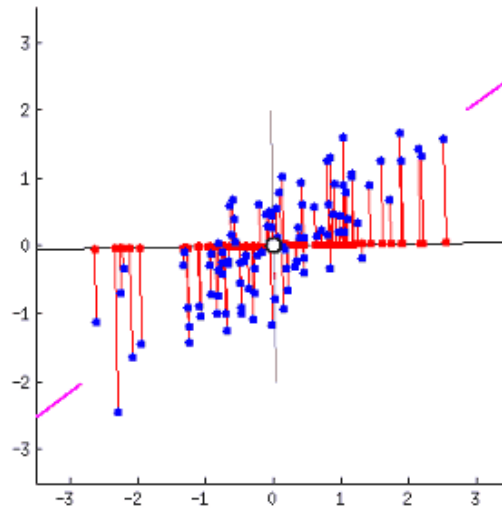
Cada autovalor calculado mostra a variância do componente  $y_i$  ao longo do vetor  $vi$ , sendo esta variância um aspecto importante para a análise dos dados de entrada.

Figura 35 – Rotação dos eixos principais.

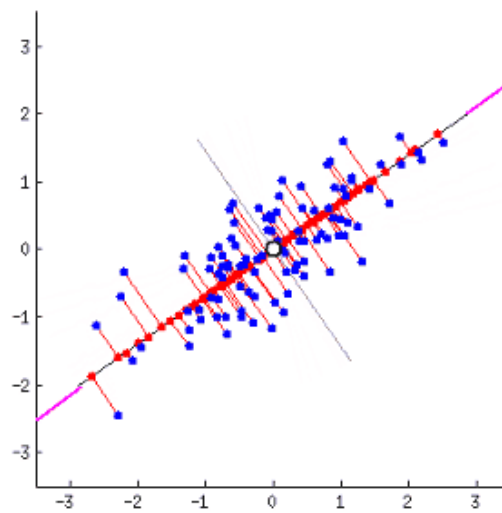
(a) Rotação dos eixos.



(b) Rotação dos eixos.



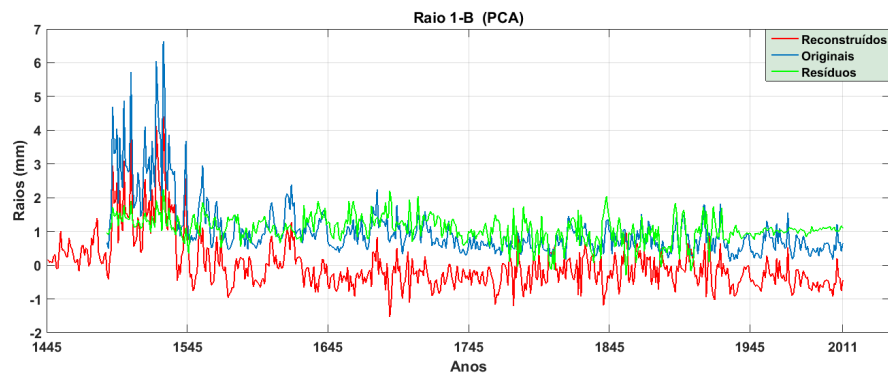
(c) Rotação dos eixos.



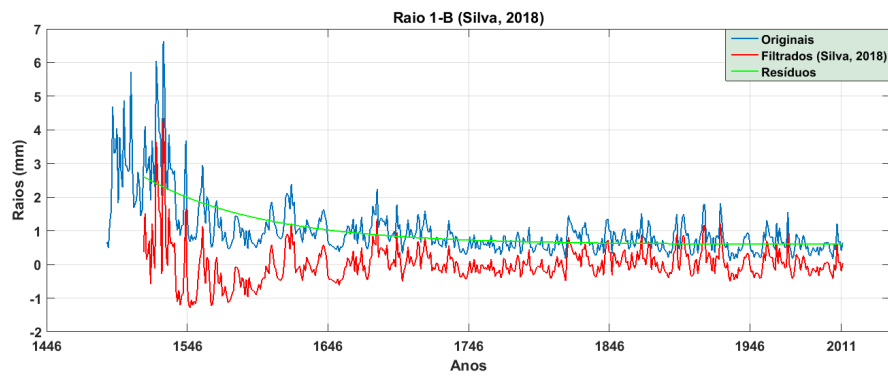
## APÊNDICE B – CONJUNTO DE GRÁFICOS DAS AMOSTRAS

Figura 36 – Amostra B pertencente à árvore n<sup>o</sup>1

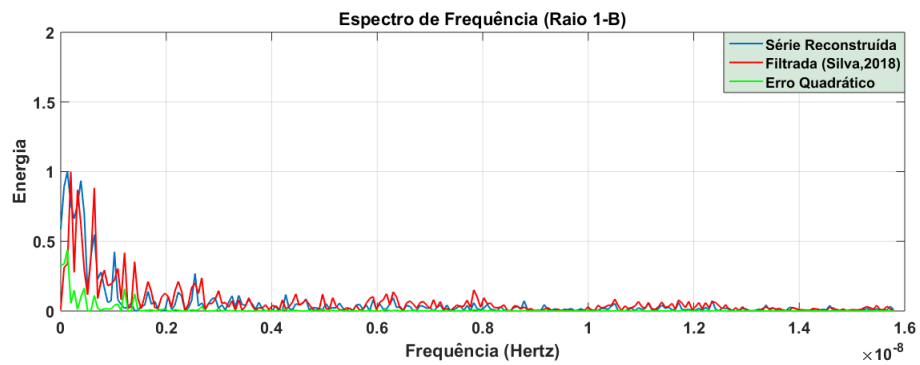
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



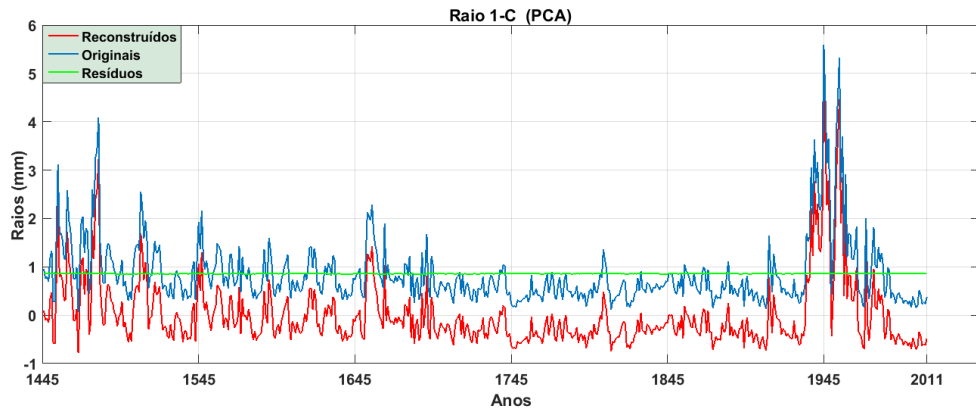
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



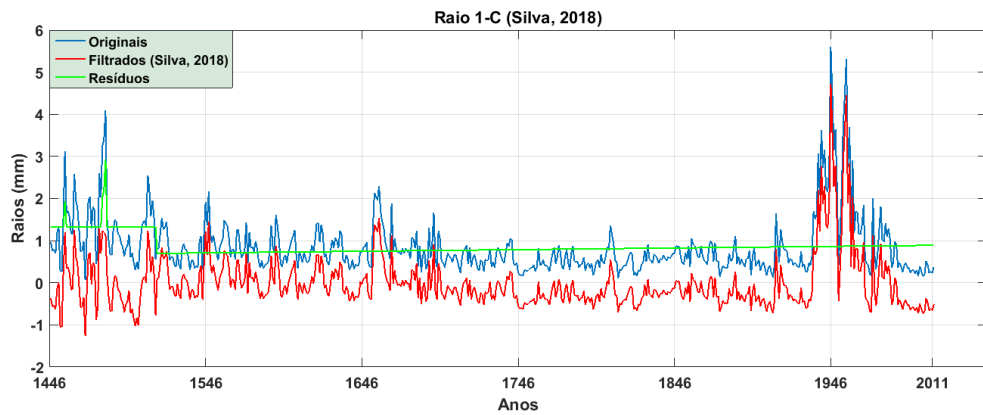
Fonte: A autora.

Figura 37 – Amostra C pertencente à árvore nº1

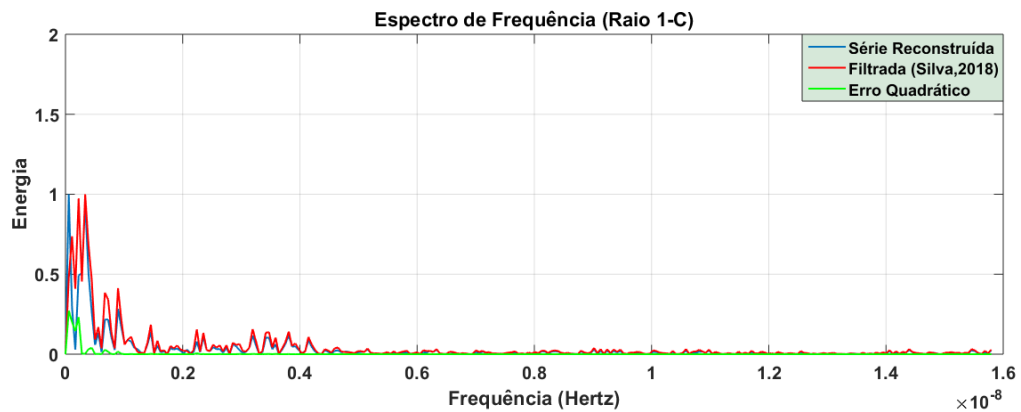
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



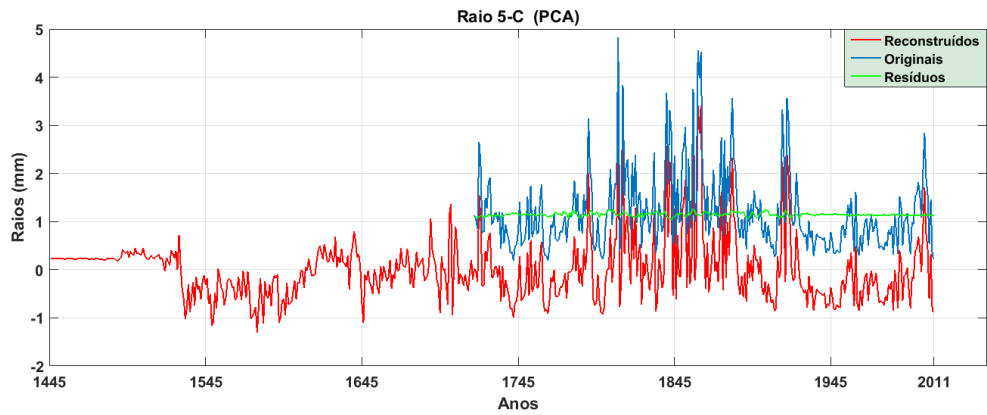
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



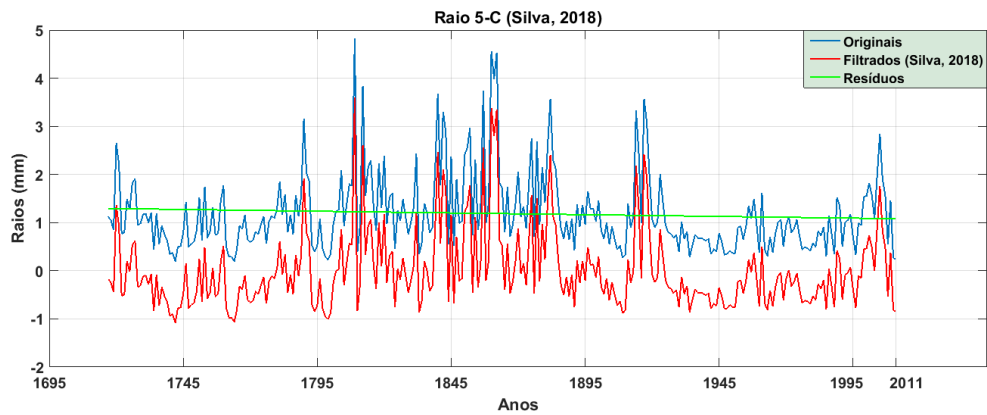
Fonte: A autora.

Figura 38 – Amostra C pertencente à árvore nº5

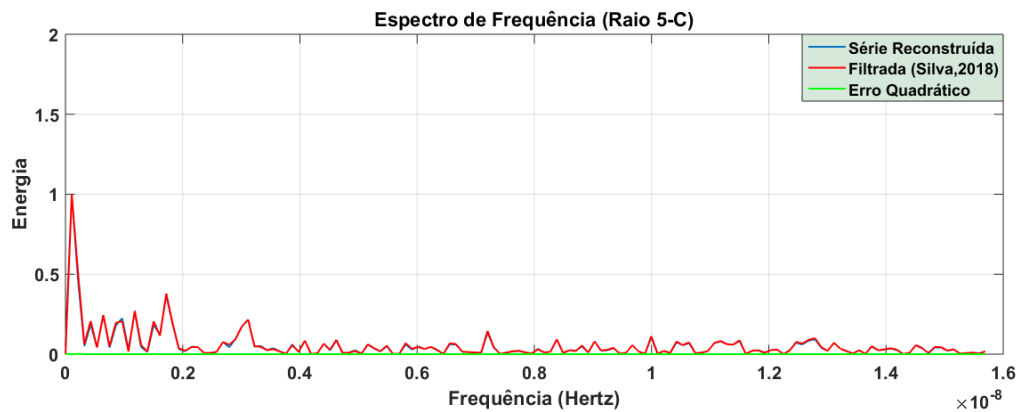
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



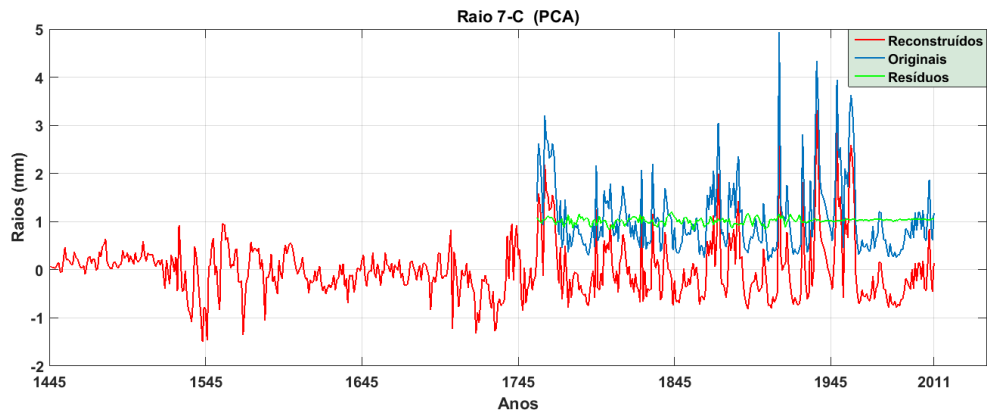
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



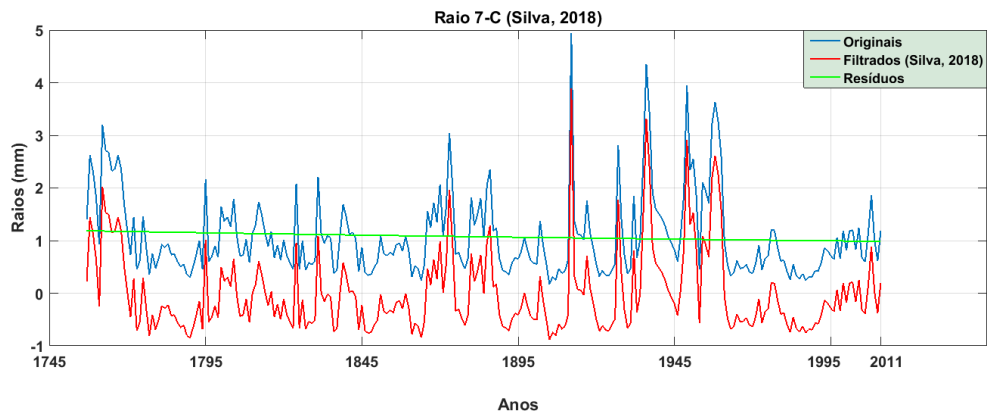
Fonte: A autora.

