

**ESDRAS ADRIANO BARBOSA DOS SANTOS**

**ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

**RECIFE-PE – SETEMBRO/2018.**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

## **ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência à obtenção do título de Doutor.

**Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada.**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Tatijana Stosic**

**RECIFE-PE – SETEMBRO/2018.**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE

Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237a Santos, Esdras Adriano Barbosa dos.  
Análise da precipitação na Bacia do Rio São Francisco /  
Esdras Adriano Barbosa dos Santos. – Recife, 2018.  
90 f.: il.

Orientador(a): Tatijana Stosic.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e  
Estatística Aplicada, Recife, BR-PE, 2018.  
Inclui referências e apêndice(s).

1. São Francisco, Rio, Bacia - Precipitação 2. São Francisco,  
Rio, Bacia – Seca 3. SPI 4. Cadeias de Markov I. Stosic, Tatijana,  
orient. II. Título

CDD 574

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

ESDRAS ADRIANO BARBOSA DOS SANTOS

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 24/09/2018 pela comissão examinadora.

Orientadora:

---

**Profª Drª Tatijana Stosic (DEINFO)**

Banca examinadora:

---

**Prof. Dr. Borko Stosic (DEINFO)**  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

**Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho (DEINFO)**  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

**Prof. Dr. Lucian Bogdan Bejan (DEINFO)**  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

**Prof. Dr. Lázaro de Souto Araújo (DCFS/CCA)**  
Universidade Federal da Paraíba

*Dedico esta tese à minha família que me apoiou em tudo,  
acreditando e lutando ao meu lado.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a DEUS por me conceder inteligência para realizar este trabalho.

À minha orientadora Tatijana Stosic por me aceitar como orientando e por confiar em meu trabalho.

À minha esposa Laélia por ser a Grande mulher por traz deste trabalho e de minha vida, sendo minha auxiliadora em tudo. Aos meus filhos pelo carinho e amor.

Aos meus pais que me concederam o exemplo de integridade, força e dedicação.

Ao meu sogro e minha sogra pelo apoio, cuidado e incentivo.

Toda a família de minha esposa pelo amor, auxílio e paciência a mim dispensados.

Aos professores da Biometria não só pelo conhecimento transmitido, mas também pela experiência de vida que me proporcionaram nesta caminhada.

Aos membros da banca Prof. Moacyr Cunha Filho, Prof. Borko Stosic, Prof. Lucian Bogdan Bejan, Prof. Lázaro de Souto Araújo pelo aceite do convite, sugestões e importantes contribuições ao trabalho.

Aos colegas da Biometria pelos momentos agradáveis vividos, pelo apoio, companheirismo e amizade.

A Ikaro que se mostrou um amigo segundo Provérbios 18:24 (“... existe amigo mais apegado que um irmão”).

Abimael pelo apoio, amizade e sustento em oração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, através do DINTER e das bolsas concedidas.

## Resumo

A precipitação é a parte mais importante no ciclo da água e desta forma seu estudo é de fundamental importância, pois permite avaliar a disponibilidade hídrica e a sua distribuição temporal ao longo do período observado. O estudo da precipitação em regiões de bacias hidrográficas auxilia em diversos planejamentos associados ao uso da água disponível nessas bacias, como também promovem a descoberta de possíveis desastres ambientais associados ao excesso de chuva ou a períodos de seca e estiagem. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi estudar períodos de seca e períodos chuvosos em séries históricas de precipitação da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), utilizando várias técnicas como o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), cadeias de Markov, Precipitação Máxima Provável (PMP) e Análise em Janelas Móveis (SWA). As séries correspondem a registros diários de chuva com 46 anos de duração, que vai de 1970 a 2015. Os resultados obtidos com a aplicação do SPI e de cadeias de Markov mostraram que é possível identificar os anos de secas, devido aos baixos valores de precipitação acumulada nas escalas temporais de seis e doze meses, além de calcular o tempo de retorno e o tempo esperado de permanência para diversas condições climáticas, o que possibilitou saber se certa condição ocorrerá em um futuro próximo, dada a condição climática atual da área. Os modelos de probabilidade ajustados e os critérios de bondade de ajuste mostraram que as distribuições escolhidas e o tempo de retorno, em anos, para cada estação foram: GPD para a estação Iguatama com 59 anos de tempo de retorno, BurrXII para Pirapama com 55 anos, GEV para São Romão com 100 anos, GGAM para Colônia do Formoso com 259 anos, GPD para Pilão Arcado com 229 anos, Dagum para Fazenda Tapera e Propriá, com 157 e 63 anos, respectivamente. Com a utilização de janelas móveis, os resultados apresentaram uma tendência de crescimento da PMP para Pilão Arcado e Propriá e decréscimo para Iguatama e Fazenda Tapera. As técnicas utilizadas foram importantes para análise da variável precipitação e permitiram estudar o comportamento de cada estação escolhida, associando com as particularidades climáticas presentes em cada sub-região.

**Palavras-chave:** Bacia do Rio São Francisco, precipitação, seca, SPI, cadeias de Markov, janelas móveis.

## Abstract

Precipitation is the most important part of the water cycle and therefore its study is of fundamental importance, since it allows evaluating the water availability and its temporal distribution over the observed period. The study of precipitation in watersheds assists in various planning associated with the use of available water in these basins, but also promotes the discovery of possible environmental disasters associated with excessive rainfall or periods of drought. In this context, the objective of this work was to study periods of drought and rainy periods in historical series of precipitation of the São Francisco River Basin (BHSF), using several techniques such as the Standardized Precipitation Index (SPI), Markov chains, Maximum Precipitation Probability (PMP) and Sliding Window Analysis (SWA). The series correspond to daily records of rainfall of 46 years duration, which runs from 1970 to 2015. The results obtained with the application of SPI and Markov chains showed that it is possible to identify the years of droughts due to the low values of precipitation accumulated in the time scales of six and twelve months, besides calculating the time of return and the expected time of permanence for diverse climatic conditions, what made possible to know if a certain condition will occur in the near future, given the current climatic condition of the area. The adjusted probability models and the goodness of fit criteria showed that the selected distributions and the return time, in years, for each station were: GPD for the Iguatama station with 59 years of return time, BurrXII for Pirapama with 55 years, GEV to São Romão with 100 years, GGAM to Colônia do Formoso with 259 years, GPD to Pilão Arcado with 229 years, Dagum to Fazenda Tapera and Propriá, with 157 and 63 years, respectively. With the use of sliding windows, the results showed a growth trend from PMP to Pilão Arcado and Propriá and decrease to Iguatama and Fazenda Tapera. The techniques used were important for the analysis of the precipitation variable and allowed to study the behavior of each station chosen, associating with the climatic peculiarities present in each subregion.

**Keywords:** São Francisco River Basin, precipitation, drought, SPI, Markov chains, sliding window analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Atlas do risco de escassez de água no mundo. ....	2
Figura 1.2. Registros de estiagem e seca no Brasil no período de 1991 a 2012. ....	3
Figura 1.3. Divisão hidrográfica do Rio São Francisco. ....	4
Figura 2.1. Precipitação média mensal das estações da BHSF. ....	19
Figura 2.2. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Iguatama. ....	20
Figura 2.3. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Pilão Arcado. ....	21
Figura 2.4. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Fazenda Tapera. ....	22
Figura 2.5. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Propriá. ....	23
Figura 3.1. Valores médios de precipitação para as 7 estações da BHSF. ....	38
Figura 3.2. Ajustes das distribuições para a estação Iguatama. ....	42
Figura 3.3. Ajustes das distribuições para a estação Pirapama. ....	43
Figura 3.4. Ajustes das distribuições para a estação São Romão. ....	44
Figura 3.5. Ajustes das distribuições para a estação Colônia do Formoso. ....	45
Figura 3.6. Ajustes das distribuições para a estação Pilão Arcado. ....	46
Figura 3.7. Ajustes das distribuições para a estação Fazenda Tapera. ....	47
Figura 3.8. Ajustes das distribuições para a estação Propriá. ....	48
Figura 4.1. Valores máximos anuais de precipitação para as 4 estações da BHSF. ....	56
Figura 4.2. Janelas móveis de 30 anos para a PMP para as 4 estações da BHSF. ....	57
Figura 4.3. Tempo de retorno usando a distribuição Dagum para as 4 estações da BHSF. ....	58
Figura 4.4. Tempo de retorno usando a distribuição GEV para as 4 estações da BHSF. ....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Características do clima, precipitação e temperatura para as regiões da BHSF.	5
Tabela 2.1. Dados das estações escolhidas para estudo de seca da BHSF.....	14
Tabela 2.2. Classificação dos valores do SPI. ....	16
Tabela 2.3. Matrizes de transição para o SPI-06 para as estações da BHSF. ....	24
Tabela 2.4. Matrizes de transição para o SPI-12 para as estações da BHSF. ....	25
Tabela 2.5. Distribuição estacionária para o SPI-06 para as estações da BHSF. ....	26
Tabela 2.6. Distribuição estacionária para o SPI-12 para as estações da BHSF. ....	26
Tabela 2.7. Tempo de recorrência para o SPI-06 para as estações da BHSF. ....	27
Tabela 2.8. Tempo de recorrência para o SPI-12 para as estações da BHSF. ....	27
Tabela 2.9. Tempo esperado de permanência para o SPI-06 para as estações da BHSF...	29
Tabela 2.10. Tempo esperado de permanência para o SPI-12 para as estações da BHSF.	29
Tabela 3.1. Dados das estações escolhidas para estudo de precipitação da BHSF. ....	32
Tabela 3.2. Distribuições escolhidas para ajuste de precipitação. ....	35
Tabela 3.3. Estatísticas usadas para a qualidade do ajuste.....	37
Tabela 3.4. Precipitação média anual (mm) das estações escolhidas. ....	37
Tabela 3.5. Valores da PMP e do fator de frequência.....	40
Tabela 3.6. Medidas de qualidade de ajuste para as estações da BHSF.....	49
Tabela 4.1. Dados das estações escolhidas para estudo de seca da BHSF.....	54
Tabela A.1. Estatísticas da precipitação para a estação Iguatama da BHSF. ....	76
Tabela A.2. Estatísticas da precipitação para a estação Pirapama da BHSF.....	76
Tabela A.3. Estatísticas da precipitação para a estação São Romão da BHSF. ....	77
Tabela A.4. Estatísticas da precipitação para a estação Colônia do Formoso da BHSF.....	77
Tabela A.5. Estatísticas da precipitação para a estação Pilão Arcado da BHSF.....	78
Tabela A.6. Estatísticas da precipitação para a estação Fazenda Tapera da BHSF.....	78
Tabela A.7. Estatísticas da precipitação para a estação Propriá da BHSF. ....	79