Figura 39 – Amostra C pertencente à árvore n<sup>o</sup>7

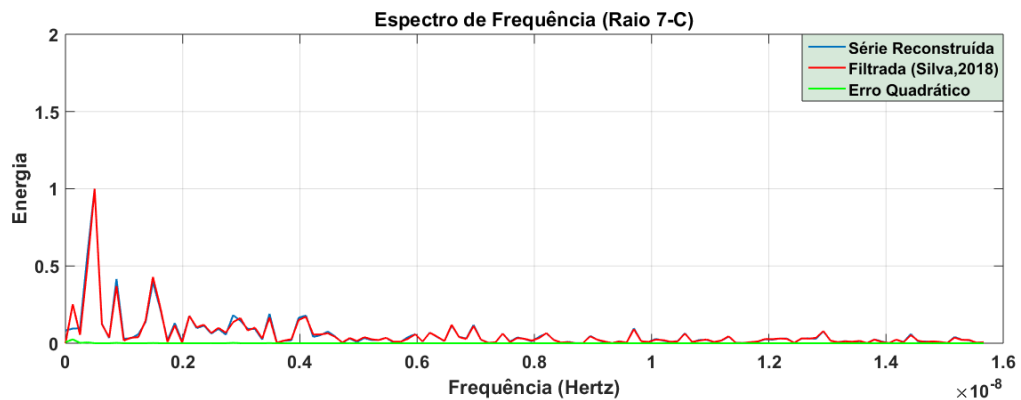
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



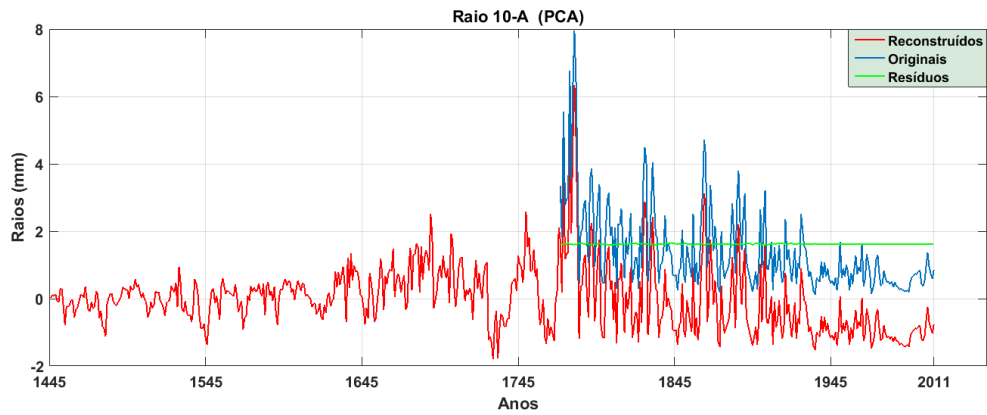
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



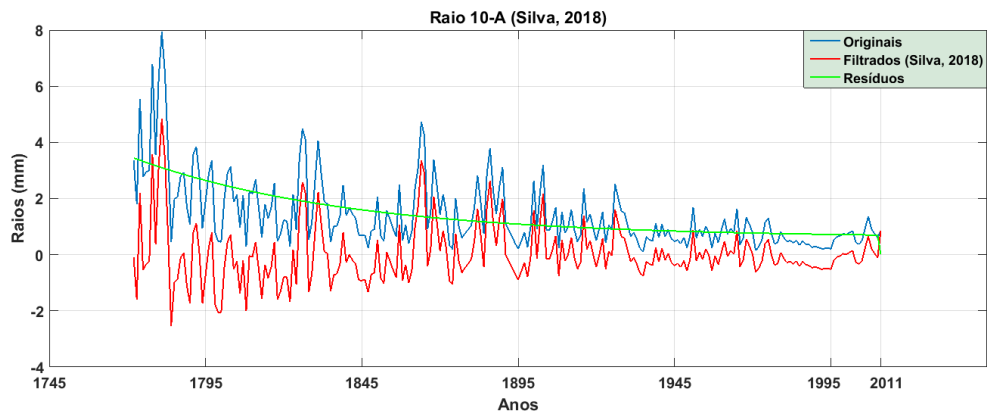
Fonte: A autora.

Figura 40 – Amostra A pertencente à árvore nº10

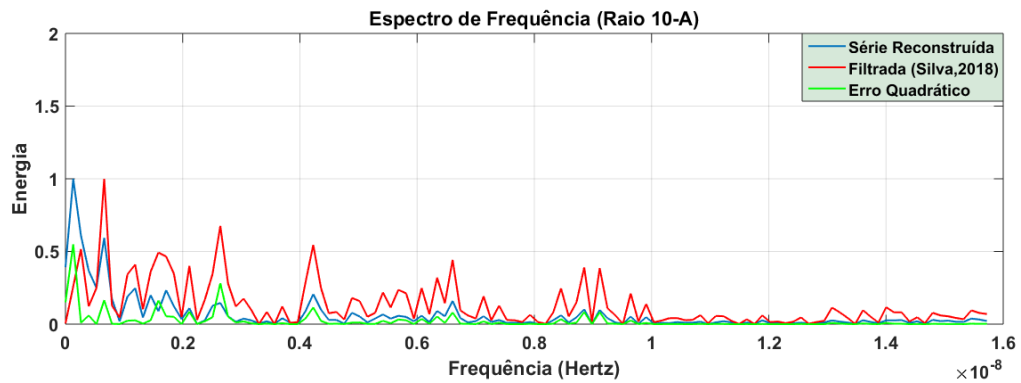
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



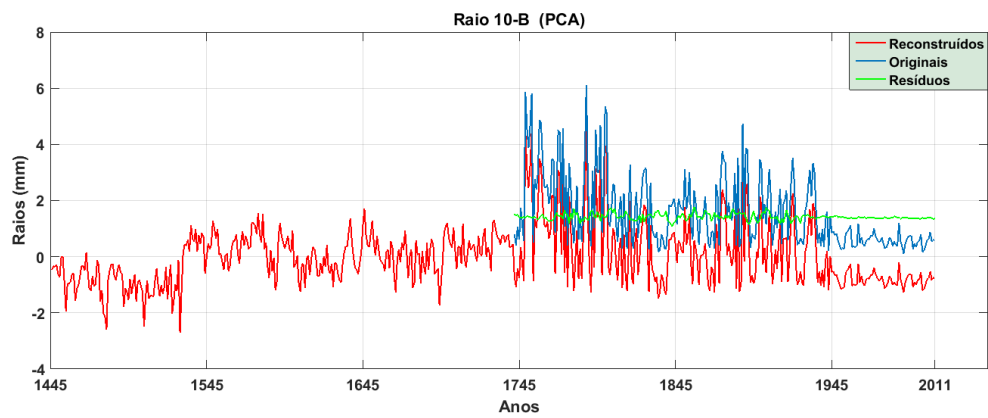
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



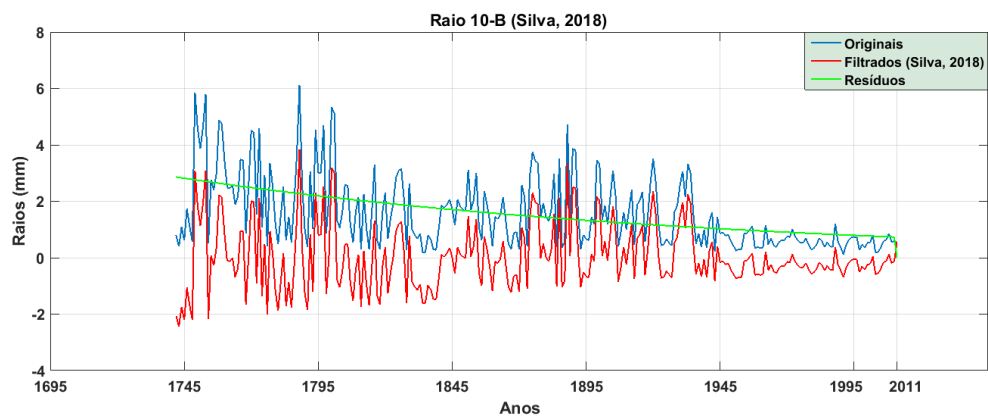
Fonte: A autora.

Figura 41 – Amostra B pertencente à árvore nº10

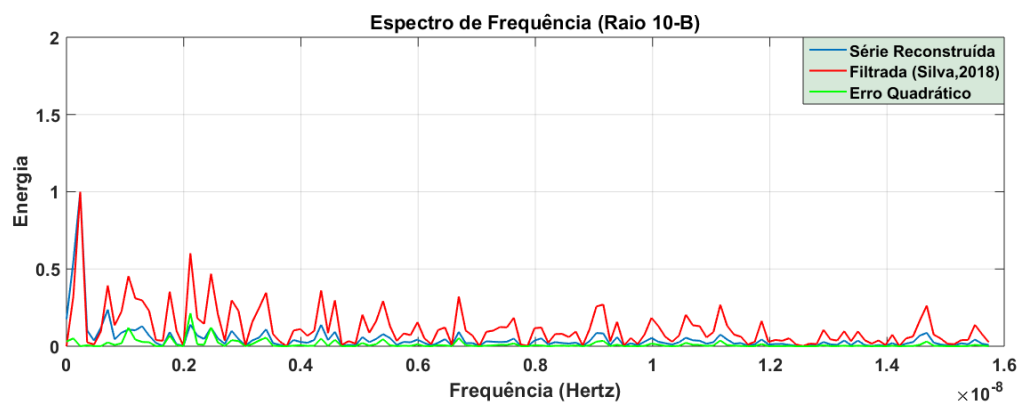
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



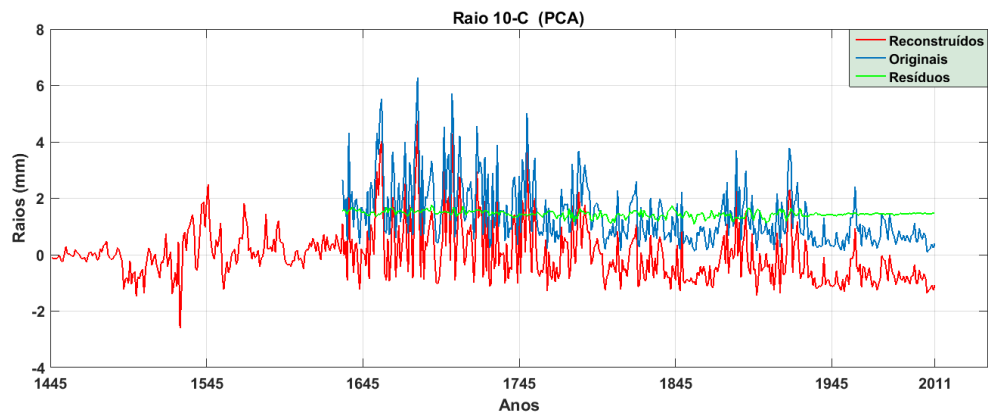
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



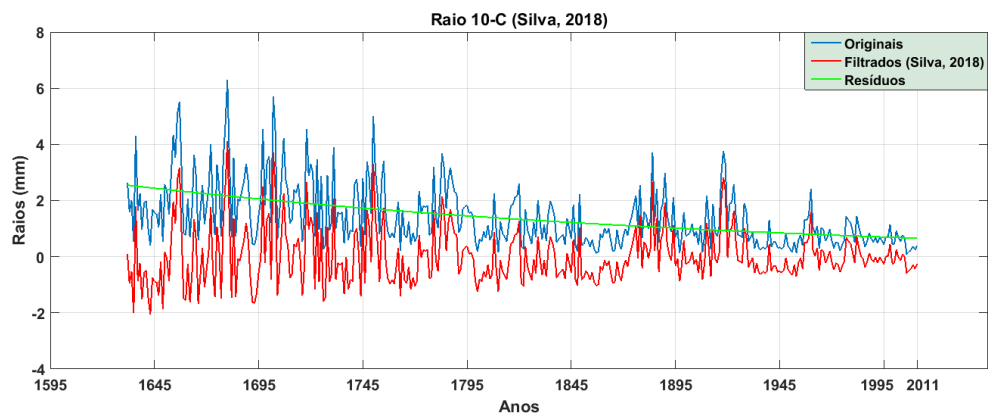
Fonte: A autora.

Figura 42 – Amostra C pertencente à árvore nº10

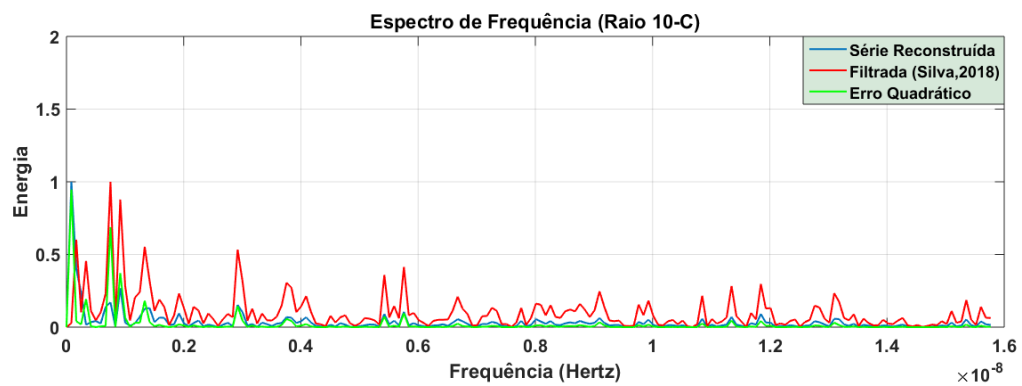
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



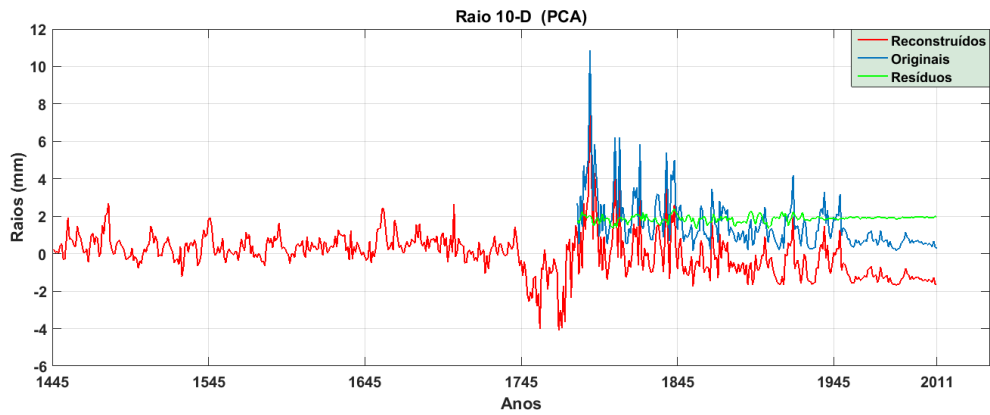
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



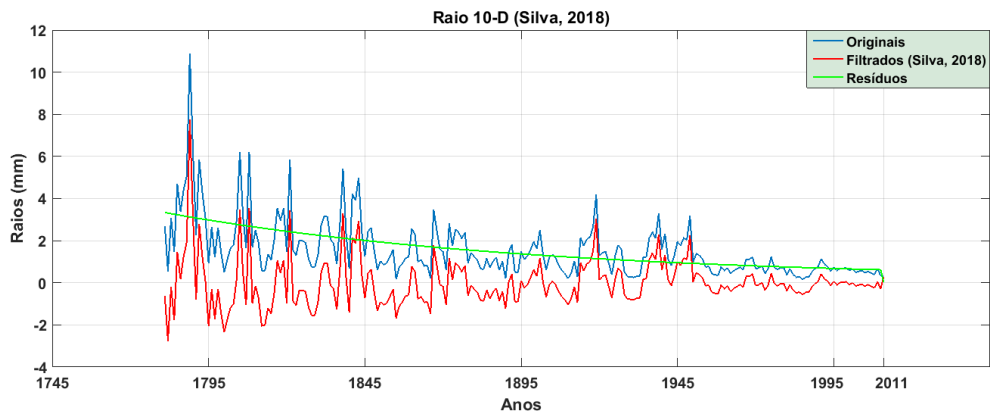
Fonte: A autora.