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>II</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. APLICAÇÃO DE CADEIAS DE MARKOV NO ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO PADRONIZADO PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.....</b>	<b>13</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	13
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
2.2.1 Área de Estudo .....	14
2.2.2 Índice de Precipitação Padronizado .....	14
2.2.3 Cadeias de Markov .....	17
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
2.4. CONCLUSÕES .....	30
<b>3. PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO .....</b>	<b>31</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	31
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.2.1 Área de Estudo .....	32
3.2.2 Método de Interpolação.....	32
3.2.3 Estimação da Precipitação Máxima Provável .....	33
3.2.4 Cálculo do Tempo de Retorno .....	34
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
3.4. CONCLUSÕES .....	52
<b>4. EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO .....</b>	<b>53</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	53
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	54
4.2.1 Área de Estudo .....	54

4.2.2	Janelas Móveis.....	54
4.2.3	Cálculo da PMP e Tempo de Retorno .....	56
4.3.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.4.	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
5.1.	Estudo de seca usando o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Cadeias de Markov .....	62
5.2.	Estudo da precipitação máxima provável e tempo de retorno usando diversas distribuições de probabilidade .....	63
5.3.	Estudo da precipitação máxima provável com janelas móveis de 30 anos.....	63
5.4.	Trabalhos futuros.....	64
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

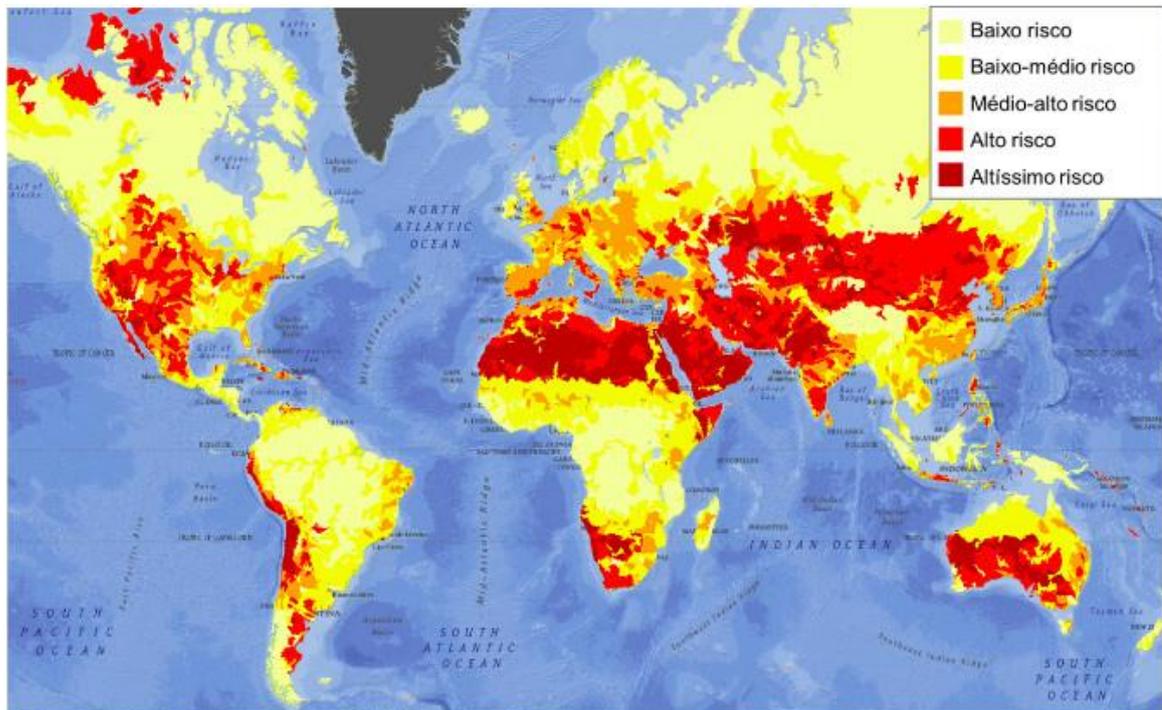
A água é um recurso natural abundante, ocupa cerca de 70% da superfície do nosso planeta. Porém, sabe-se que 97% desta água é salgada e, portanto, imprópria para o consumo, e menos de 3% da água do planeta é doce, das quais 2,5% está presa em geleiras. Dos 0,5% da água restante no mundo, a maior parte está presa em áreas subterrâneas, dificultando o acesso do homem e apenas 0,04% da água disponível está na superfície, em rios, lagos, mangues, etc. (WWAP, 2017).

A água doce é um dos principais recursos naturais para a vida do homem no planeta, mas além de ser um recurso limitado, sua disponibilidade é distribuída de maneira desigual pelo mundo. Sabe-se que 60% da água doce disponível está concentrada em poucos países tais como: Brasil, Rússia, Canadá, Estados Unidos, China, Colômbia, Indonésia, Peru, Índia, Myanmar, Congo, etc. Como existem diferenças na densidade populacional nas regiões do mundo, são encontradas grandes variações de disponibilidade de água per capita. Para a água disponível na superfície, os recursos hídricos são a principal fonte de água para a sociedade (WWAP, 2017).

O Brasil dispõe de uma maior quantidade de água doce do que qualquer outro país no mundo, no entanto, mesmo aqui já é possível sentir o efeito da escassez de água e historicamente já foram registradas várias secas que assolaram o Nordeste, e, mais recentemente, em 2016 houve uma forte crise hídrica, resultando num grande racionamento na cidade de São Paulo (ANA, 2017).

A Figura 1.1 apresenta o panorama do risco de escassez de água no mundo, apresentado pelo *World Resources Institute*, mostrando que mesmo em países com recursos hídricos abundantes o risco de escassez existe, seja por efeitos climáticos seja por dificuldades logísticas para o fornecimento de água (WRI, 2018).

Figura 1.1. Atlas do risco de escassez de água no mundo.



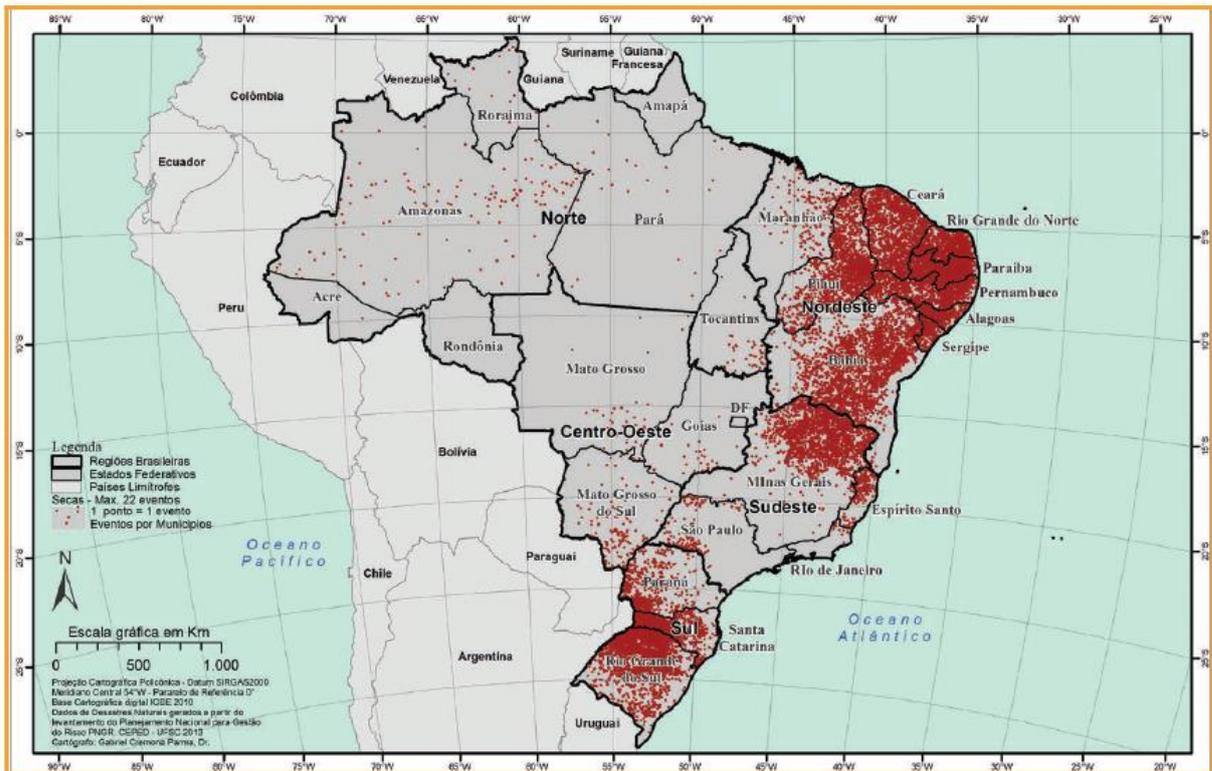
Fonte: World Resources Institute, Projeto Aqueduct, 2014.  
[www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas](http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas)

A seca e a estiagem são fenômenos caracterizados pela ausência, escassez, frequência reduzida, quantidade limitada e má distribuição das precipitações pluviométricas durante as estações chuvosas. A seca é considerada um desastre natural, sendo um fenômeno que afeta nas áreas econômicas, sociais, técnicas e políticas. O fato de serem imprevisíveis o início, o fim e a severidade da seca, isso a define como um fenômeno aleatório (MISHRA & SINGH, 2010).

No Brasil, a seca prejudica a vida da população nordestina, mas também está presente na região sudeste, em Minas Gerais. No mapa da Figura 1.2 é possível visualizar a localização dos registros de estiagem e seca no Brasil para o período de 1991 a 2012.

As secas não ocorrem de maneira uniforme na Região Semiárida do Nordeste brasileiro, tanto pode ter anos de seca total, com efeitos observados em todas as áreas da região, quanto pode ter anos de seca parcial, em que os problemas relacionados à seca são verificados apenas em algumas áreas dos estados do Nordeste (UFSC, 2013).