Figura 43 – Amostra D pertencente à árvore nº10

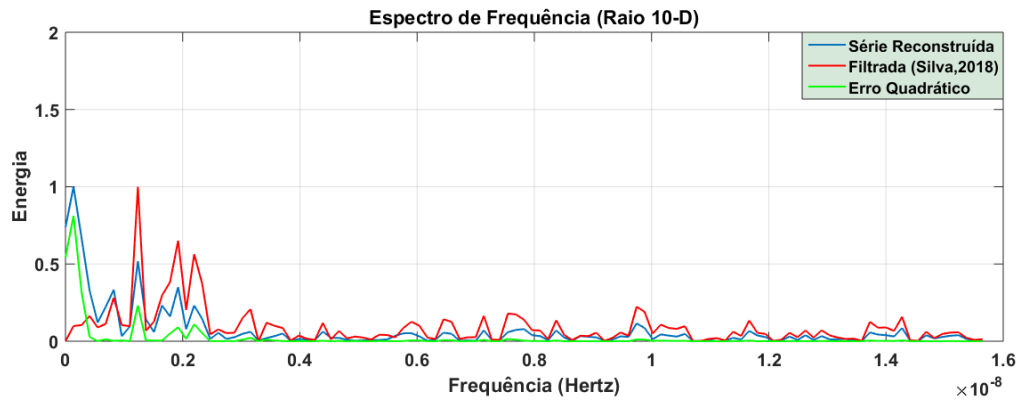
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



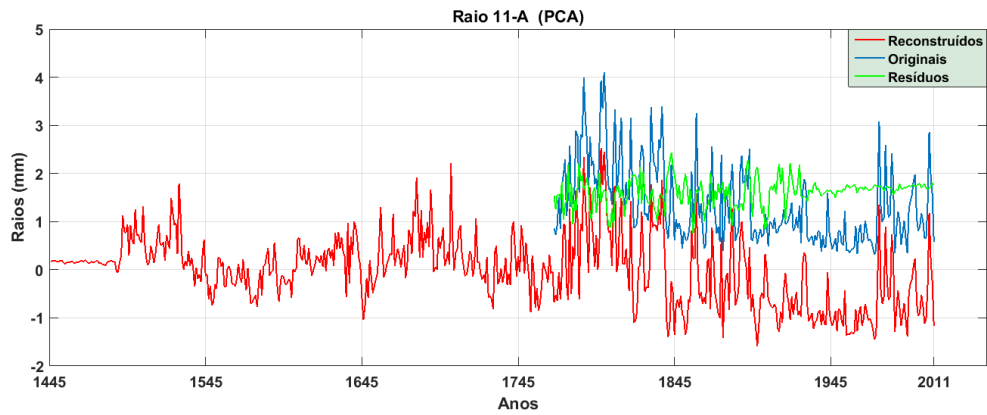
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



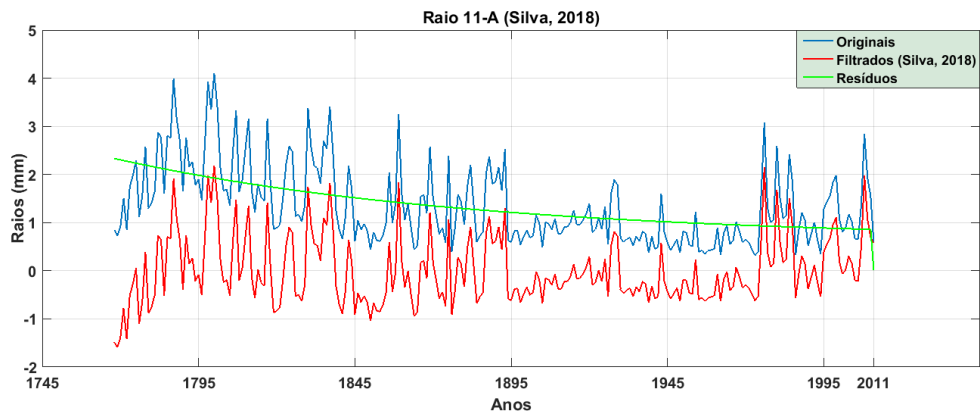
Fonte: A autora.

Figura 44 – Amostra A pertencente à árvore nº11

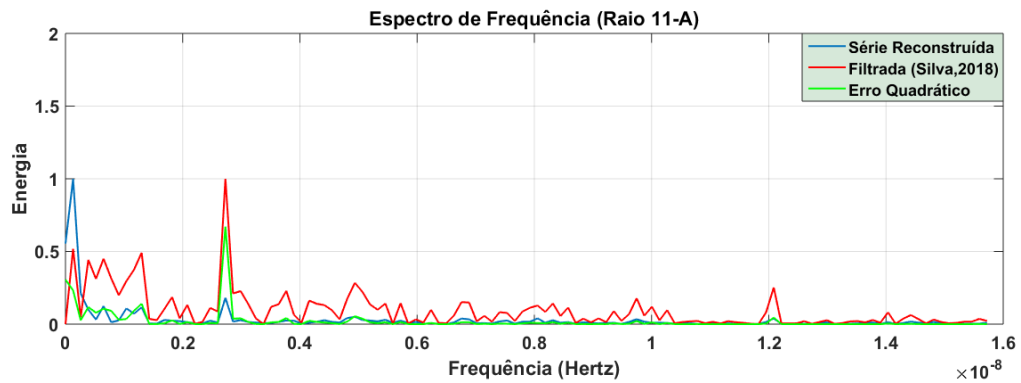
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



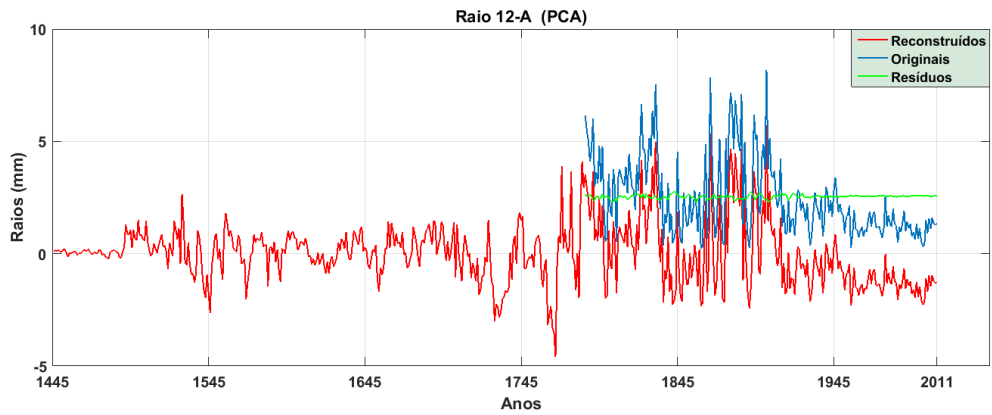
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



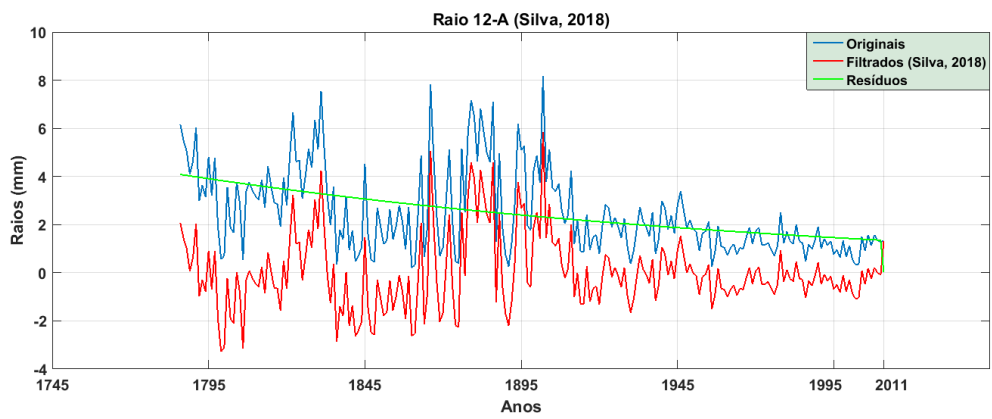
Fonte: A autora.

Figura 45 – Amostra A pertencente à árvore nº12

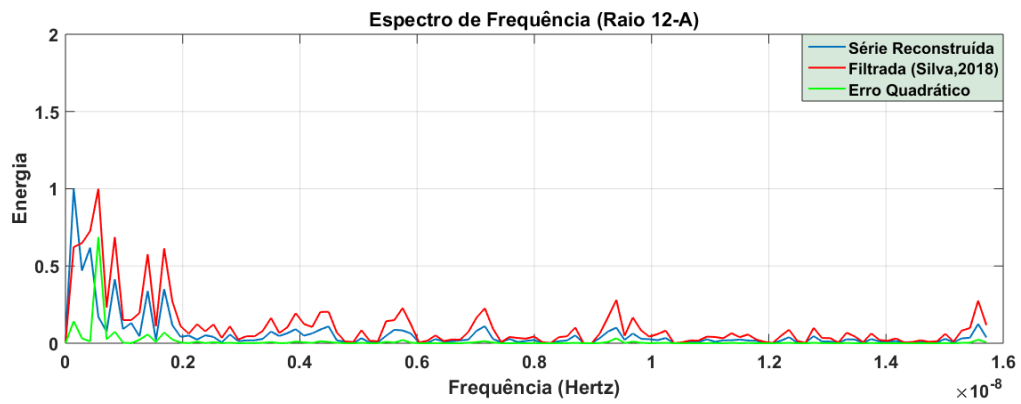
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



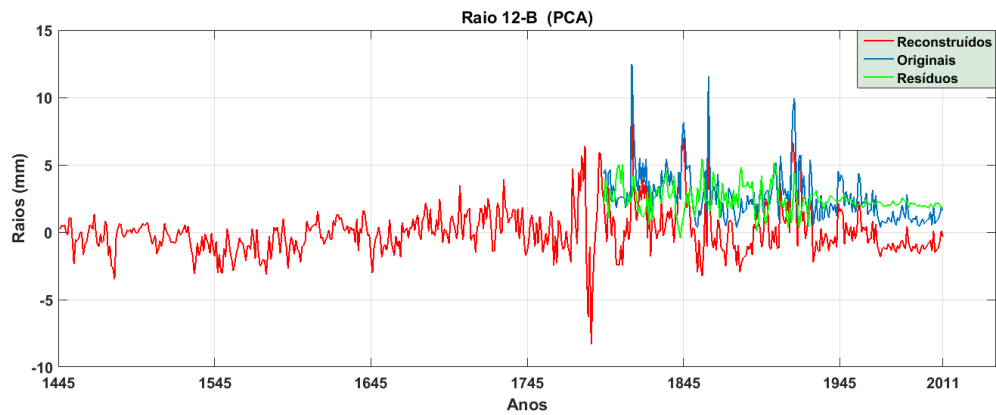
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



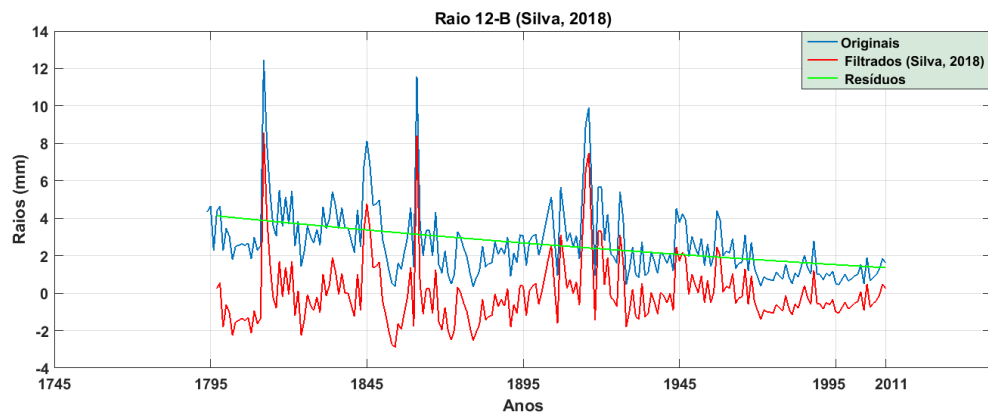
Fonte: A autora.

Figura 46 – Amostra B pertencente à árvore nº12

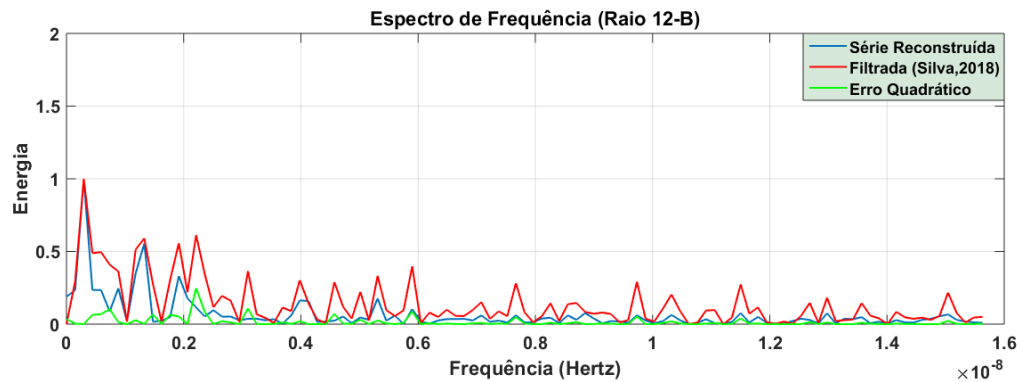
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



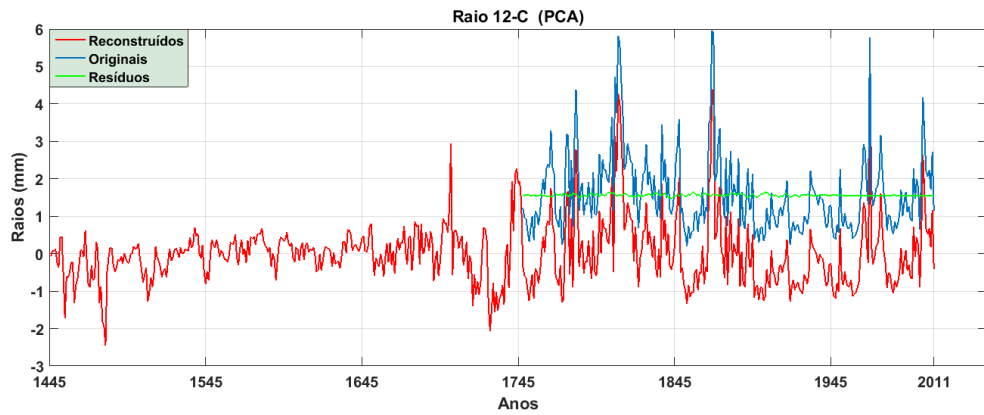
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



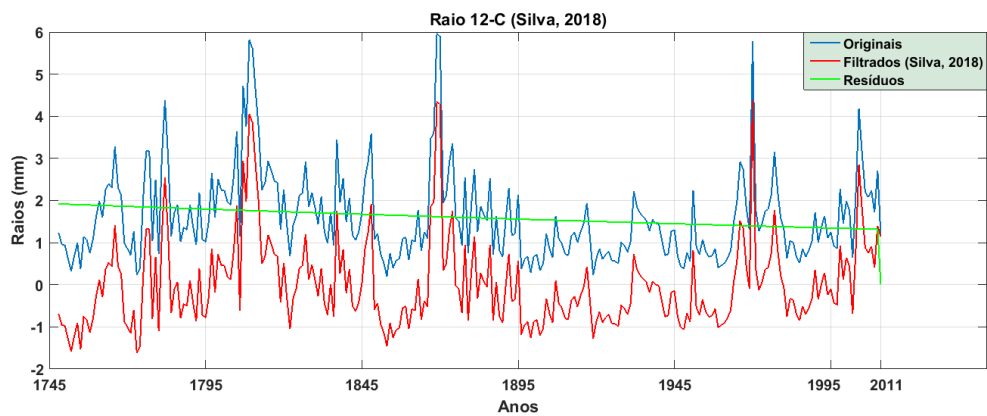
Fonte: A autora.

Figura 47 – Amostra C pertencente à árvore nº12

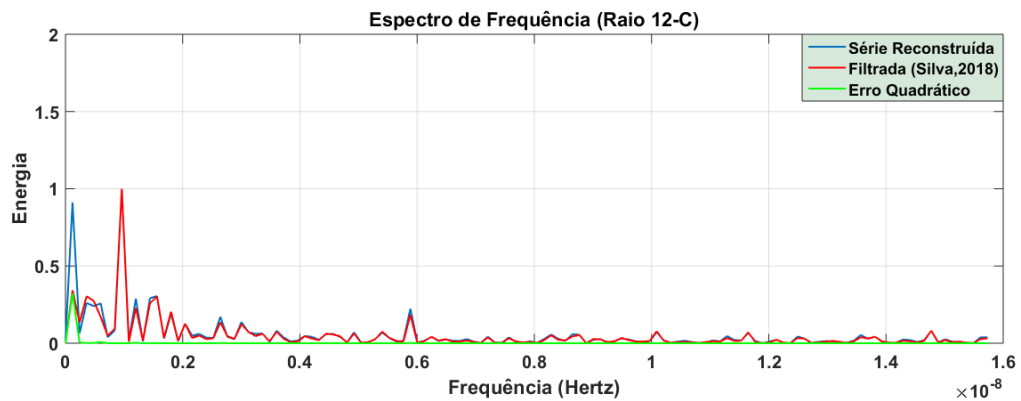
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



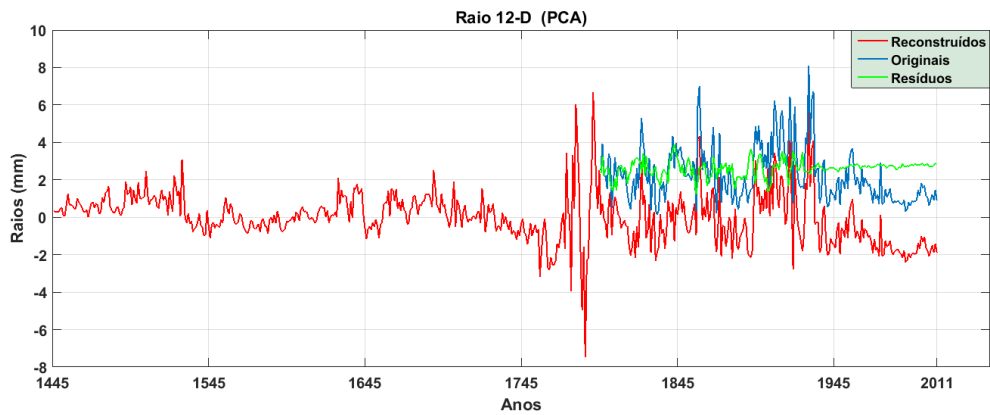
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



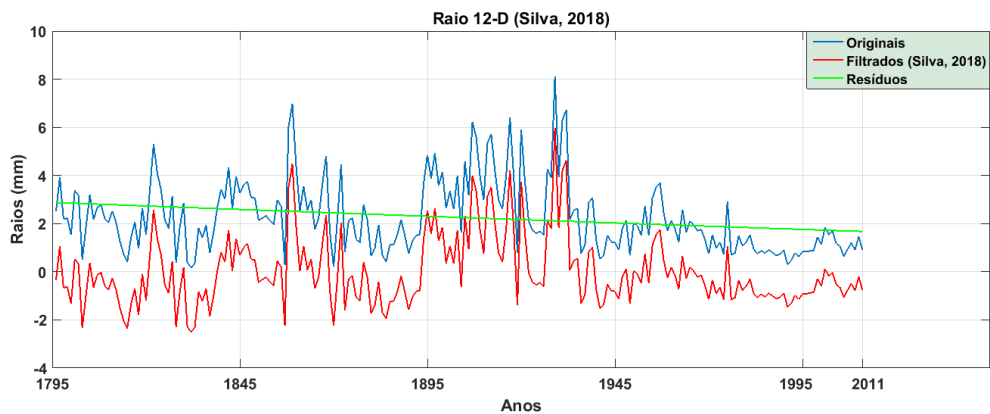
Fonte: A autora.

Figura 48 – Amostra D pertencente à árvore nº12

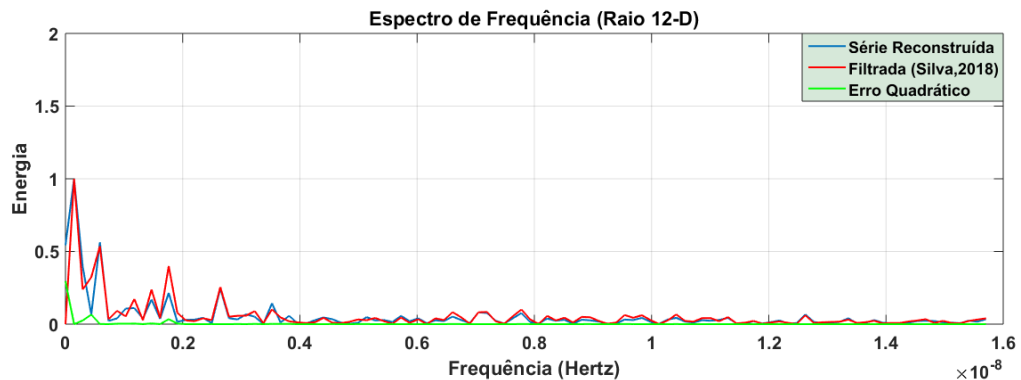
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



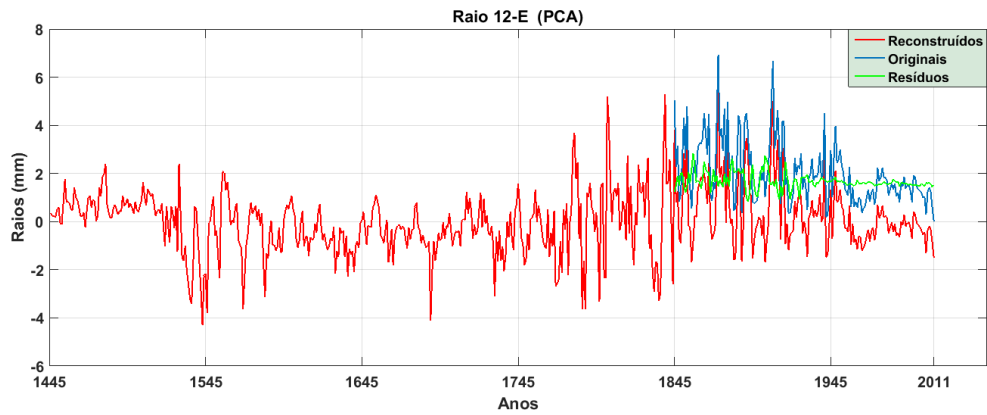
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



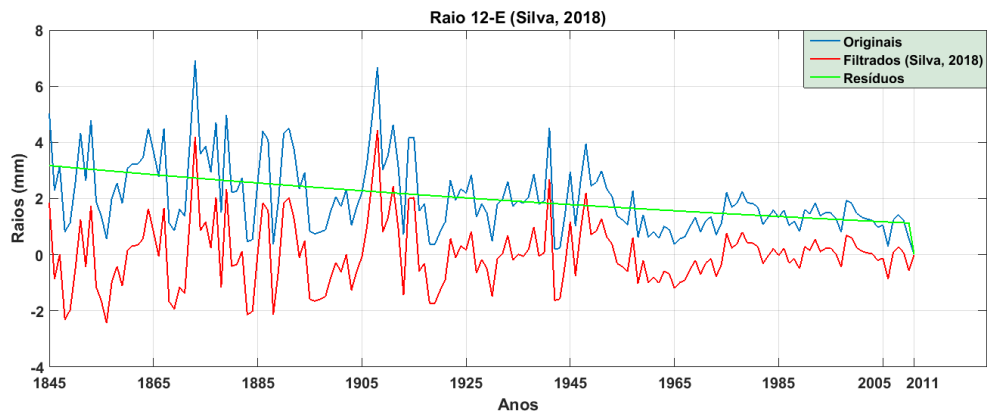
Fonte: A autora.

Figura 49 – Amostra E pertencente à árvore nº12

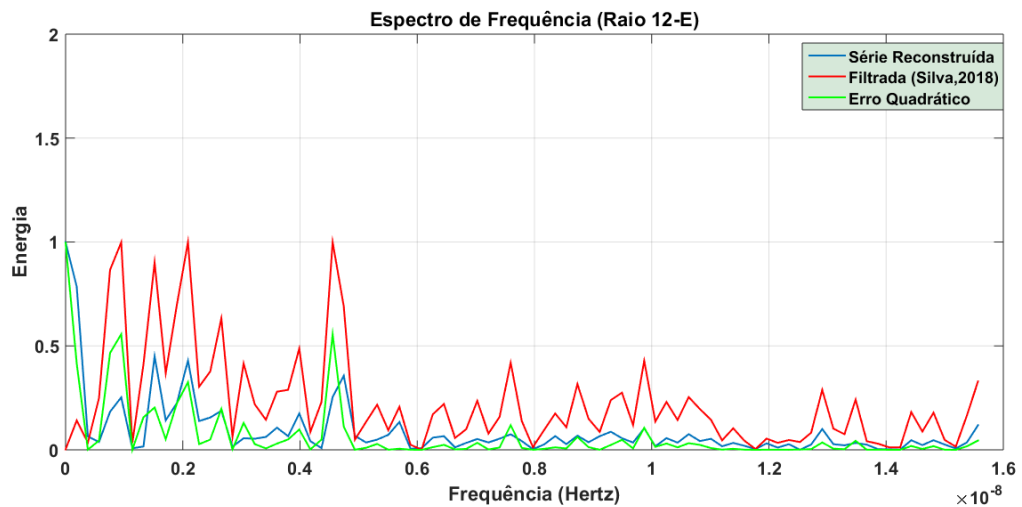
(a) Amostra E - Originais x PCA.



(b) Amostra E - Originais x Filtrados.



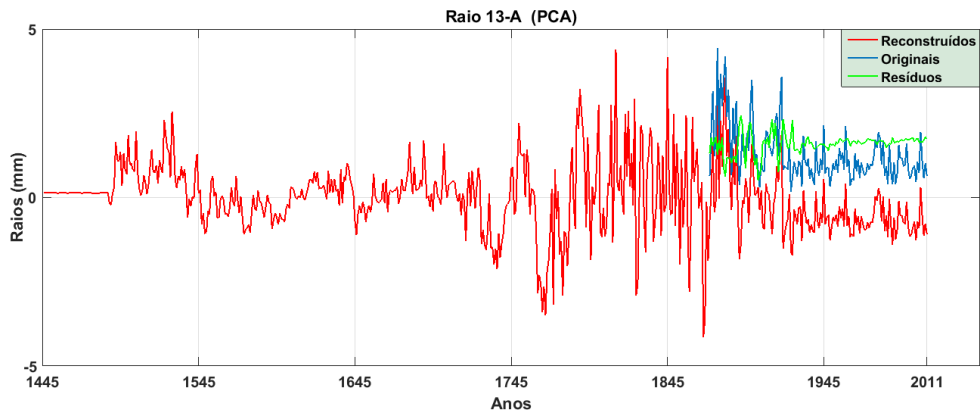
(c) Amostra E - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



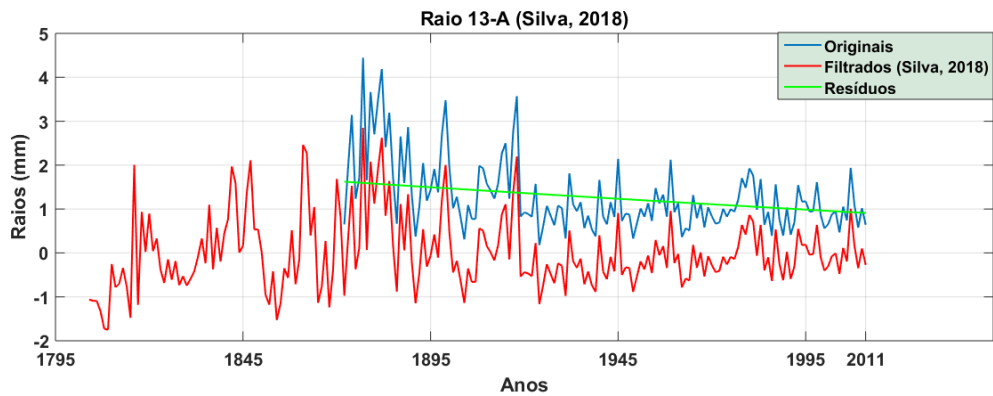
Fonte: A autora.

Figura 50 – Amostra A pertencente à árvore nº13

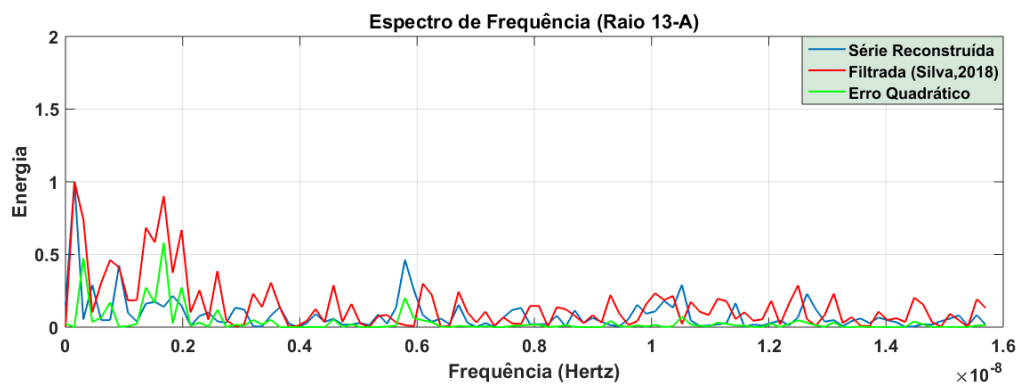
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



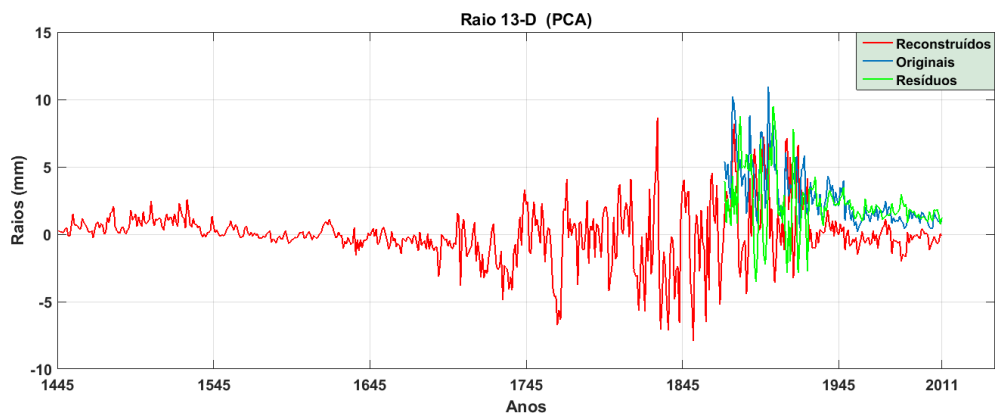
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



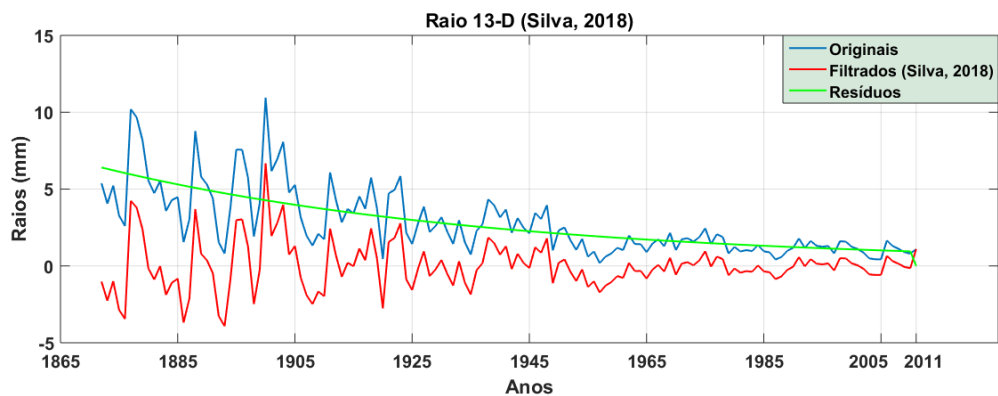
Fonte: A autora.