Figura 1.2. Registros de estiagem e seca no Brasil no período de 1991 a 2012.



Fonte: Atlas Brasileiro de Desastres Naturais de 1991 a 2012, CEPED UFSC, 2013.

Pode-se observar no Atlas, que mais de 50% dos registros estão concentrados na região Nordeste do Brasil. Já em segundo lugar, encontra-se a região Sudeste com 26,91% dos registros. A região Nordeste, sendo a região mais seca do país pela própria natureza, demanda atenção especial em relação à oferta de água, em particular o Nordeste Setentrional (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco), que tem 87,8 % do seu território no Semiárido. Devido aos baixos índices de precipitação de chuva, a irregularidade do regime de chuvas, temperaturas elevadas durante o ano inteiro, forte insolação e altas taxas de evaporação, além de algumas características hidrogeológicas, a disponibilidade hídrica tem apresentado valores bem reduzidos (UFSC, 2013).

A Bacia do Rio São Francisco (BHSF) abrange cerca de 70% da oferta de água do Nordeste, uma região que possui 28% da população brasileira, e que historicamente foi submetida a vários ciclos de seca rigorosa. A BHSF está completamente contida no Brasil, sendo a maior bacia do país nestas condições. O “Velho Chico”, como carinhosamente o rio também é chamado, banha os Estados de

Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Sua Bacia hidrográfica também envolve parte do Estado de Goiás e o Distrito Federal (BRASIL, 2018).

A BHSF tem grande importância para o país, tanto pela quantidade de água considerável que atravessa a região semiárida, como pelo potencial hídrico que pode ser aproveitado, promovendo uma contribuição econômica para a região. O rio São Francisco abrange cerca de 634.000 km<sup>2</sup> com aproximadamente 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. A Bacia está distribuída sobre sete unidades da federação: Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e Distrito Federal (0,2%) e 504 municípios (cerca de 9% do total de municípios do país). Cerca de 16 milhões de pessoas (IBGE, 2012) habitam a área da Bacia do São Francisco (BRASIL, 2018).

A região hidrográfica do São Francisco está dividida em quatro regiões fisiográficas (Figura 1.3).

Figura 1.3. Divisão hidrográfica do Rio São Francisco.



Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2017).

O alto São Francisco, que vai da nascente até a cidade de Pirapora (MG), tem 100.076 km<sup>2</sup>, ou 16% da área da Bacia, e 702 km de extensão. A população tem cerca de 6,3 milhões de habitantes. O médio São Francisco compreende de Pirapora (MG) até Remanso (BA) com 402.531 km<sup>2</sup> ou 53% da área da Bacia, 1.230 km de extensão e a população tem cerca de 3,2 milhões de habitantes. O sub-médio São Francisco, que vai de Remanso (BA) até Paulo Afonso (BA) tem 110.446 km<sup>2</sup> ou 17% da área da Bacia, 440 km de extensão e população de aproximadamente 1,9 milhões de habitantes. O baixo São Francisco, indo de Paulo Afonso (BA) até a foz, entre Sergipe e Alagoas, possui 25.523 km<sup>2</sup>, ou 4% da área da Bacia, com 214 km de extensão e a população tem cerca de 1,4 milhões de habitantes (BRASIL, 2018). As características sobre o clima, a temperatura e a precipitação em cada região da BHSF estão apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Características do clima, precipitação e temperatura para as regiões da BHSF.

<b>Características</b>	<b>Alto São Francisco</b>	<b>Médio São Francisco</b>	<b>Sub-médio São Francisco</b>	<b>Baixo São Francisco</b>
Clima predominante	Tropical úmido e temperado de altitude	Tropical semiárido e sub-úmido seco	Semiárido e árido	Sub-úmido
Temperatura média (°C)	23	24	27	25
Precipitação média anual (mm)	1100 a 2000	600 a 1400	350 a 800	350 a 1500

Fonte: Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco (MMA, 2006).

A precipitação média anual da Bacia é maior na nascente, vai diminuindo no sentido da foz, até as proximidades do limite entre o sub-médio e o baixo São Francisco, voltando a crescer até a foz devido à proximidade com o litoral (PEREIRA et al., 2007). A pluviometria média vai de 1.900 mm na área da Serra da Canastra a 350 mm no Semiárido Nordeste. No que lhe diz respeito, os índices relativos à evaporação mudam inversamente e crescem de acordo com a distância das nascentes: vão de 500 mm anuais, na cabeceira, a 2.200 mm anuais em Petrolina-PE (BRASIL, 2018). O clima da região da bacia é bem diferenciado em relação aos quatro trechos. O alto e o médio São Francisco possuem um clima tropical úmido, o sub-médio um clima semiárido e o baixo possui um clima quente e úmido (MMA, 2006).

Recentemente as mudanças climáticas estão protagonizando eventos extremos ao redor do mundo. Na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, também conhecida como UNFCCC (do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*) foi submetido um relatório intitulado *The Global Climate in 2011–2015* onde a Organização Meteorológica Mundial realizou a análise detalhada do clima global no período de 2011-2015. Segundo o relatório este foi o período de 5 anos mais quente já registrado na história, proporcionando condições meteorológicas extremas e eventos climáticos com grandes impactos ambientais e desastres naturais como a seca e as enchentes (WOW, 2016). Nesse mesmo âmbito, o Rio São Francisco tem passado por uma crise hídrica com um período de estiagem severa, afetando as atividades humanas e industriais dependentes dos seus recursos.

O regime hidrológico ou a produção de água de uma bacia é determinado por fatores de natureza climática tais como: precipitação, evaporação, temperatura, umidade do ar, vento, etc.; assim como por fatores físicos, geológicos e topográficos. Além disso, a temperatura, a umidade e o vento são também importantes por influenciarem na precipitação e evaporação (TUCCI, 2004).

A precipitação ocorre a partir da existência do vapor d'água da atmosfera que é depositada na superfície terrestre sob forma de chuvisco, chuva, granizo, orvalho, geada ou neve (BRUTSAERT, 2005). No Brasil, a precipitação ocorre principalmente devido à chuva, por ser incomum a ocorrência de neve e granizo no país, e também pelo fato de que as demais formas não contribuem significativamente para o regime hidrológico de uma região. A precipitação é a parte mais importante no ciclo da água e desta forma seu estudo é de fundamental importância (SU et al., 2014).

Com o intuito de caracterizar uma bacia hidrográfica, a compreensão da dinâmica dos elementos climáticos, em especial o da precipitação pluviométrica merece destaque, pois, o conhecimento de sua irregularidade no tempo é fundamental para a preservação, planejamento e gestão dos recursos hídricos. De posse de dados pluviométricos é possível realizar a caracterização da precipitação, determinando os valores mínimos, médios e máximos de precipitação anualmente e mensalmente. O objetivo principal da caracterização é avaliar a disponibilidade hídrica representada pela precipitação e a sua distribuição temporal ao longo do período observado (SANTOS et al., 2001; TUCCI, 2004). As precipitações máximas podem ser descritas

pontualmente pelas curvas de intensidade-duração-frequência (i-d-f), como podem ser avaliadas pelo método da Precipitação Máxima Provável (PMP).

A Precipitação Máxima Provável (PMP) pode ser definida como a maior precipitação que é meteorologicamente possível em um determinado local, durante um determinado período de tempo (WMO, 2009). Esse método é usado amplamente na hidrologia. O artigo de Zischg e colaboradores (2018) analisa os efeitos da variabilidade da PMP sobre perdas por enchentes em uma bacia hidrográfica usando cenários simulados através do método Monte Carlo. Micovic et al. (2015) apresentaram uma metodologia para retratar a natureza incerta da estimativa da PMP. Douglas & Barros (2003) usaram uma abordagem multifractal na estimativa da PMP para inferir a magnitude dos eventos extremos e estimar os riscos, independentemente de ajustes empíricos. Outros trabalhos empregaram análise multifractal no estudo de bacias hidrográficas objetivando descrever e modelar a distribuição das principais variáveis hidrológicas (PANDEYA et al., 1998; KANTELHARDT et al. 2003; 2006; LIMA & LIMA, 2009).

Para determinar a PMP, os métodos utilizados podem ser classificados basicamente em métodos hidrometeorológicos e métodos estatísticos. Os métodos hidrometeorológicos são baseados na maximização de fortes tempestades, enquanto para os métodos estatísticos as abordagens mais usadas analisam a frequência das precipitações por meio de distribuições (BURGER, 2014). A análise de frequência permite determinar a chuva que corresponde a um período de retorno pré-estabelecido, como também verificar a probabilidade da PMP estimada ser superada (TUCCI, 2004). O conceito de período de recorrência ou Tempo de Retorno (TR) é muito utilizado em relação à precipitação. Pode ser interpretado como o número médio de anos, durante o qual se espera que determinada precipitação seja igualada, ou superada pelo menos uma vez (PINTO et al., 1976).

Os métodos estatísticos são úteis para uma estimativa mais rápida da PMP, permitindo verificar com que frequência as precipitações ocorreram com uma dada magnitude (SOCCOL et al., 2010), estimando as probabilidades teóricas de ocorrência das mesmas (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Também são muito utilizados em casos onde a região em estudo apresenta poucos dados meteorológicos. É importante determinar a distribuição da precipitação ao longo do ano, procurando estabelecer períodos de baixa pluviosidade (estiagens) e períodos de alta pluviosidade (enchentes). Com a existência de séries históricas de longo período e de várias

estações com dados confiáveis, é possível estimar a probabilidade do excesso de chuvas máximas de diferentes durações para pontos distintos da região, bem como para uma área da bacia hidrográfica (RAMOS et al., 1989).