Figura 51 – Amostra D pertencente à árvore nº13

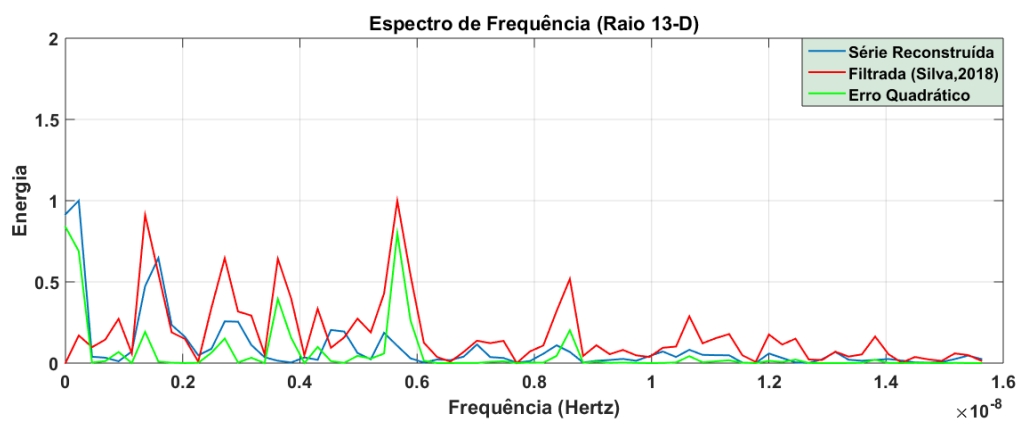
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



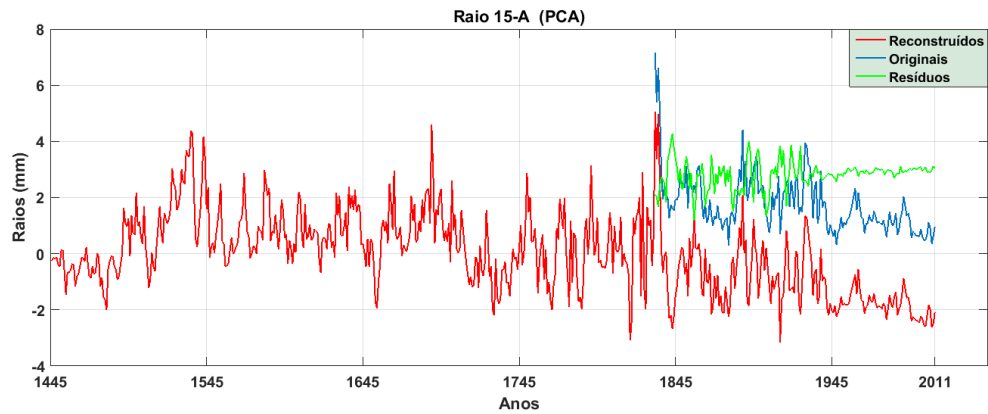
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



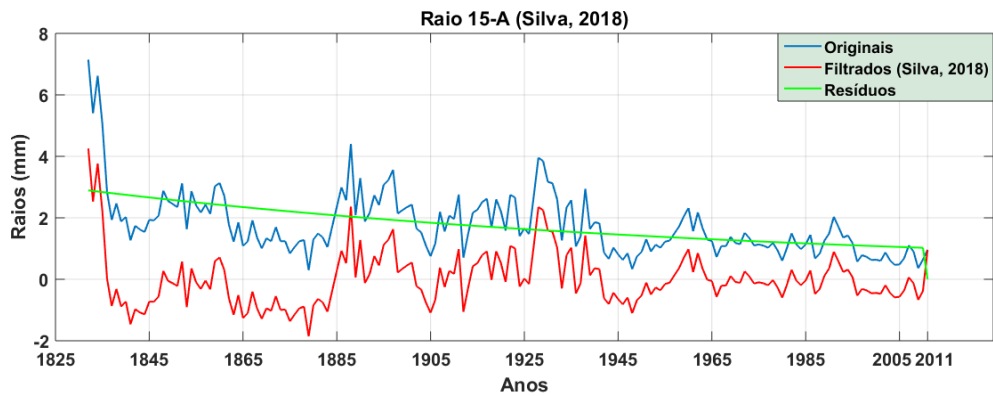
Fonte: A autora.

Figura 52 – Amostra A pertencente à árvore nº15

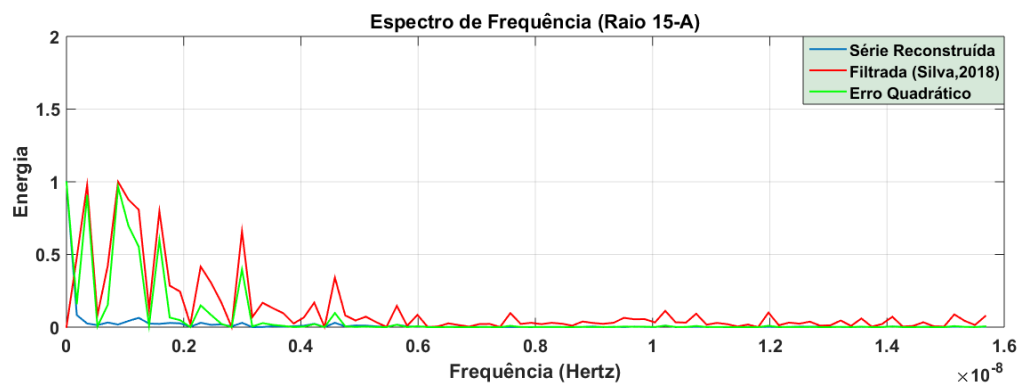
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



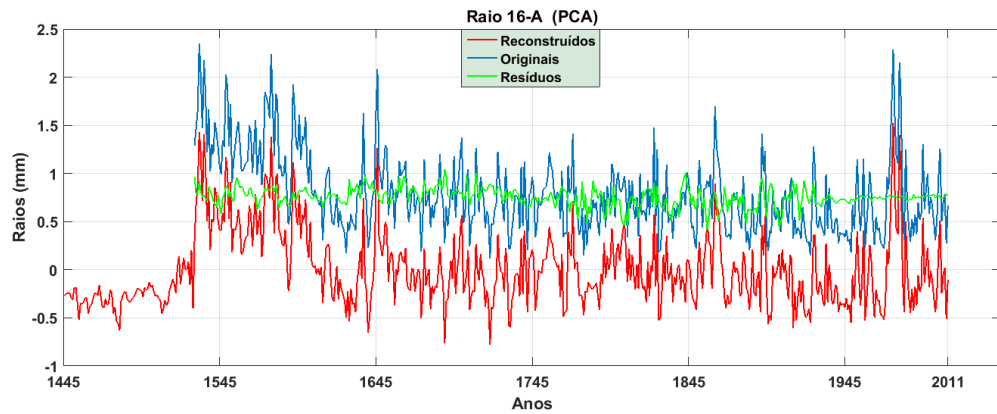
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



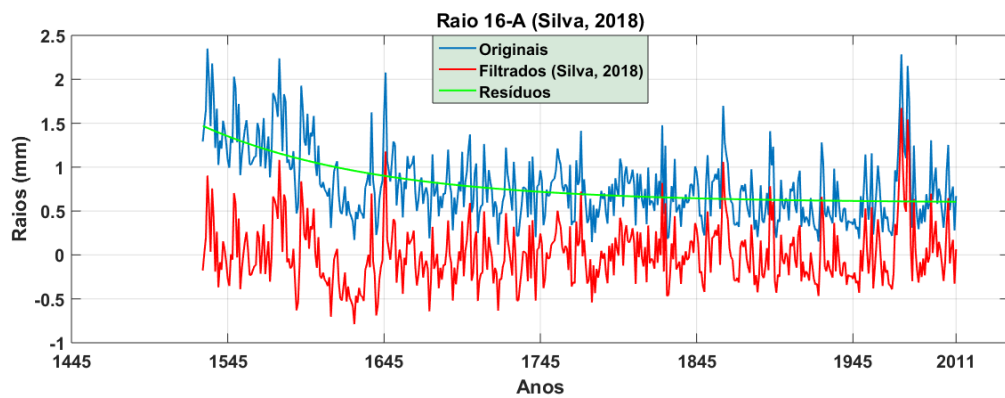
Fonte: A autora.

Figura 53 – Amostra A pertencente à árvore nº16

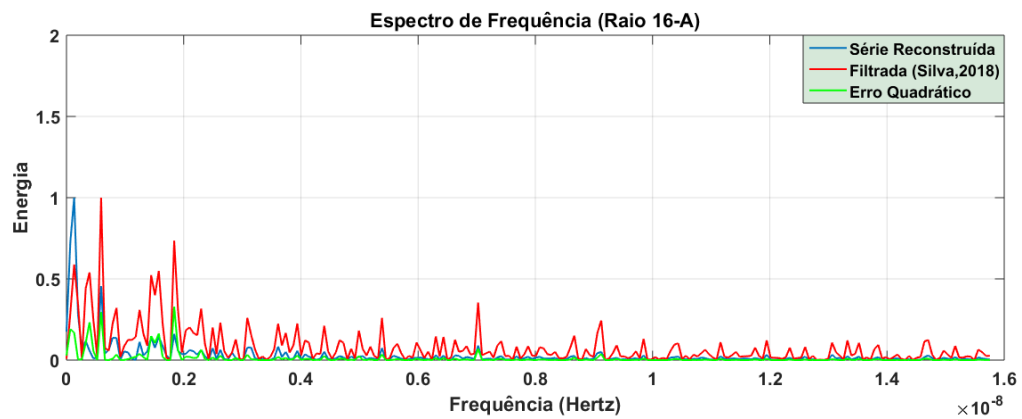
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



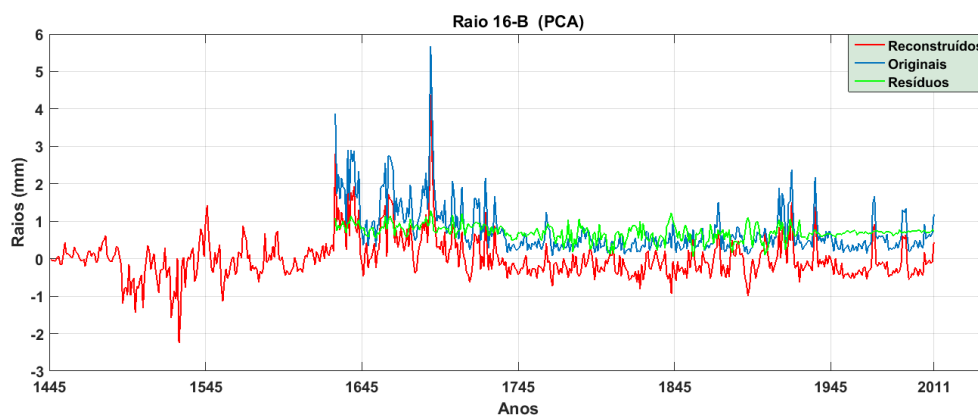
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



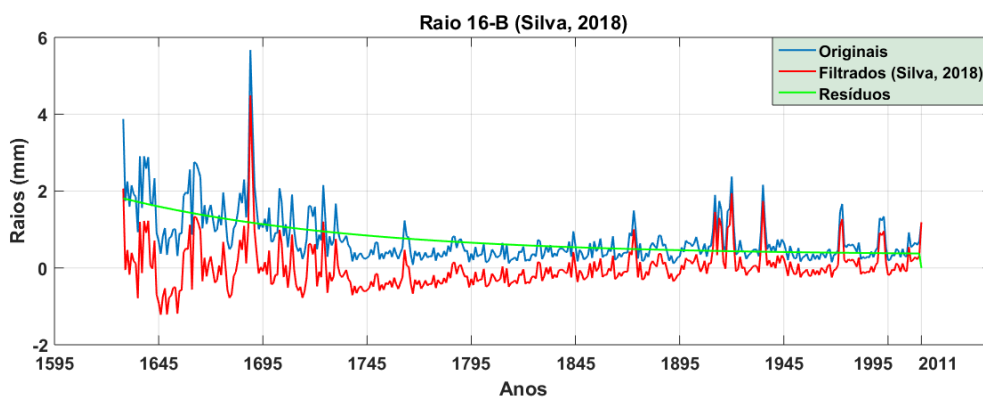
Fonte: A autora.

Figura 54 – Amostra B pertencente à árvore nº16

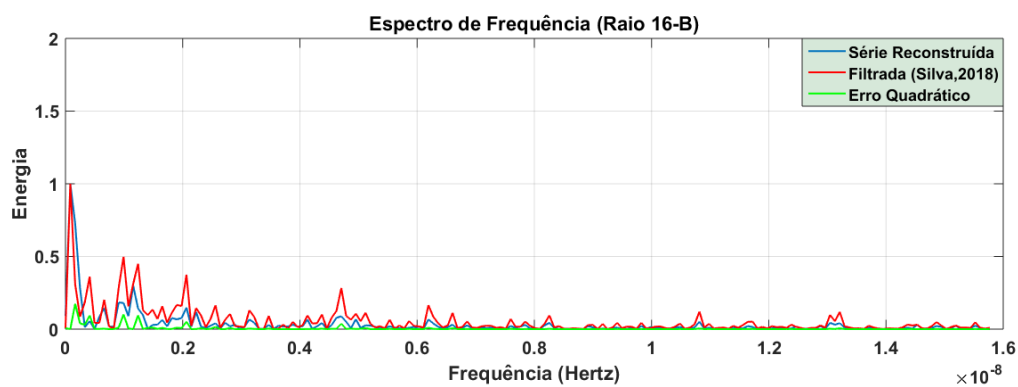
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



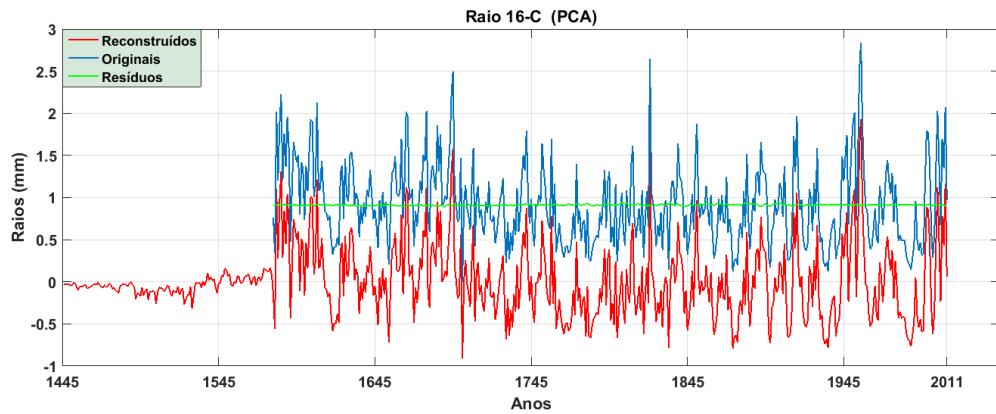
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



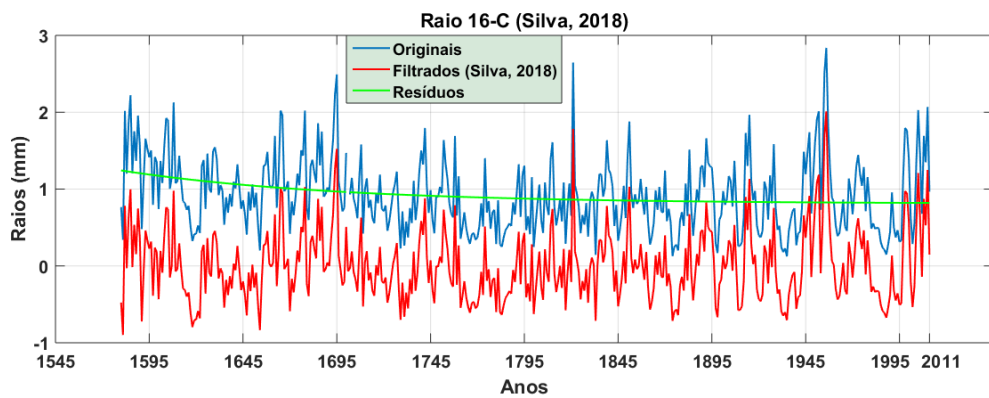
Fonte: A autora.