Para estimar a PMP, a *World Meteorological Organization* (WMO, 2009) recomenda o método de Hershfield (1961), baseado na análise de frequência dos dados pluviométricos máximos anuais registrados no local de interesse. O procedimento de Hershfield é baseado na equação geral da frequência apresentada por Chow (1964):

$$X_{TR} = \bar{X}_n + K_{TR} \cdot \sigma_n, \quad (1.1)$$

em que:  $X_{TR}$  corresponde à chuva para um tempo de retorno TR,  $\bar{X}_n$  e  $\sigma_n$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série de  $n$  máximas anuais.  $K_{TR}$  é o fator de frequência. Hershfield avaliou que para a estimativa da PMP existe um valor de  $K_{TR}$  da Eq. (1) que não será excedido, e usou a equação de frequência da seguinte forma:

$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m \cdot \sigma_n, \quad (1.2)$$

$$K_m = \frac{X_{max} - \bar{X}_{n-1}}{\sigma_{n-1}}, \quad (1.3)$$

em que:  $X_{PMP}$  corresponde à PMP para uma determinada duração e local,  $\bar{X}_n$  e  $\sigma_n$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série de  $n$  valores de chuvas máximas anuais para uma determinada duração; e  $K_m$  é o fator de frequência.

Os passos necessários para a estimativa da PMP pelo método de Hershfield estão descritos abaixo:

- i) Construir uma amostra de valores máximos anuais;
- ii) Calcular a média  $\bar{X}_n$  e o desvio padrão  $\sigma_n$  considerando toda a amostra;
- iii) Calcular a média  $\bar{X}_{n-1}$  e o desvio padrão  $\sigma_{n-1}$  excluindo da série o valor máximo observado ( $X_{max}$ );
- iv) Obter o fator de frequência  $K_m$  para a duração desejada pela Eq.(1.3);
- v) Calcular a PMP substituindo o valor de  $K_m$  na Eq. (1.2).

Como o valor da PMP, por definição, é um valor extremo de precipitação, a avaliação da incerteza associada a este valor pode ser feita através do uso da Teoria do Valor Extremo (TVE). A TVE teve sua origem com o trabalho de Nicolaus Bernoulli, o qual considerou um problema atuarial a respeito do tempo de vida de um indivíduo. Mas foi Bortkiewicz, em 1922, o primeiro a estudar efetivamente esta teoria (GUMBEL, 2012). A TVE lida com o comportamento dos máximos e mínimos de uma amostra de variáveis aleatórias e as propriedades destes extremos, das estatísticas de ordem intermediárias e dos limites determinados (abaixo ou acima) são determinadas pelas caudas superior e inferior da distribuição implícita. Gumbel (1941) foi o primeiro a propor aplicações usando distribuições de extremos para estimar períodos de retorno dos dados de vazão máxima anual dos rios Rhône na França e Mississipi nos EUA.

Esta teoria é amplamente aplicada em fenômenos naturais como chuva, rajadas de vento, inundações, etc. A TVE foi usada em fenômenos envolvendo o aquecimento global (THIBERT et al., 2018), na estimação do risco de eventos extremos do clima usando inferência Bayesiana (CHENG et al., 2014), e na estimativa da evapotranspiração potencial em relação à mudança climática para regiões com clima árido, semiárido, mediterrâneo e muito úmido. Também foi utilizada em aplicações que avaliam impactos sobre o valor do índice de Palmer de gravidade de seca (*Palmer Drought Severity Index-PDSI*) na Califórnia (ROBESON, 2015). Mais recentemente, a TVE foi utilizada por estatísticos tradicionais (DAVISON, 1984; KOTZ & NADARAJAH, 2000; KOTZ et al., 2000).

Várias ações e grandes esforços foram realizados no intuito de desenvolver índices de seca, que tanto pode auxiliar na detecção de longos períodos de estiagem, quanto tornar possível classificar a intensidade dessa seca. Existem diversos índices meteorológicos para caracterização e monitoramento de período secos e chuvosos, tais como: SPI (*Standardized Precipitation Index*), PDSI (*Palmer Drought Severity Index*), CMI (*Crop Moisture Index*), KBDI (*Keetch-BYRAM Drought Index*), ADI (*Aggregate Drought Index*), Métodos dos Quantis, etc. (SOUSA et al., 2016).

O Índice de Precipitação Padronizado (em inglês, *Standardized Precipitation Index – SPI*) foi proposto e desenvolvido por Mckee et al. (1993) como uma ferramenta versátil no monitoramento e análise dos períodos de seca. O SPI é usado para estimar a condição de seca com base na variável precipitação, sendo necessários o valor da média e do desvio padrão dos dados de precipitação. Para obtenção do índice, os valores mensais de precipitação para cada estação meteorológica são calculados

para a escala de tempo pretendida que pode ser de 1, 3, 6, 12 e 24 meses. Usando a série de precipitação pluviométrica, deve-se calcular os valores de precipitações mensais acumulados para cada mês e ajustar uma distribuição de probabilidade.

Para calcular o Tempo de Retorno (TR), Koutsoyiannis (1999) usou a distribuição do Valor Extremo Generalizado (GEV) para estimar o TR dos valores de PMP derivados pelo método de Hershfield. Shiau (2003) utilizou a distribuição bivariada de valores extremos para obter o período de retorno para dados diários de chuva no sul de Taiwan.

Existem diversas distribuições de probabilidade que modelam variáveis hidrológicas tais como: Gumbel, Fréchet, Weibull, Log-Normal, Log-Pearson III, Wakeby e Pareto Generalizada. Os modelos Gumbel, Fréchet e Weibull se originaram da teoria clássica de valores extremos, desenvolvida entre as décadas de 1920 e 1950 (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Vários autores utilizaram a distribuição Gumbel em estudos de precipitações máximas, tanto para determinar a PMP como o TR de chuvas máximas, ou também para estudar as curvas intensidade-duração-frequência (BELTRAME et al., 1991; ELTZ et al., 1992; LEOPOLDO et al., 1984; NOBUKUNI, 2000; VIEIRA et al., 1994; PINTO, 1999; BEIJO et al., 2003; FERREIRA et al., 2005; MELLO & SILVA, 2005).

Sansigolo (2008) comparou o ajustamento de diversas distribuições de probabilidade como Normal, Gumbel, Fréchet, Weibull, Log-Normal e Pearson, aos dados de precipitação máxima diária e de temperaturas máximas absolutas, coletados na cidade de Piracicaba (SP) para o período de 1917 a 2006. A Distribuição Generalizada de Pareto (DGP) também foi usada por diversos autores em estudos de precipitação (SUGAHARA et al., 2010; BRAGA, 2015; CORREIA, 2013; SANTOS FILHO, 2013). Mayoaran & Laheetharan (2014) utilizaram 45 distribuições para investigar o melhor ajuste da precipitação máxima anual no distrito de Colombo. Dentre as distribuições ajustadas, destacam-se: Burr, Dagum, Generalizada de Valores Extremos (GEV), Gama Generalizada, Gaussiana Inversa, etc.

Além das distribuições de probabilidade para análise de períodos secos e chuvosos, também são utilizadas as Cadeias de Markov para identificar a probabilidade de ocorrência desses períodos, bem como prever a intensidade de cada fase (STERN et al., 1982; AZEVEDO & LEITÃO, 1990; KELLER FILHO et al., 2006; PAULO & PEREIRA, 2007; LENNARTSSON et al., 2008; SANUSI et al., 2015).

Para avaliar a precipitação ao longo do tempo a técnica de janelas móveis tem se mostrado eficiente utilizando blocos ao longo de séries temporais suficientemente grandes. O método foi usado em análise de sequência de DNA (TAJIMA, 1991), em bioinformática para estudar as propriedades de sequências moleculares (PROUTSKI & HOLMES, 1998), e mais recentemente, em dados de hidrologia aplicada em escoamento (TONG et al., 2005), precipitação (BARKHORDARIAN et al., 2013) e vazão (LIU et al., 2016).

Neste trabalho, foram utilizados os dados de precipitação de 421 estações da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) disponibilizados pela Agência Nacional de Águas através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018). As séries históricas correspondem a valores diários de precipitação de chuva para o período de janeiro de 1970 a dezembro de 2015, totalizando 46 anos.

Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória dos dados, de forma que alguns valores discrepantes foram eliminados. Essa eliminação com o intuito de controle de dados é importante, pois algumas medições foram feitas manualmente, além de existirem erros grosseiros de medida. Existem também ausência de observações gerando descontinuidade de registros na série de dados pluviométricos, assim, com o intuito de preencher essas falhas, foi utilizado um método de interpolação para os dados de precipitação referentes às estações pluviométricas.

O método de interpolação escolhido para o preenchimento das falhas foi usando a Ponderação pelo Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighting-IDW*), inicialmente proposto por Shepard (1968), e esse método presume que, quanto mais distante uma estação com determinado valor de precipitação observado estiver da estação cujo valor de chuva vai ser estimado, menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor interpolado. Dessa forma, o método IDW assume que cada ponto amostral possui influência sobre o ponto interpolado e que essa influência diminui com o aumento da distância (LUO et al., 2008). A expressão usual é dada por:

$$F(x_i, y_i) = \sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) F(x_k, y_k), \quad (1.4)$$

em que:  $F(x_i, y_i)$  é o valor interpolado para a  $i$ -ésima estação,  $N$  é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado,  $F(x_k, y_k)$  é o valor observado no ponto

$k$  e  $W(x_k, y_k)$  são os pesos atribuídos a cada uma das localidades. A expressão para determinar a função peso é a seguinte:

$$W(x_k, y_k) = \frac{d_k(x_i, y_i)^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(x_i, y_i)^{-p}} = \frac{(\sqrt{x_i - x_k^2 + (y_i - y_k)^2})^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(x_i, y_i)^{-p}}, \quad (1.5)$$

onde:  $d_k(x_i, y_i)$  é a distância entre a  $i$ -ésima estação que no momento está tendo seu valor interpolado e a  $k$ -ésima estação próxima, de forma que a distância está sendo calculada com base na latitude  $x$  e na longitude  $y$  no sistema de coordenadas esféricas. E, assim, como trata-se de uma ponderação, tem-se a seguinte restrição:

$$\sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) = 1 \quad (1.6)$$

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é estudar as séries históricas de Precipitação para estações da bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF), contendo dados diários de chuva com 46 anos de duração, com as finalidades de:

- i) Aplicar o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Cadeias de Markov para estudar e classificar períodos de estiagem para as escalas temporais de seis e doze meses em 4 estações localizadas nas diferentes regiões da BHSF (Capítulo 2).
- ii) Calcular as Precipitações Máximas Prováveis (PMP) e ajustar algumas distribuições de probabilidade aos dados das séries históricas de precipitação para calcular o Tempo de Retorno (TR) para algumas estações escolhidas das diferentes regiões da BHSF (Capítulo 3).
- iii) Aplicar a técnica de Janelas Móveis para estudar a precipitação em blocos de 30 anos das séries históricas de 4 estações localizadas nas sub-regiões da BHSF (Capítulo 4).

## **2. Aplicação de Cadeias de Markov no Índice de Precipitação Padronizado para Bacia do Rio São Francisco.**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

A água é um mineral presente em toda a natureza, considerada como um recurso natural renovável, pois está constantemente repondo-se na natureza pelos processos físicos do ciclo hidrológico. Entretanto, devido ao seu grande potencial de uso, com demandas para diferentes formas de uso, a água tem sua disponibilidade cada vez mais escassa. Essa escassez de água tem sido a realidade da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (ANA, 2017).

Devido aos baixos índices de precipitação, a irregularidade do seu regime, temperaturas elevadas durante o ano inteiro, forte insolação e altas taxas de evaporação, além de algumas características hidrogeológicas, a disponibilidade hídrica tem apresentado valores bem reduzidos (BRASIL, 2005). Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais de 1991 a 2012 (UFSC, 2013), a estiagem e a seca são o desastre que mais atinge a população brasileira, por ser mais frequente, representando 51% do total de registros, prosseguindo de enxurrada, com 21% e inundação com 12%.

Buscando reduzir a vulnerabilidade das populações atingidas pela seca, é de fundamental importância o desenvolvimento de técnicas voltadas para o seu monitoramento. Nesse sentido, diversos índices foram elaborados para que seja possível detectar longos períodos de estiagem (MCKEE et al., 1993; TSAKIRIS & VANGELIS, 2004; TONKAZ, 2006; SADEGHI & SHAMSELDIN, 2014), além de classificar esses períodos em termos de intensidade e tentar prever o comportamento futuro usando cadeias de Markov (STERN et al., 1982; AZEVEDO & LEITÃO, 1990; KELLER FILHO et al., 2006; PAULO & PEREIRA, 2007; LENNARTSSON et al., 2008; SANUSI et al., 2015).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar a periodicidade da seca, além de classificar a intensidade das classes de seca, usando o Índice de Precipitação Padronizado e cadeias de Markov, aplicados a 4 estações meteorológicas distribuídas nas sub-regiões da Bacia do Rio São Francisco.

## 2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.2.1 Área de Estudo

A área de estudo está situada na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) e os dados usados foram os que a Agência Nacional de Águas disponibilizou através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

Para os cálculos realizados nesse trabalho foram usadas 4 estações (uma estação de cada região da BHSF) com dados de precipitação diária de chuva, para o período de janeiro de 1970 a dezembro de 2015, o que corresponde a 46 anos de registros de chuva. A distribuição espacial dos dados foi estimada usando a Interpolação Ponderação pelo Inverso da Distância (SHEPARD, 1968). A Tabela 2.1 apresenta os dados relativos às estações escolhidas para o estudo de seca.

Tabela 2.1. Dados das estações escolhidas para estudo de seca da BHSF.

Sub-região	Latitude	Longitude	Código	Estação	Estado
Alto	-20,178889	-45,700278	2045002	Iguatama	MG
Médio	-10,002222	-42,474167	1042015	Pilão Arcado	BA
Sub-médio	-8,520278	-39,640833	839034	Fazenda Tapera	PE
Baixo	-10,215278	-36,823889	1036048	Propriá	SE

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

### 2.2.2 Índice de Precipitação Padronizado

O Índice de Precipitação Padronizado (em inglês, *Standardized Precipitation Index – SPI*) foi proposto e desenvolvido por McKee et al. (1993) como uma ferramenta versátil no monitoramento e análise dos períodos de seca. O SPI é usado para estimar a condição de seca com base na variável precipitação, sendo necessários o valor da média e do desvio padrão dos dados de precipitação, além de ser um indicador de seca que valoriza a escala de tempo que influencia a magnitude das chuvas. Para obtenção do índice, os valores mensais de precipitação para cada estação meteorológica podem ser calculados para a escala de tempo pretendida que pode ser de 1, 3, 6, 12 e 24 meses. Como exemplo para a escala de 6 meses, o SPI para o

mês de agosto é dado pela soma da precipitação deste mês e dos demais 5 meses anteriores a agosto (MAHMOUDZADEH et al., 2016).

Em relação a escala de tempo, o SPI de um mês indica a chuva total do mês que se deseja estudar e está associado as condições de curto prazo. O SPI de três meses representa a precipitação durante esses meses e retrata as condições de umidade do solo em curto e médio prazo, além de estimar a precipitação sazonal. O SPI de seis meses compara a precipitação desse período com o mesmo período dos anos da série histórica, associando com as irregularidades de estoque de água e as vazões dos rios. Os SPIs de doze e vinte e quatro meses expressa os padrões de precipitação de longo prazo e estão diretamente associados com a escassez de água, com os níveis de água nos lençóis freáticos e vazões dos rios (SOUSA et al., 2016).

De posse da série de precipitação construída e calculadas as quantidades de precipitações mensais acumuladas para cada mês, o cálculo do SPI consiste em ajustar a função densidade de probabilidade Gama à distribuição de frequência da precipitação de cada uma das estações pluviométricas. O modelo de distribuição Gama possui bom ajuste para variáveis contínuas que possuem limite inferior igual a zero e sem limite superior, sendo bastante usada para estudos de séries históricas de precipitação (WILKS, 2011). A função densidade de probabilidade Gama é dada pela equação:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x > 0, \quad (2.1)$$

onde:  $\alpha > 0$  é o parâmetro de forma,  $\beta > 0$  é o parâmetro de escala,  $x$  é a precipitação e  $\Gamma(\alpha)$  é a função Gama.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2.2)$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da função densidade de probabilidade são estimados para cada estação pelo método da Máxima Verossimilhança (THOM, 1966).

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2.3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\hat{x}}{\hat{\alpha}} \quad (2.4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_i^n x_i}{n}, \quad (2.5)$$

em que:  $n, \bar{x}, x_i$  e  $A$  são, respectivamente, o tamanho da amostra dos registros de precipitação, a média aritmética, as precipitações observadas e uma medida de assimetria da distribuição (HUSAK et al. 2007).

No atual trabalho, utilizou-se o SPI para seis meses (SPI-06) e para doze meses (SPI-12) para estudar as classes de seca nas quatro regiões da BHSF.

Para o cálculo do SPI, primeiro é ajustado a função densidade de probabilidade Gama às séries de totais mensais de precipitação. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada total mensal é estimada e a função Normal inversa é aplicada a essa probabilidade resultando no valor do SPI. Segundo McKee et al. (1993) o período de seca se inicia quando o SPI fica negativo e acaba quando volta a ter valores positivos (período chuvoso). A Tabela 2.2 expõe a escala e classificação dos valores do SPI usada nesse trabalho.

Tabela 2.2. Classificação dos valores do SPI.

Períodos Secos e Chuvosos	Valores do SPI
Seca extrema	$-\infty \leq SPI < -2$
Seca severa	$-2 \leq SPI < -1,5$
Seca moderada	$-1,5 \leq SPI < -1$
Seca leve	$-1 \leq SPI < 0$
Chuvoso	$0 \leq SPI < \infty$

Fonte: McKee et al. (1993) e Hughes & Saunders (2002).

### 2.2.3 Cadeias de Markov

Um processo estocástico é definido como uma coleção de variáveis aleatórias  $X(t)$  indexadas no tempo  $t$ , onde o espaço amostral desta variável é chamado de espaço de estados  $S$ , de forma que:

$$P(X_{n+1}=x_{n+1}|X_0=x_0, X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_n=x_n) = P(X_{n+1}=x_{n+1}|X_n=x_n) = p_{ij}, \quad (2.6)$$

para qualquer que seja os  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1} \in S$  e  $t \in T$  onde  $T$  é o conjunto de índices do processo e a função acima é chamada de função transição do processo. As probabilidades geradas por esta função podem ser expressas na forma de uma matriz, a saber:

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & \cdots & p_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

Tem-se que:  $0 \leq p_{ij} \leq 1$  e  $\sum p_{ij} = 1$ ;  $i = 1, 2, 3, 4 \dots n$ .

O processo de estimação da matriz de transição é importante para a modelagem aqui proposta. O método de Máxima Verossimilhança foi usado para calcular as probabilidades de transição. O estimador de Máxima Verossimilhança (MLE) de  $p_{ij}$  é dado por (MISHRA et al., 2009):

$$p_{ij} = P(X_{n+1}=x_j | X_n = i) \quad (2.8)$$

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}, \forall i, j \in S \quad (2.9)$$

Em processos de longo prazo, as probabilidades de transição dos estados da cadeia de Markov são independentes do estado inicial. Logo, as probabilidades  $\pi_j$

poderiam ser obtidas pelas sucessivas multiplicações da matriz de transição por ela mesma ou pela resolução do sistema linear de equações, a saber:

$$\begin{aligned} \pi_j &= \sum_{k \in S} \pi_k p_{kj}, j \in S \\ \sum_{j \in S} \pi_j &= 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Uma medida importante que ajuda no processo de avaliação de períodos de seca é o tempo médio de retorno ao determinado estado. Esse tempo médio representa o tempo necessário para uma classe de seca específica voltar a ocorrer. Este período temporal é calculado segundo a equação:

$$t_{ii} = \frac{1}{\pi_i} \quad (2.11)$$

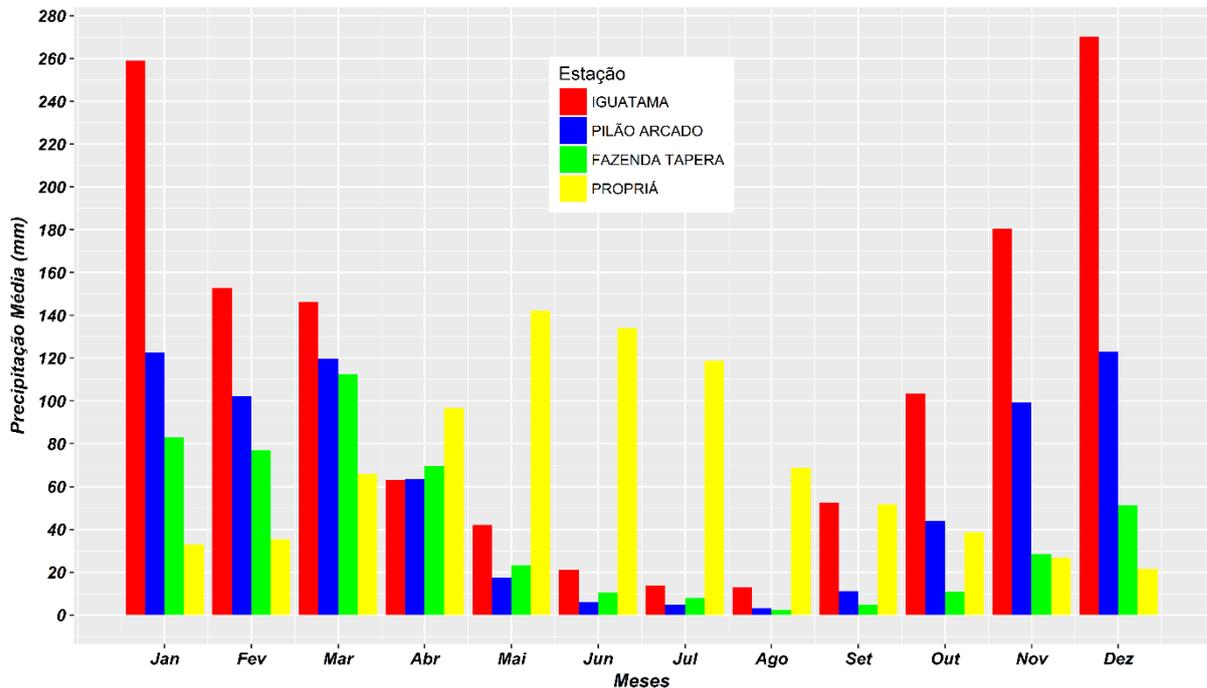
Com base nos dados é possível finalmente calcular a esperança de retorno a um determinado estado. Matematicamente, tem-se que:

$$E(T_i | X_0) = \sum_k k \cdot P(m = k | X_0 = i) = \frac{1}{1 - p_{ii}} \quad (2.12)$$

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estações escolhidas estão distribuídas nas quatro sub-regiões da BHSF, e, portanto, apresentam climas e níveis de precipitações diferentes entre si. Para cada estação foram calculadas as precipitações médias para todos os meses do ano, como pode ser visualizado na Figura 2.1. Os totais precipitados encontrados foram de: 1317 mm para a estação Iguatama, 715 mm para Pilão Arcado, 481 mm para Fazenda Tapera e 832 mm para a estação Propriá, confirmando a diferença esperada entre as sub-regiões da BHSF (MMA, 2006).

Figura 2.1. Precipitação média mensal das estações da BHSF.



Fonte: O próprio autor.

Observando a Figura 2.1, a estação Iguatama possui maiores precipitações médias no trimestre de novembro a janeiro, em especial com precipitações médias superiores a 200 mm nos meses de dezembro e janeiro.

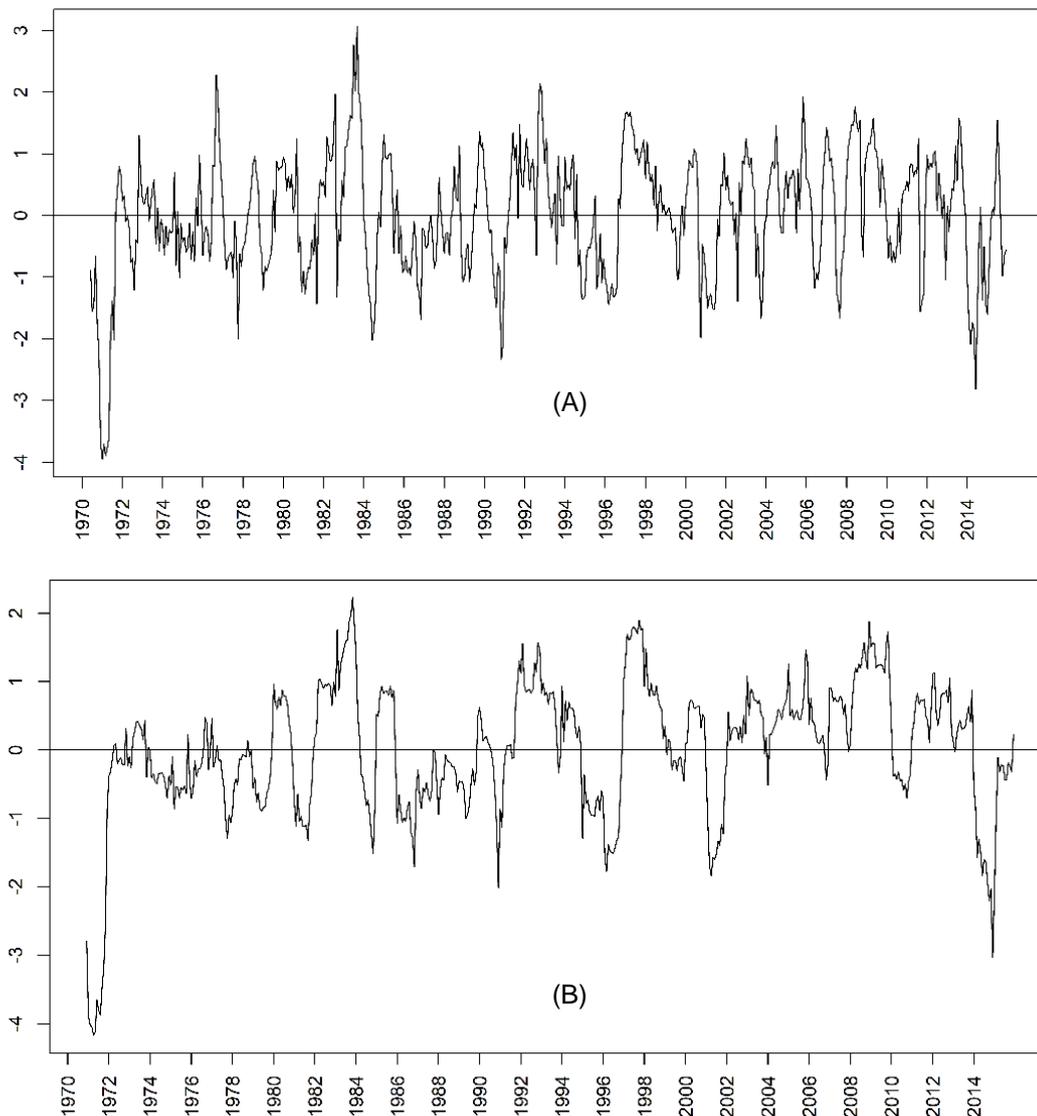
As estações Pilão Arcado e Fazenda Tapera apresentam o mesmo comportamento pois seu regime de chuva média mensal registram precipitações menores que 150 mm.

A exceção fica para a estação Propriá (baixo São Francisco) que assume seus valores máximos de precipitação no trimestre de maio a junho interceptando o trimestre de menor precipitação (de junho a agosto) das demais estações.

Em especial, as estações Pilão Arcado, Fazenda Tapera e Propriá, apesar de estarem em sub-regiões diferentes, (médio, sub-médio e baixo São Francisco, respectivamente), fazem parte do semiárido nordestino, conforme aponta a nova delimitação do semiárido (BRASIL, 2005).

Como o estudo tem o intuito de analisar a seca nas sub-regiões da bacia, foram escolhidas as escalas de tempo de seis e de doze meses. As Figuras 2.2 a 2.5 mostram os valores de SPI para as escalas de tempo de seis (SPI-06) e doze meses (SPI-12) para as 4 estações representativas das sub-regiões da BHSF, para o período de 1970 a 2015, que totalizam uma série histórica de 46 anos.

Figura 2.2. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Iguatama.

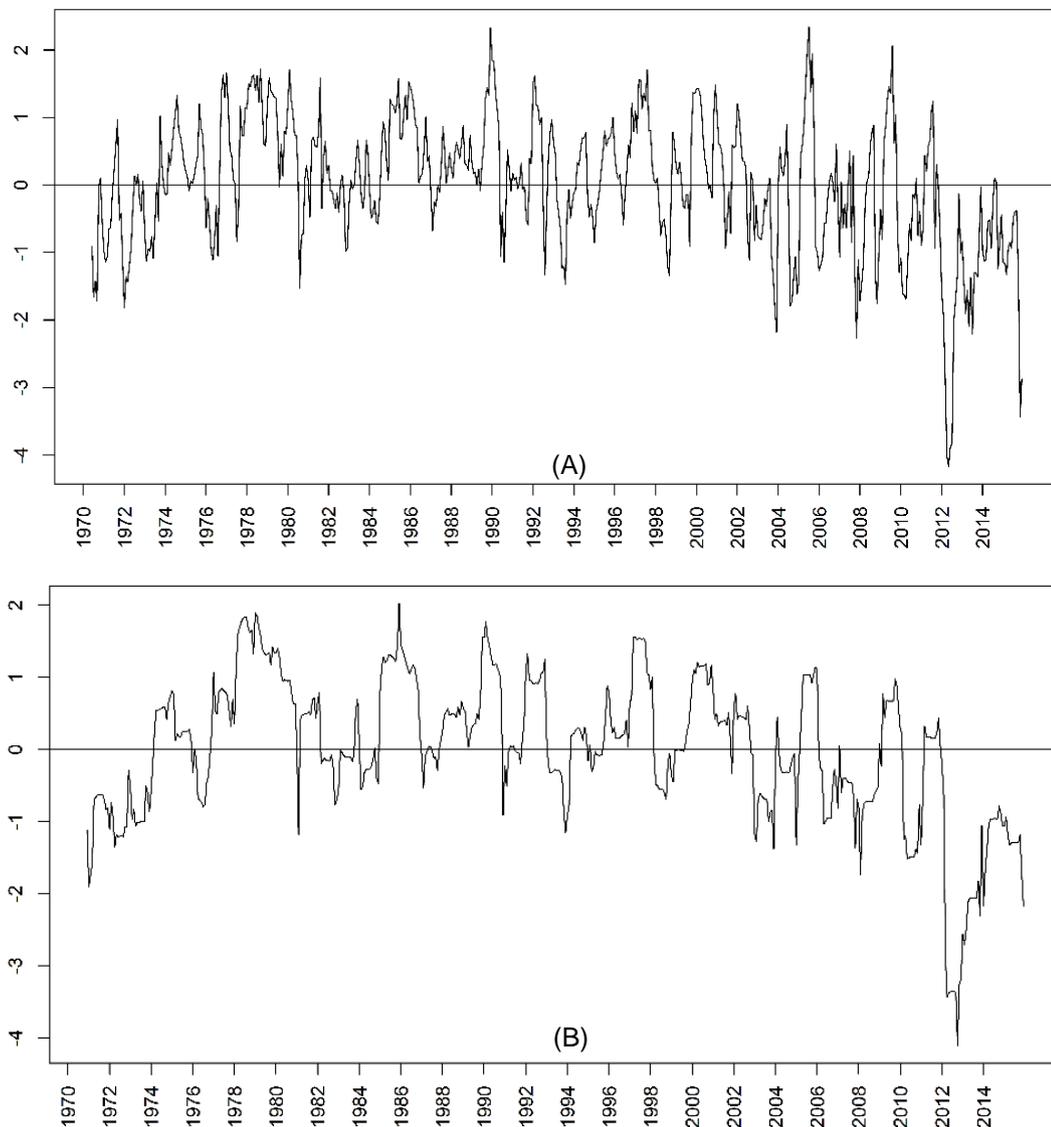


Fonte: O próprio autor.