Figura 55 – Amostra C pertencente à árvore nº16

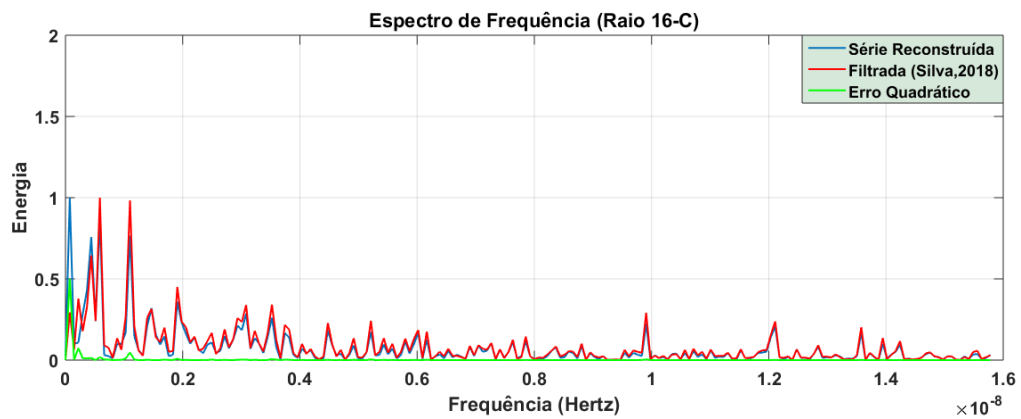
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



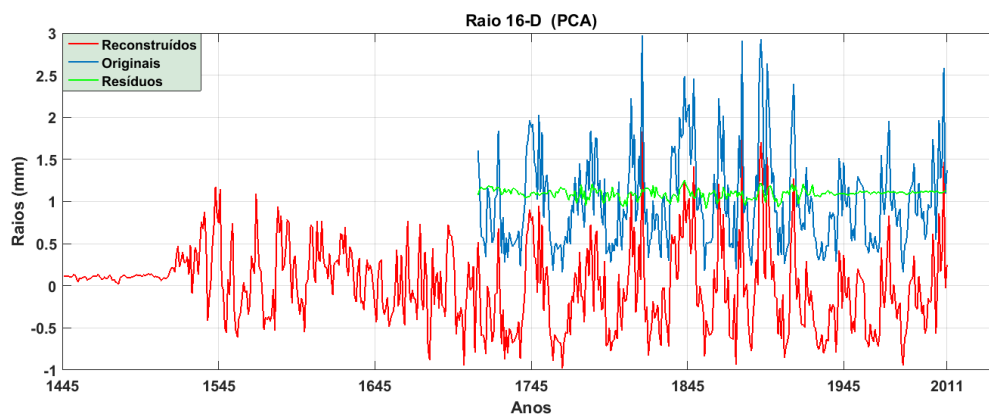
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



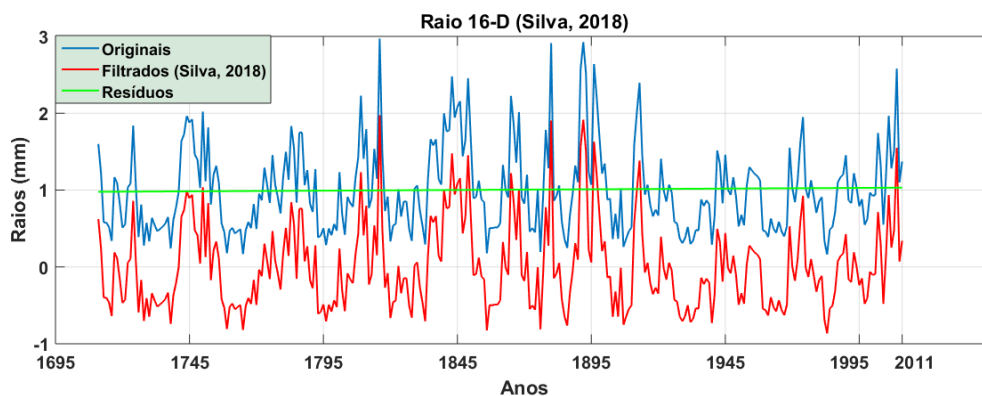
Fonte: A autora.

Figura 56 – Amostra D pertencente à árvore nº16

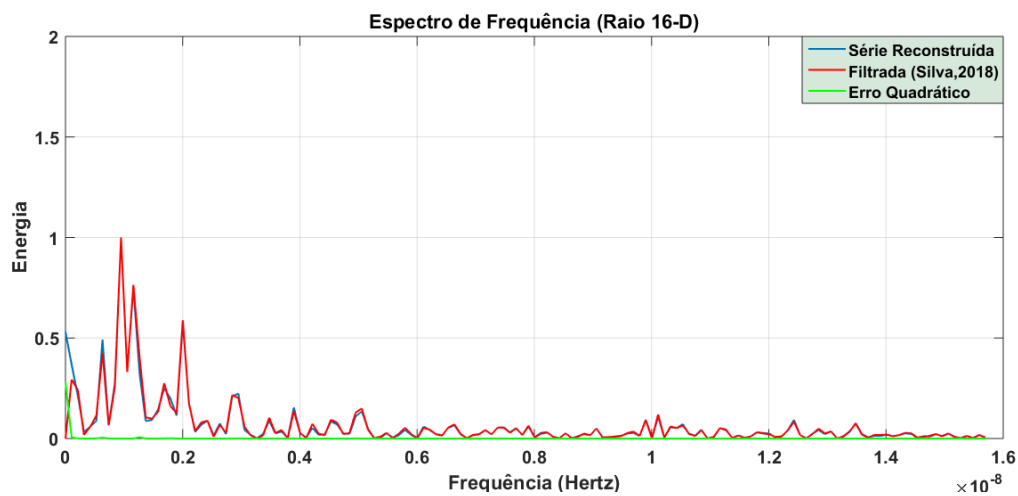
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



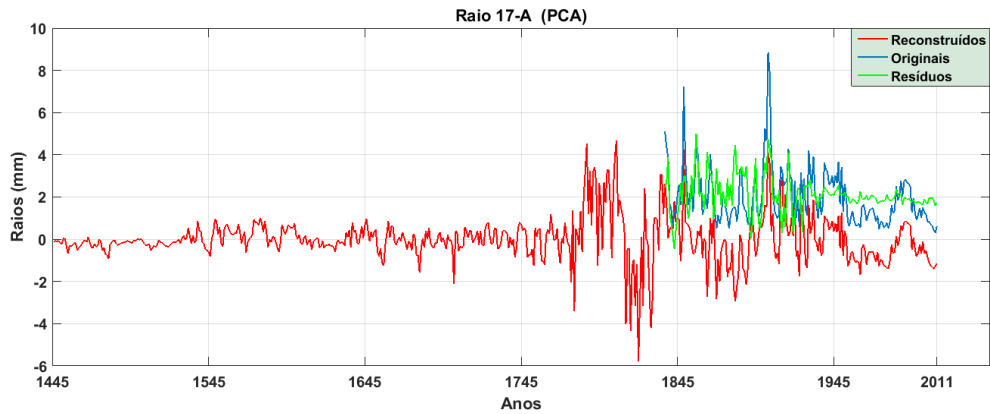
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



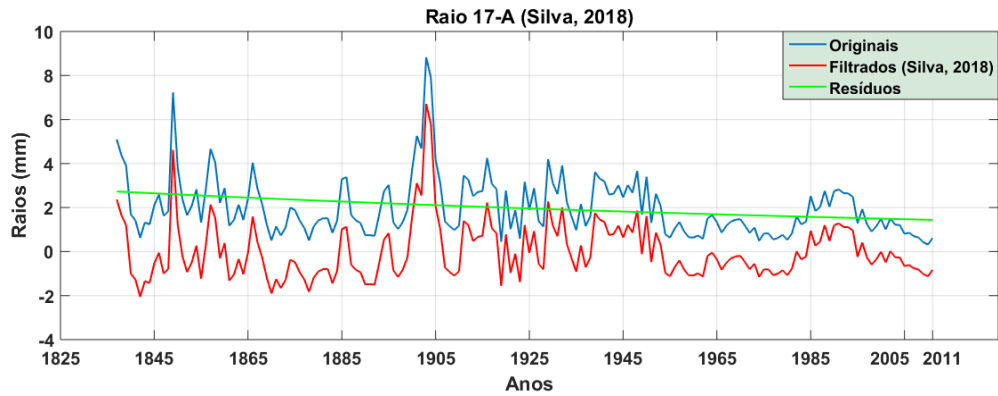
Fonte: A autora.

Figura 57 – Amostra A pertencente à árvore nº17

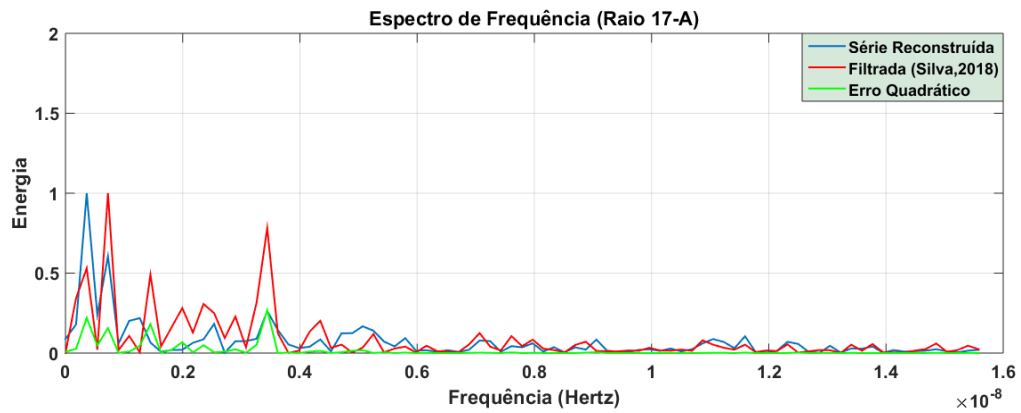
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



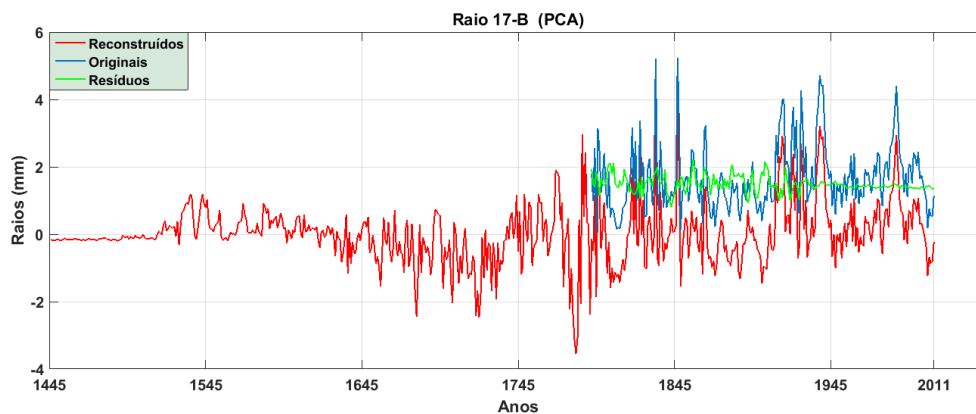
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



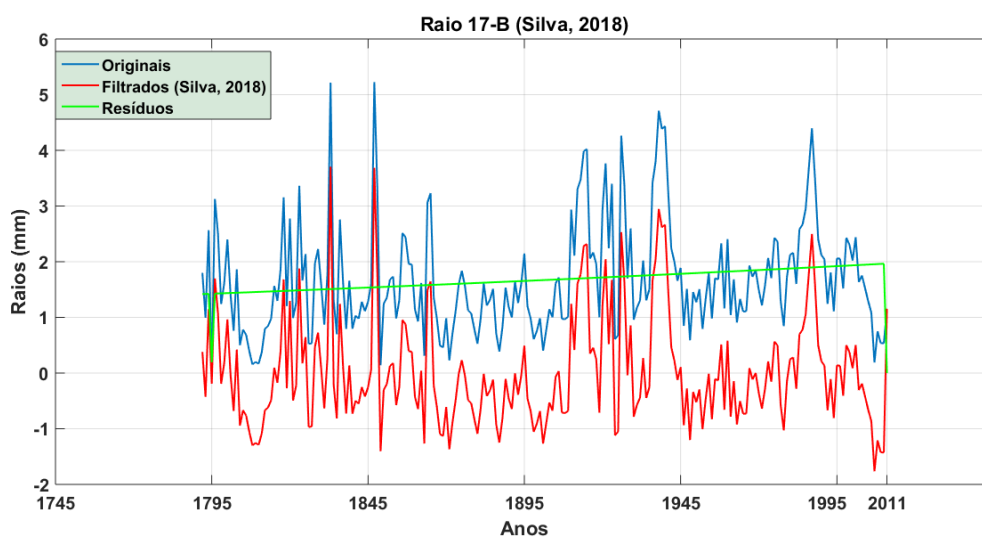
Fonte: A autora.

Figura 58 – Amostra B pertencente à árvore nº17

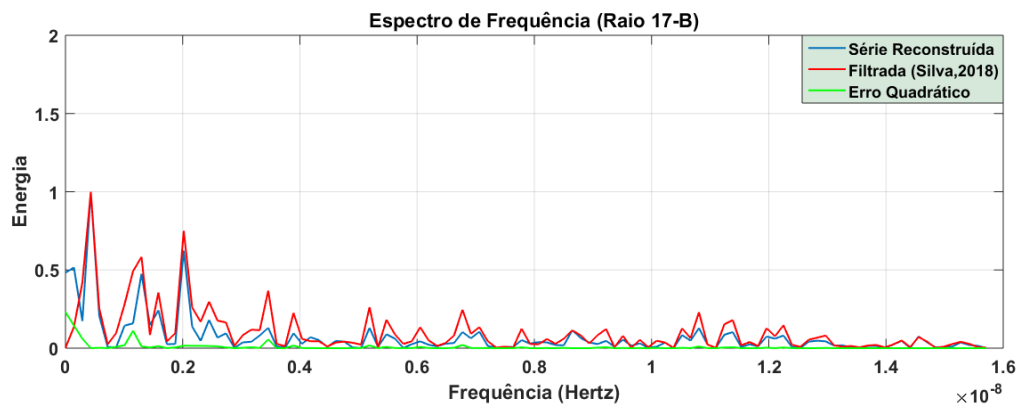
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



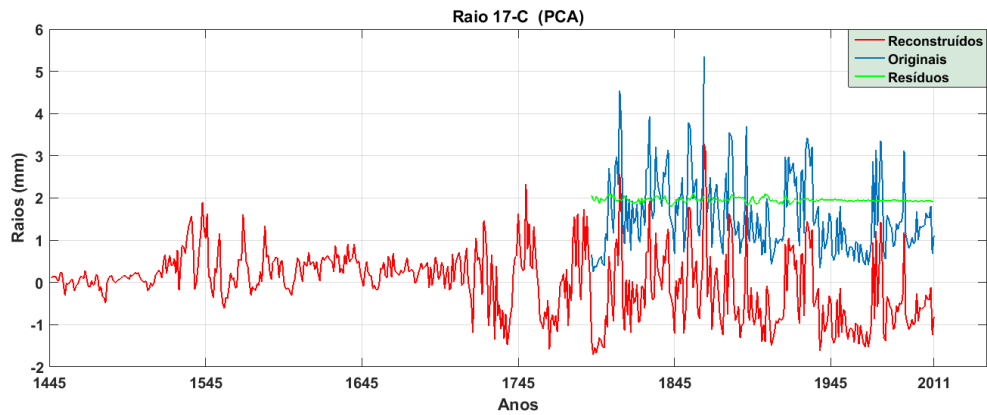
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



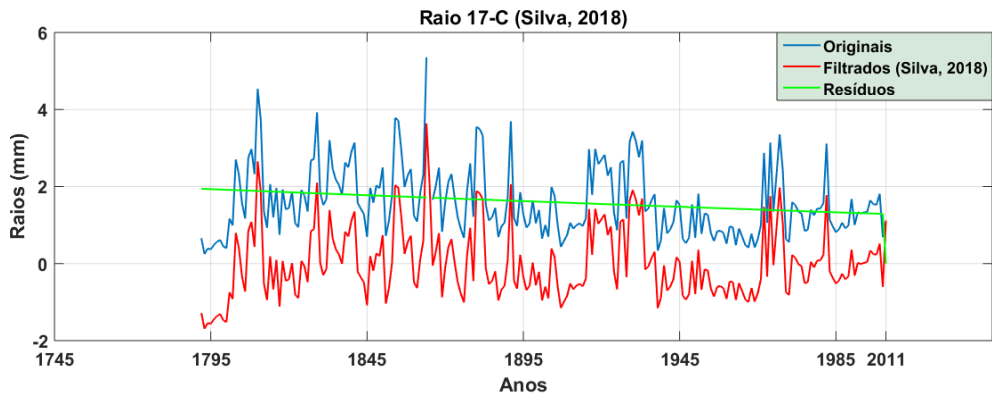
Fonte: A autora.

Figura 59 – Amostra C pertencente à árvore nº17

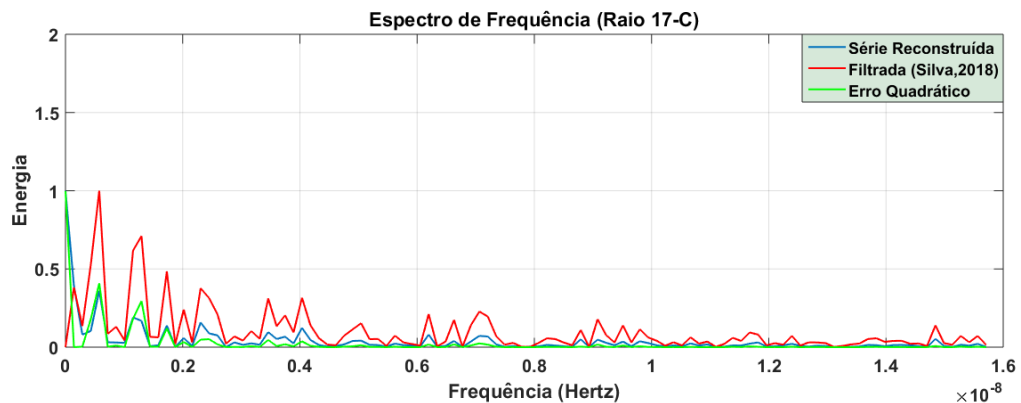
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



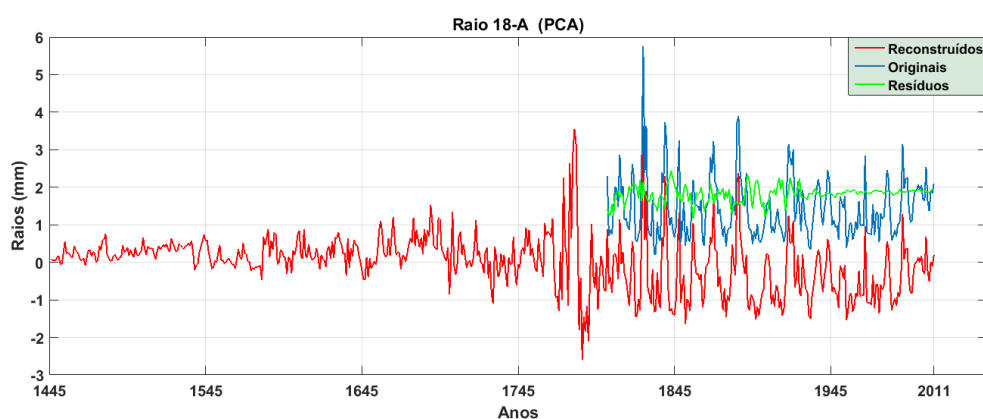
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



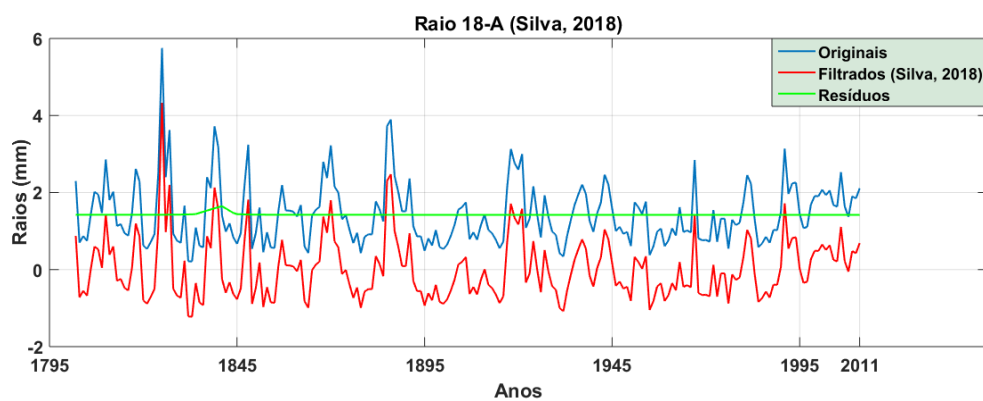
Fonte: A autora.

Figura 60 – Amostra A pertencente à árvore nº18

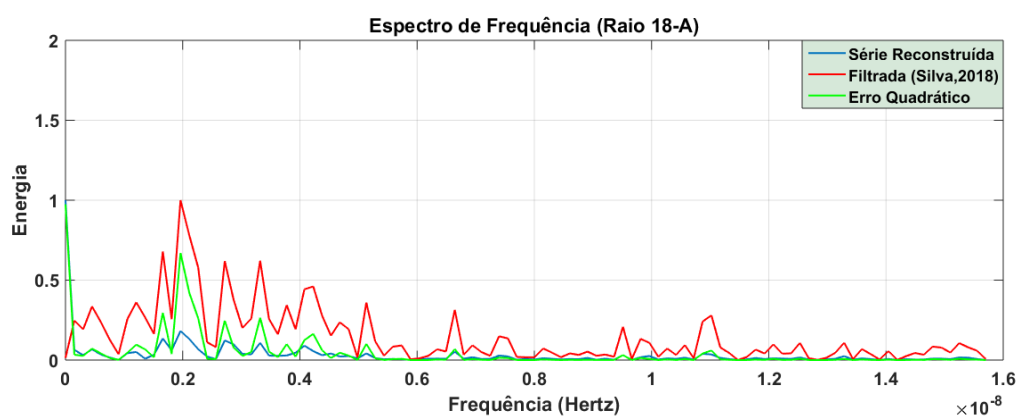
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



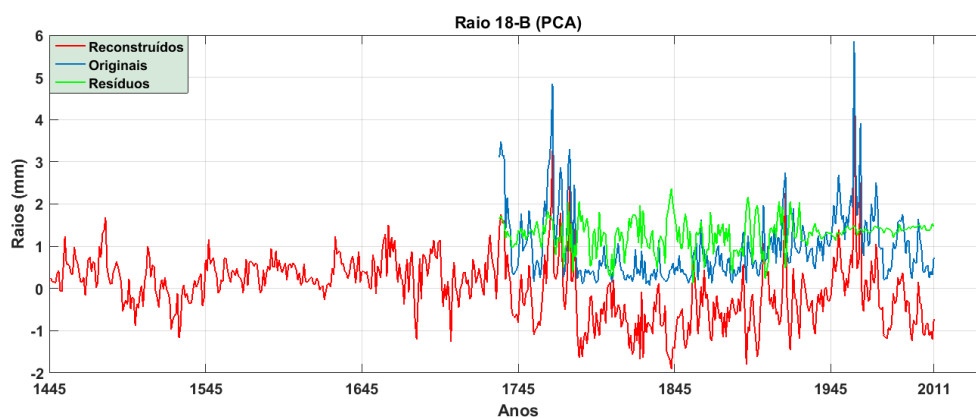
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



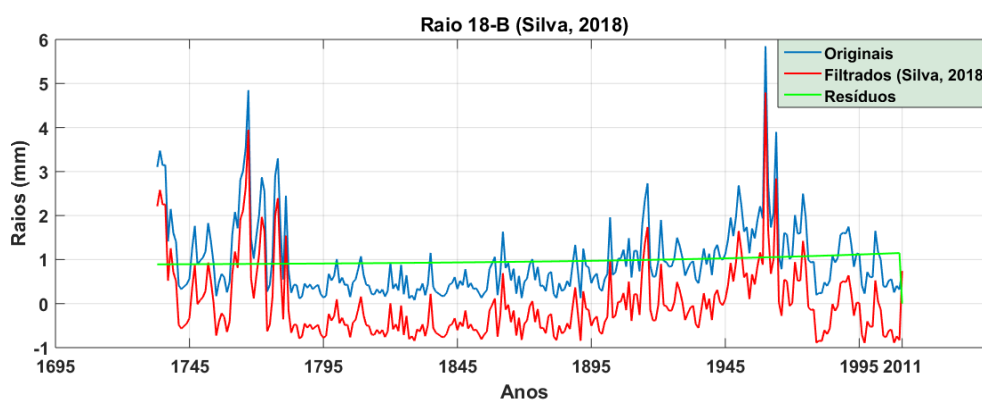
Fonte: A autora.

Figura 61 – Amostra B pertencente à árvore nº18

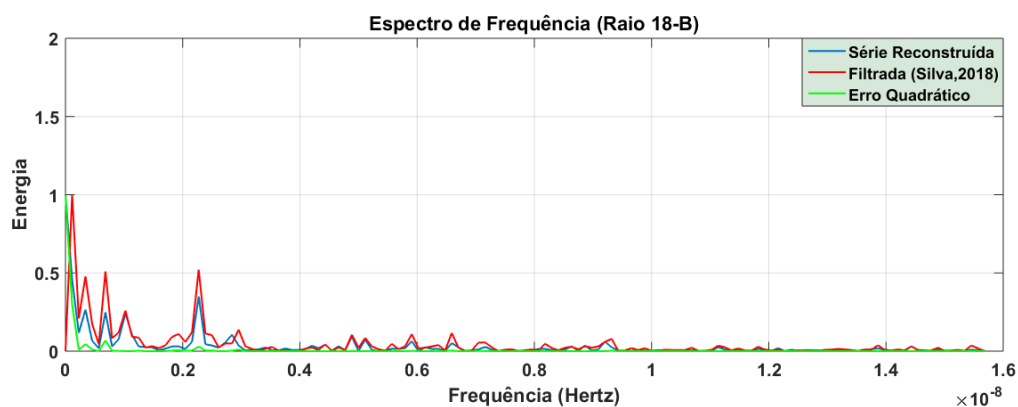
(a) Amostra B - Originais x PCA.



(b) Amostra B - Originais x Filtrados.



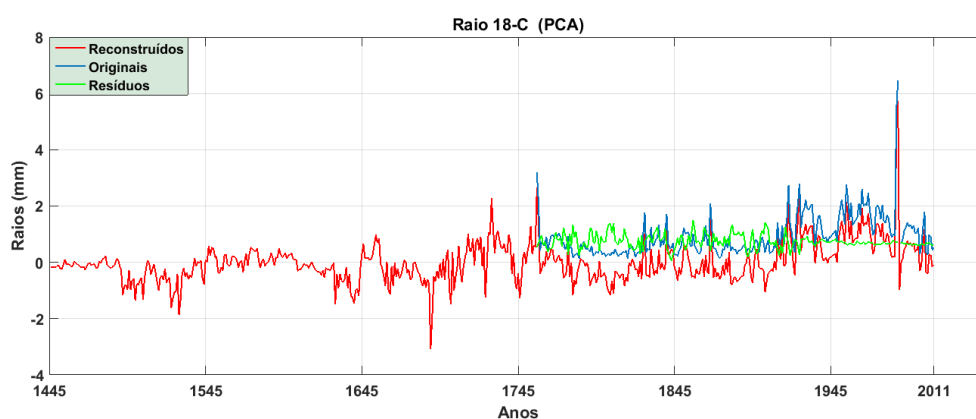
(c) Amostra B - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



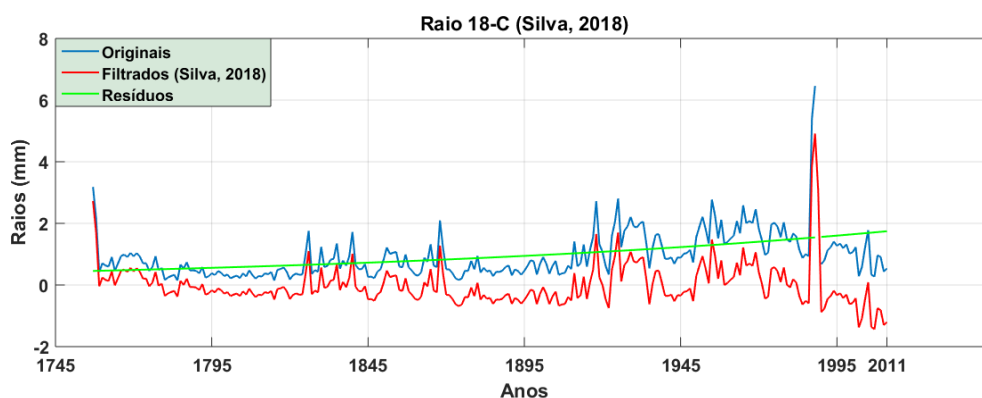
Fonte: A autora.

Figura 62 – Amostra C pertencente à árvore nº18

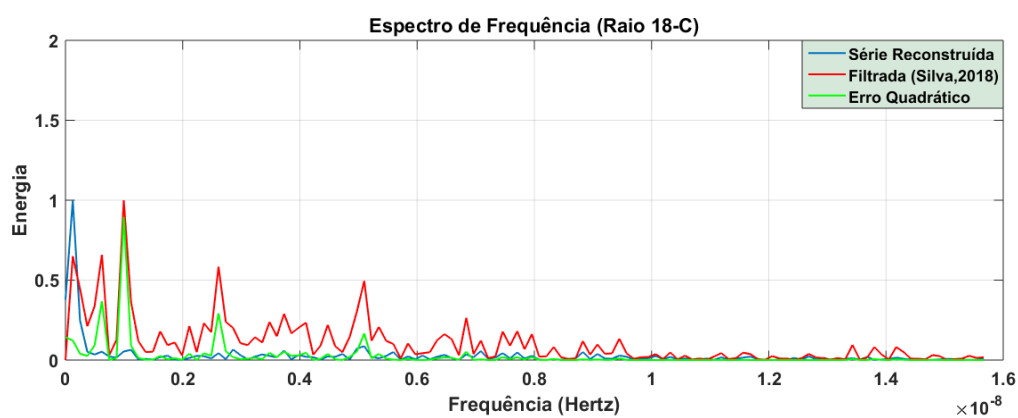
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



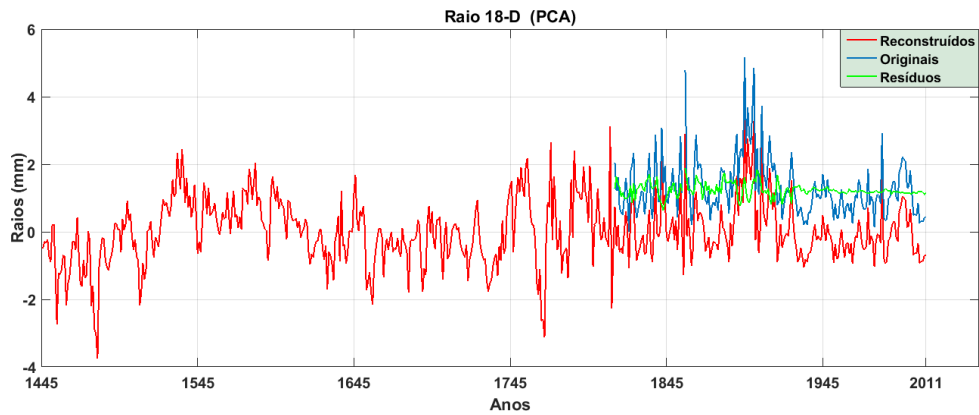
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



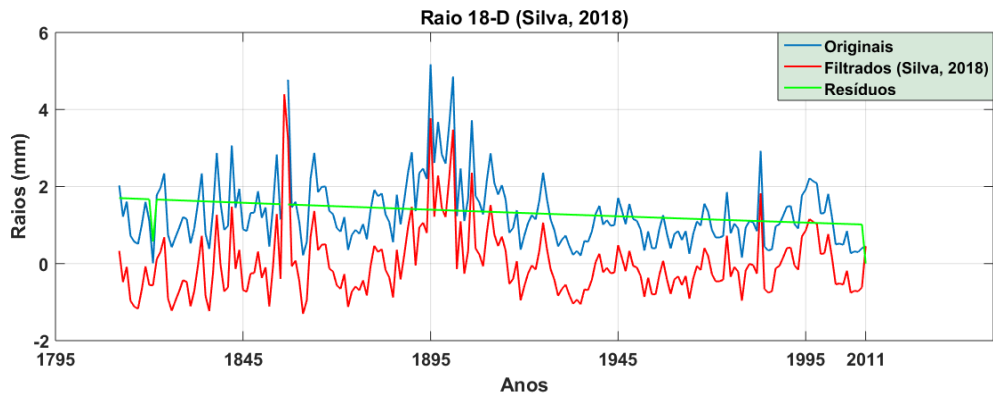
Fonte: A autora.