Para períodos de seca os valores de SPI são negativos, enquanto que para o período chuvoso os valores são positivos, conforme a classificação na Tabela 2.2.

Na Figura 2.2 (A e B) é possível identificar os anos de secas, devido aos baixos valores de precipitação acumulada nas escalas temporais de seis e doze meses. O ano de 1971 foi o principal destaque da ocorrência de seca extrema, com grandes picos negativos, respectivamente, de -3,95 e -4,17 para os períodos de 6 e 12 meses. Também se identifica a classificação de seca severa e moderada com valores de SPI entre -1,0 e -2,0 para as escalas de seis e doze meses. Vale salientar que essa estação pertence à região do alto São Francisco, cuja ocorrência de secas extremas e severas não é tão esperado.

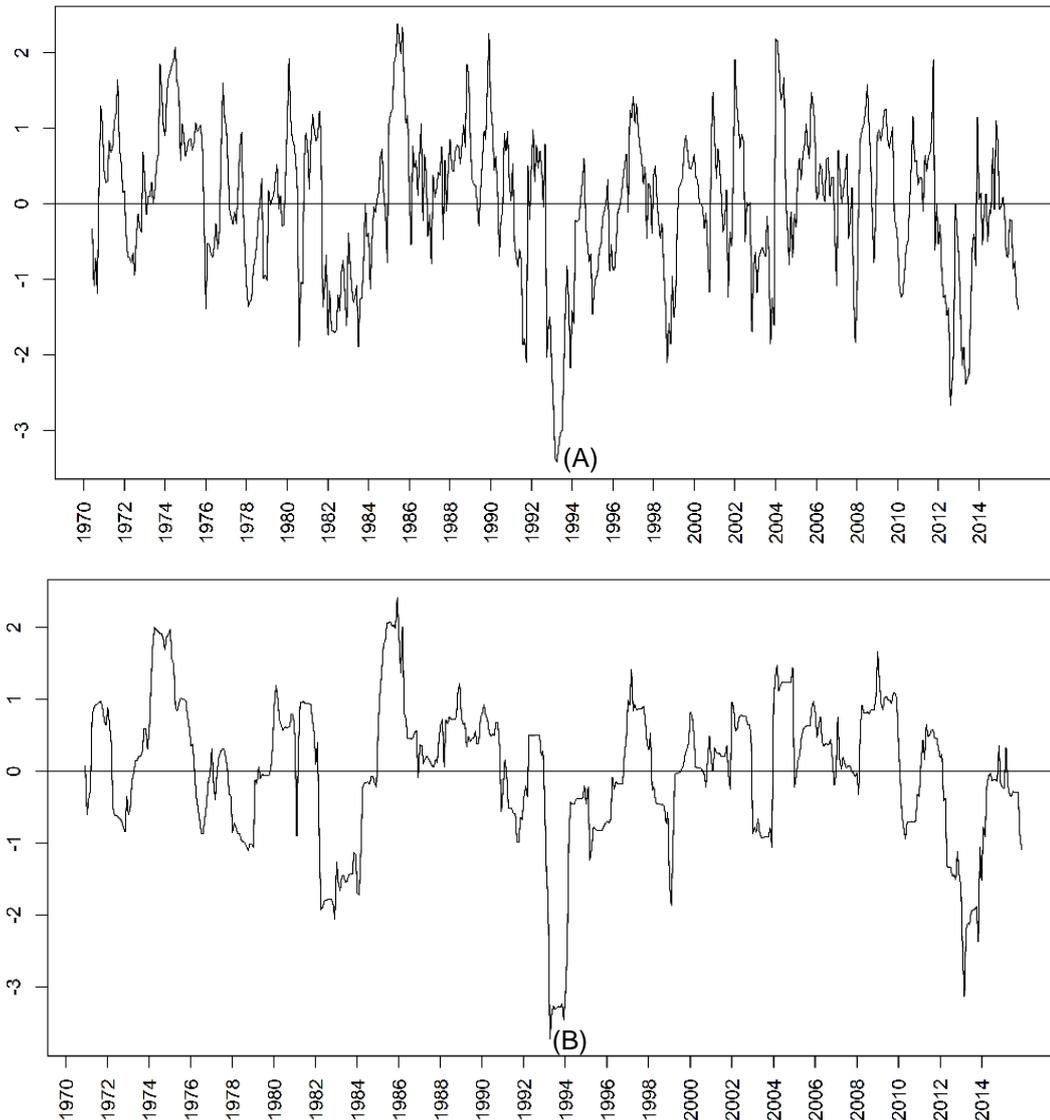
Figura 2.3. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Pilão Arcado.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 2.3 (A e B) podem ser identificados vários picos de seca extrema para os anos de 2003, 2007, 2012 e 2013 com valores entre -2,10 a -4,16 para a escala de tempo de seis meses (SPI-06). Já para doze meses (SPI-12) existem diversos picos de seca extrema entre os anos de 2012 e 2014. Também se observa em alguns anos a presença de seca severa e seca moderada com valores de SPI entre -1,0 e -2,0. Essa estação pertence à região do médio São Francisco, cuja ocorrência de secas extremas e severas não é tão esperado, como também os valores de precipitação não são tão altos.

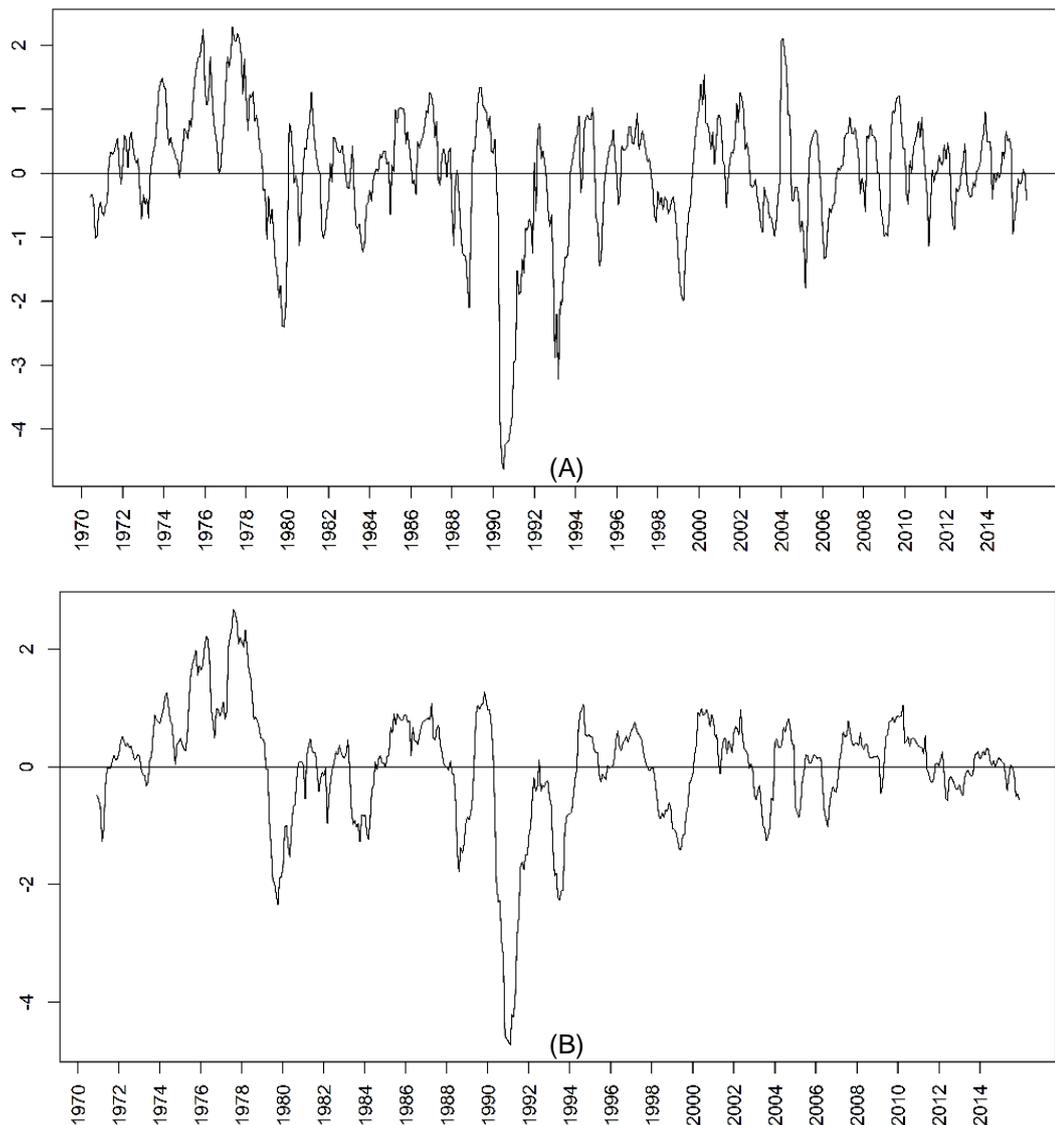
Figura 2.4. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Fazenda Tapera.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 2.4 (A e B), para a estação Fazenda Tapera, apresentam diversos picos de seca extrema. Para seis meses (SPI-06) existem vários picos de seca extrema com valores entre -2,04 e -3,42 entre os anos de 1991 e 2013; e também alguns picos para a escala de doze meses (SPI-12) entre os anos de 1983 e 2013. Além de seca extrema, diversos anos apresentam seca severa e seca moderada com valores de SPI entre -1,0 a -2,0 para as duas escalas de tempo (SPI-06 e SPI-12). Também são encontrados em alguns anos registros de seca leve com SPI variando entre 0,0 e -1,0. Como essa estação pertence ao sub-médio, com predominância de clima semiárido, é esperado a ocorrência de secas extremas, secas severas e até secas leves devido aos baixos valores de precipitações nessa sub-região da BHSF.