Figura 63 – Amostra D pertencente à árvore nº18

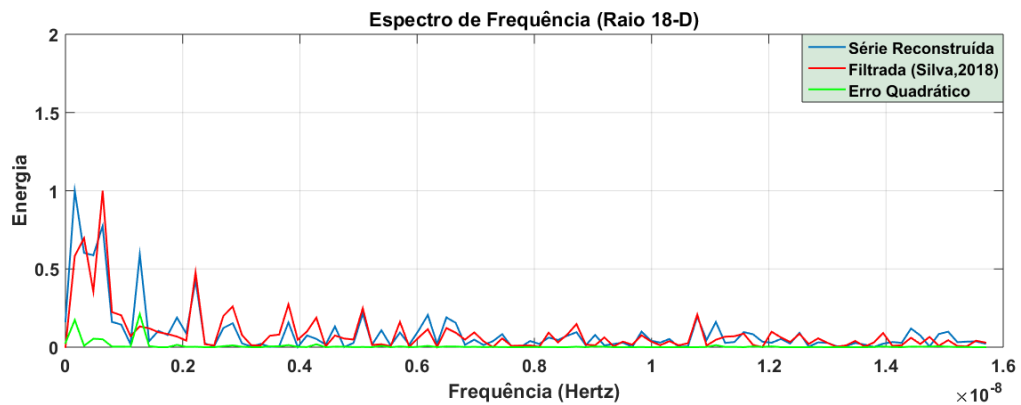
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



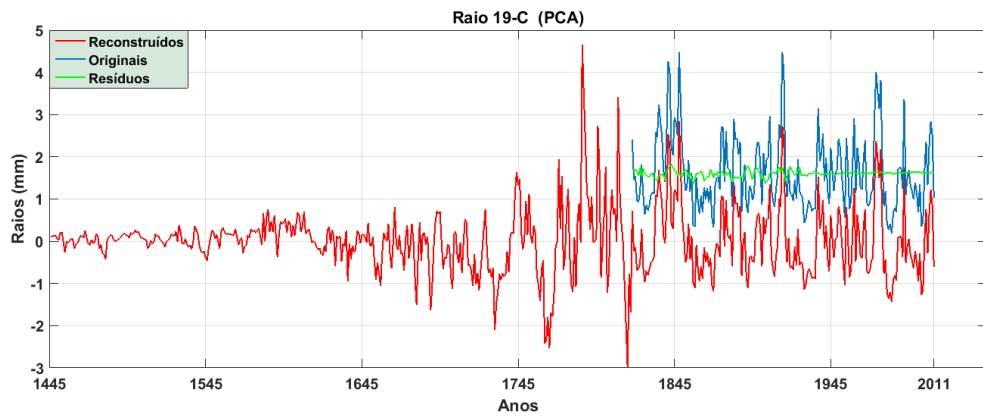
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



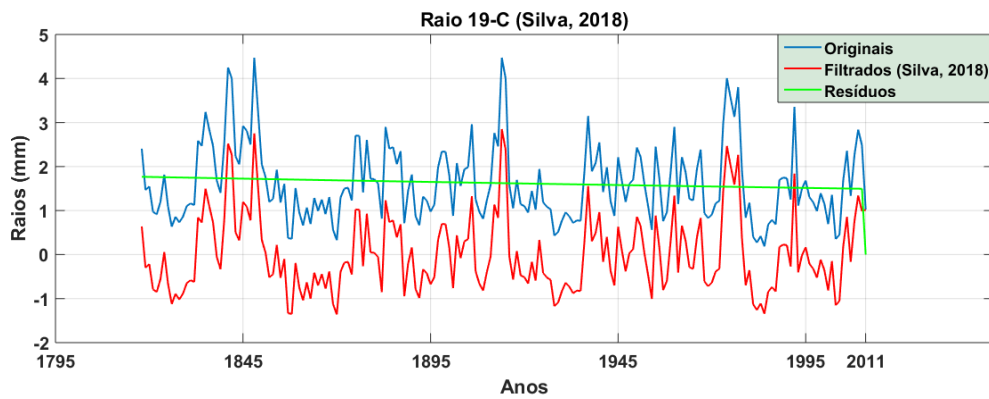
Fonte: A autora.

Figura 64 – Amostra C pertencente à árvore nº19

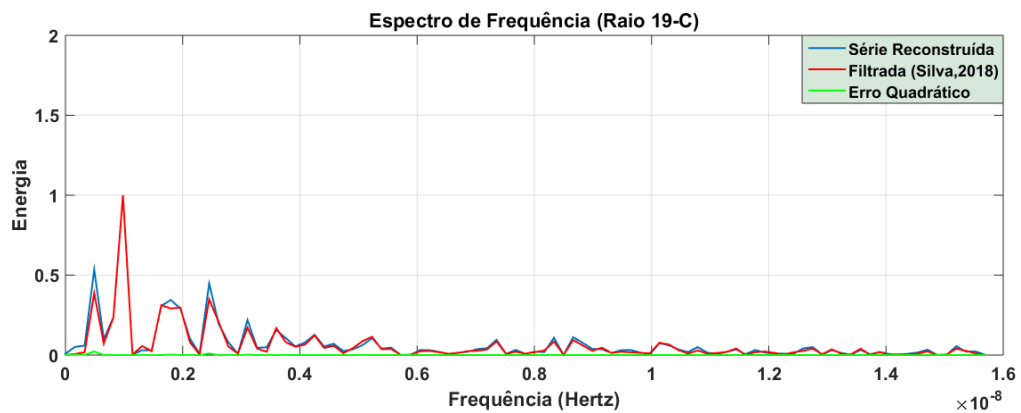
(a) Amostra C - Originais x PCA.



(b) Amostra C - Originais x Filtrados.



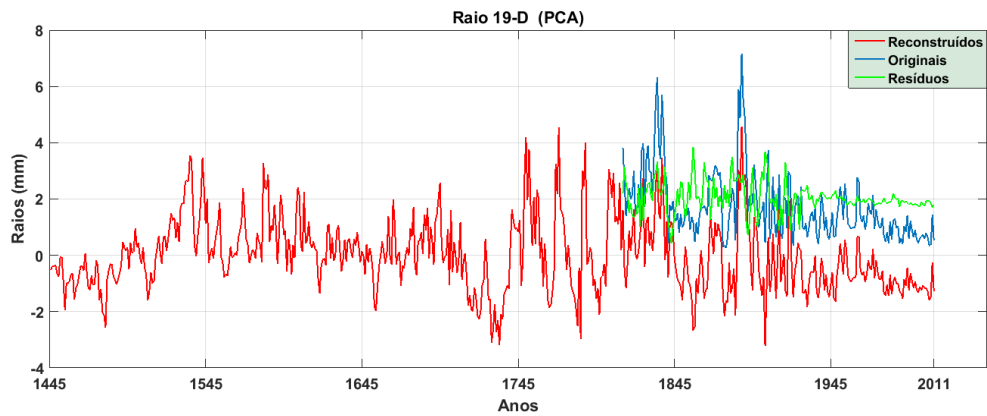
(c) Amostra C - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



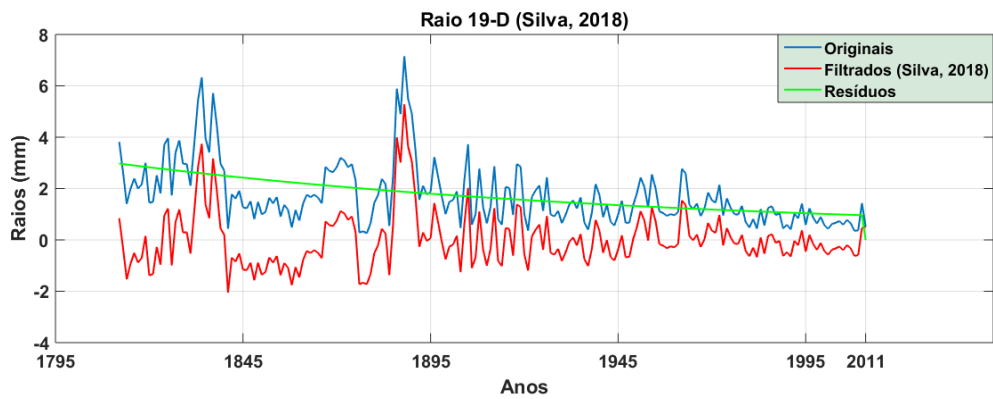
Fonte: A autora.

Figura 65 – Amostra D pertencente à árvore nº19

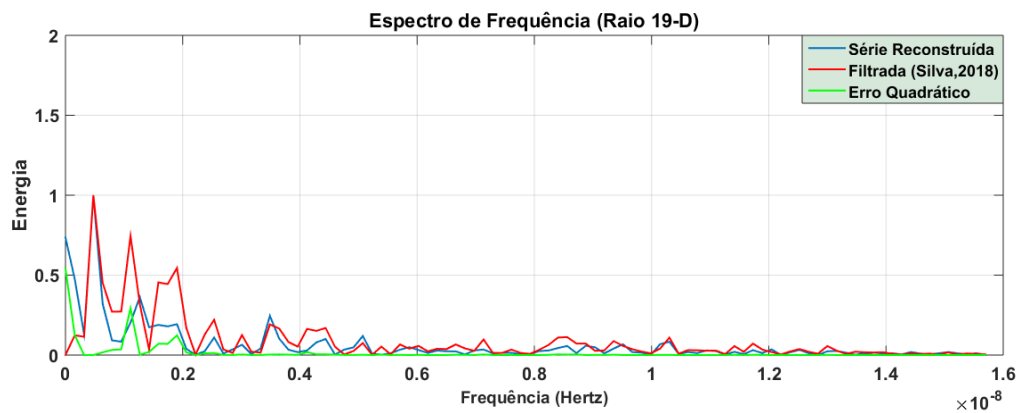
(a) Amostra D - Originais x PCA.



(b) Amostra D - Originais x Filtrados.



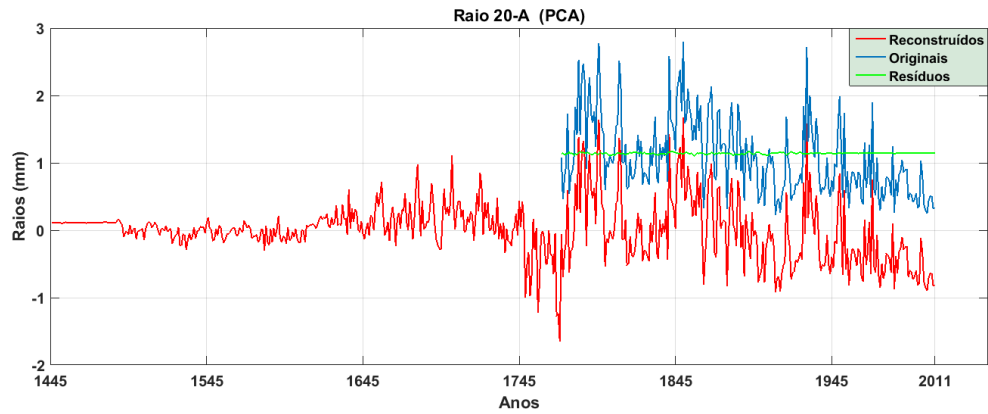
(c) Amostra D - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



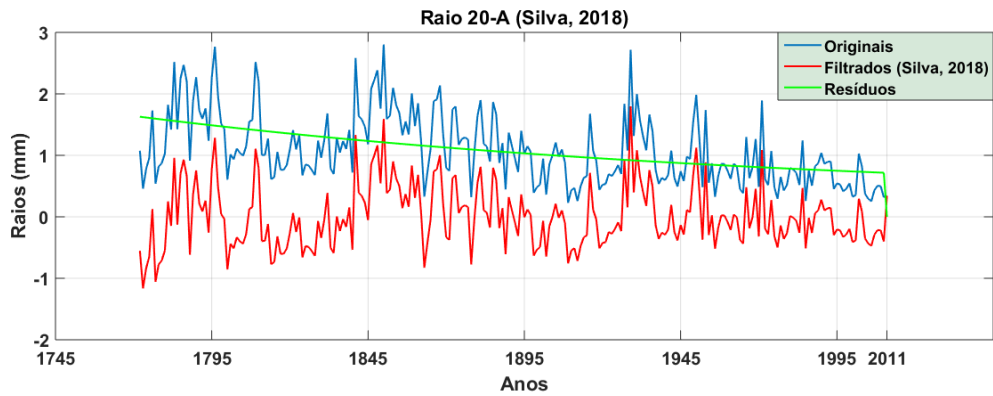
Fonte: A autora.

Figura 66 – Amostra A pertencente à árvore n<sup>o</sup>20

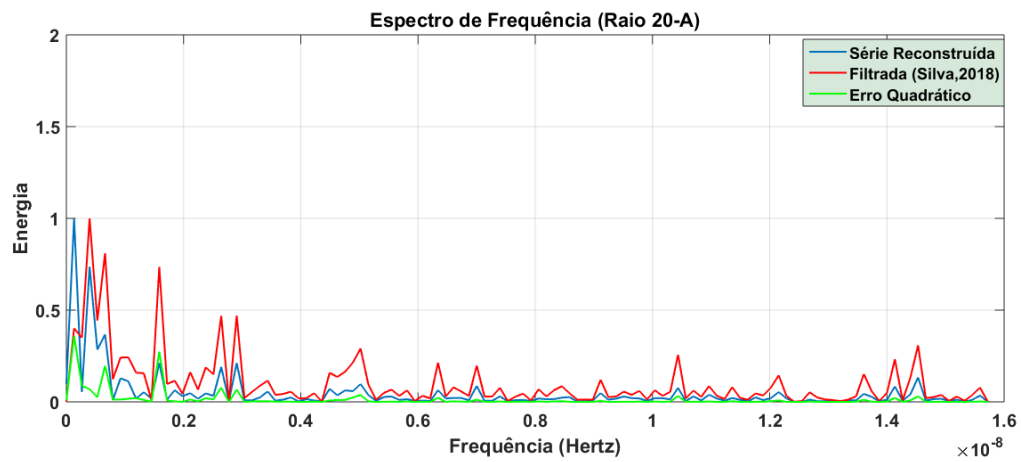
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



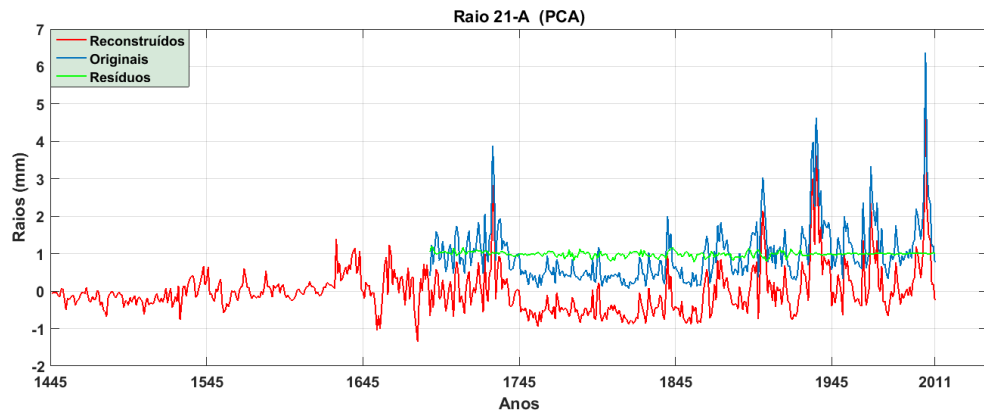
(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



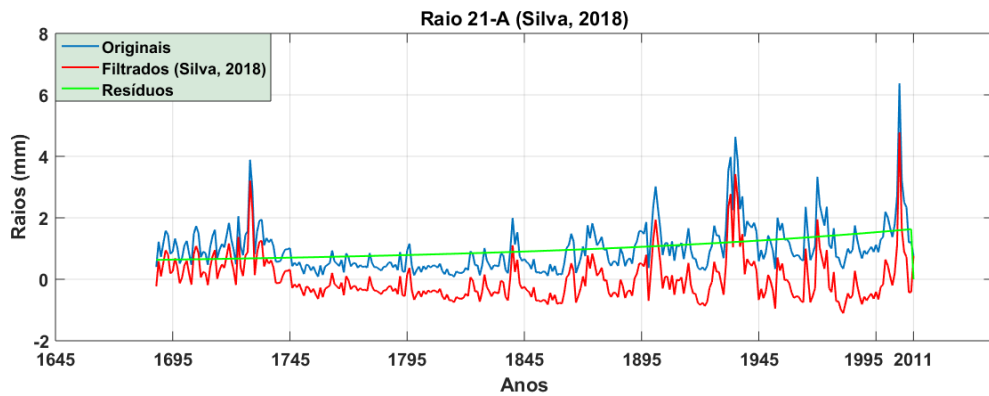
Fonte: A autora.

Figura 67 – Amostra A pertencente à árvore nº21

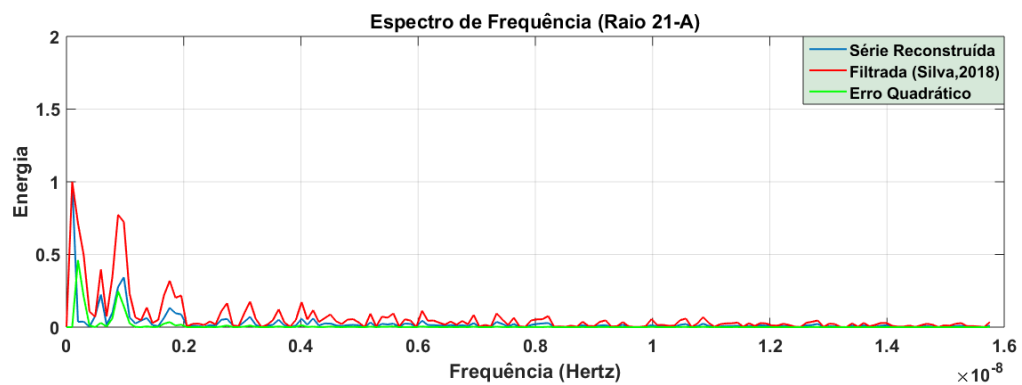
(a) Amostra A - Originais x PCA.



(b) Amostra A - Originais x Filtrados.



(c) Amostra A - Espectro de Frequência - Reconstruídos x Filtrados.



Fonte: A autora.