Figura 2.5. SPI-06 (A) e SPI-12 (B) para a estação Propriá.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 2.5 (A e B) encontram-se picos de seca extrema em 1980, 1991 e entre os anos de 1993 e 1994 para as duas escalas de tempo (SPI-06 e SPI-12). Também existem alguns anos com secas severas e moderadas para as duas escalas com SPI entre -1,0 e -2,0, assim como seca leve com SPI entre 0,0 e -1,0. Como essa estação pertence ao baixo São Francisco, a ocorrência esperada de secas extremas e severas é menor que na região do sub-médio, apesar do Município de Propriá também fazer parte do semiárido nordestino (BRASIL, 2005).

Em seguida, foram calculadas as probabilidades de transição (Tabelas 2.3 e 2.4), que são as probabilidades de mudança de estado de um mês para outro, segundo classificação da Tabela 2.2, para as escalas de seis e doze meses.

Tabela 2.3. Matrizes de transição para o SPI-06 para as estações da BHSF.

<b>Estação: Iguatama Código: 2045002</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,500	0,286	0,000	0,143	0,071
Seca severa	0,176	0,118	0,412	0,294	0,000
Seca moderada	0,038	0,135	0,327	0,404	0,096
Seca leve	0,011	0,017	0,108	0,602	0,261
Chuvoso	0,000	0,003	0,031	0,146	0,819
<b>Estação: Pilão Arcado Código: 1042015</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,545	0,091	0,273	0,000	0,091
Seca severa	0,167	0,278	0,444	0,111	0,000
Seca moderada	0,057	0,151	0,340	0,377	0,075
Seca leve	0,000	0,018	0,114	0,611	0,257
Chuvoso	0,000	0,003	0,017	0,141	0,838
<b>Estação Fazenda Tapera Código: 839034</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,556	0,222	0,167	0,000	0,056
Seca severa	0,095	0,238	0,381	0,238	0,048
Seca moderada	0,104	0,125	0,354	0,292	0,125
Seca leve	0,000	0,024	0,109	0,618	0,248
Chuvoso	0,003	0,007	0,010	0,146	0,833
<b>Estação Propriá Código: 1036048</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,789	0,105	0,053	0,053	0,000
Seca severa	0,154	0,462	0,308	0,077	0,000
Seca moderada	0,037	0,148	0,296	0,370	0,148
Seca leve	0,006	0,006	0,081	0,705	0,202
Chuvoso	0,000	0,000	0,000	0,124	0,876

Fonte: O próprio autor.

Observando a Tabela 2.3 para a escala SPI-06, as probabilidades de transição do estado climático chuvoso no mês atual para o mesmo estado de chuva no mês posterior são maiores do que 0,800 (80%). Nota-se também que as probabilidades de transição de uma condição de seca no momento atual e que no mês seguinte a condição mude para o período chuvoso são pequenas, variando no intervalo de 0,00 (0,0%) a 0,261 (26,1%). Outra informação importante que esta matriz expõe é que se uma localidade está sob a condição de seca extrema, a probabilidade de que no mês

seguinte a condição mude para chuvosa é nula. Isto é esperado pois as condições climáticas não mudam repentinamente desta forma. Além disso, as probabilidades de que uma condição de seca extrema esteja vigorando e no mês posterior esta condição permaneça aumenta à medida que se desloca em direção à foz do Velho Chico, com valores de 0,500 (50%) a 0,789 (78,9%).

Tabela 2.4. Matrizes de transição para o SPI-12 para as estações da BHSF.

<b>Estação: Iguatama Código: 2045002</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,824	0,000	0,059	0,118	0,000
Seca severa	0,063	0,563	0,250	0,125	0,000
Seca moderada	0,031	0,156	0,375	0,438	0,000
Seca leve	0,000	0,010	0,072	0,778	0,139
Chuvoso	0,000	0,000	0,004	0,089	0,907
<b>Estação: Pilão Arcado Código: 1042015</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,824	0,000	0,059	0,118	0,000
Seca severa	0,063	0,563	0,250	0,125	0,000
Seca moderada	0,031	0,156	0,375	0,438	0,000
Seca leve	0,000	0,010	0,072	0,778	0,139
Chuvoso	0,000	0,000	0,004	0,089	0,907
<b>Estação Fazenda Tapera Código: 839034</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,857	0,095	0,048	0,000	0,000
Seca severa	0,222	0,333	0,222	0,222	0,000
Seca moderada	0,022	0,067	0,556	0,333	0,022
Seca leve	0,005	0,005	0,077	0,798	0,115
Chuvoso	0,000	0,000	0,007	0,071	0,922
<b>Estação Propriá Código: 1036048</b>					
	Seca extrema	Seca severa	Seca moderada	Seca leve	Chuvoso
Seca extrema	0,778	0,056	0,111	0,056	0,000
Seca severa	0,167	0,583	0,167	0,083	0,000
Seca moderada	0,000	0,269	0,577	0,115	0,038
Seca leve	0,000	0,011	0,034	0,835	0,119
Chuvoso	0,000	0,000	0,000	0,078	0,922

Fonte: O próprio autor.

Para as matrizes de transição da escala de doze meses (Tabela 2.4), as probabilidades que uma localidade esteja atualmente sob um clima chuvoso e no mês seguinte permaneça nesta mesma condição, são maiores que 0,900 (90%). Da mesma forma, as probabilidades de que uma localidade esteja sob a condição de seca extrema e no mês que vem permaneça nesta condição são maiores que (77,8%).

As Tabelas 2.5 e 2.6 mostram a distribuição estacionária para as escalas de seis e doze meses.

Tabela 2.5. Distribuição estacionária para o SPI-06 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	0,026	0,095	0,031	0,322	0,526
Pilão Arcado	0,025	0,099	0,034	0,302	0,541
Fazenda Tapera	0,034	0,091	0,039	0,299	0,537
Propriá	0,035	0,049	0,024	0,317	0,575

Fonte: O próprio autor.

Pela Tabela 2.5, é possível perceber que todas as estações estarão sob um clima chuvoso com probabilidades maiores que 0,526 (52,6%) e que as probabilidades das estações se encontrarem em uma categoria de seca extrema são maiores que 0,025 (2,5%). O mesmo ocorre para a escala de doze meses cujas probabilidades de que as estações estarão sob um clima chuvoso são maiores do que 0,513 (51,3%), enquanto que para a categoria de seca extrema as probabilidades são maiores que 0,021 (2,1%).

Tabela 2.6. Distribuição estacionária para o SPI-12 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	0,021	0,058	0,029	0,356	0,536
Pilão Arcado	0,054	0,081	0,019	0,333	0,513
Fazenda Tapera	0,038	0,056	0,050	0,327	0,530
Propriá	0,035	0,061	0,026	0,285	0,593

Fonte: O próprio autor.

Assim, compreendendo que uma determinada condição climática possui uma probabilidade de ocorrência em determinada região, é possível verificar, em média,

quanto leva para que um determinado clima volte a ocorrer. Com este intuito o tempo de recorrência foi calculado para as escalas de seis e doze meses e os resultados estão expostos nas Tabela 2.7 e 2.8.

Tabela 2.7. Tempo de recorrência para o SPI-06 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	38,5	10,5	32,3	3,1	1,9
Pilão Arcado	40,0	10,1	29,4	3,3	1,8
Fazenda Tapera	29,4	11,0	25,6	3,3	1,9
Propriá	28,6	20,4	41,7	3,2	1,7

Fonte: O próprio autor.

Tabela 2.8. Tempo de recorrência para o SPI-12 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	47,6	17,2	34,5	2,8	1,9
Pilão Arcado	18,5	12,3	52,6	3,0	1,9
Fazenda Tapera	26,3	17,9	20,0	3,1	1,9
Propriá	28,6	16,4	38,5	3,5	1,7

Fonte: O próprio autor.

Como o tempo de recorrência é o inverso da distribuição estacionária, tem-se, por exemplo, que para a estação Pilão Arcado e a escala SPI-12, o tempo de recorrência é igual a  $1/0,513 \approx (1,9)$  meses. Ou seja, o tempo médio de retorno ao estado chuvoso é para todas as estações menor ou igual a 1,9 meses, de forma que nenhuma classe de seca será repetida em um futuro próximo.

Na escala de seis meses, os menores tempos de recorrência encontrados para a classe de seca extrema foram para as estações Fazenda Tapera e Propriá, apresentando valores bem próximos, respectivamente de 29,4 e 28,6.

Utilizando a escala de doze meses para avaliação de seca hidrológica, encontrou-se o maior tempo de retorno para a classe de seca extrema igual a 47,6 meses para a estação Iguatama, significando que dentre as demais estações esta é a que apresenta menor possibilidade de estar sob esse tipo de clima. Vale lembrar que essa estação pertence à sub-região do alto São Francisco, com predominância de clima tropical úmido e temperado de altitude, refletindo uma quantidade maior de

precipitação, ou seja, as chances de ocorrer estiagem ou seca devem ser menores que nas outras sub-regiões.

Ainda na escala de tempo de doze meses (SPI-12), os menores tempos de recorrência para a classe de seca extrema foram para as estações Pilão Arcado, Fazenda Tapera e Propriá. Este fato indica que estas estações possuem maior propensão a seca, conforme esperado, uma vez que as mesmas estão sediadas em municípios que pertencem a região do semiárido, segundo a última atualização dos municípios do semiárido feita em 2005 pelo Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2005).

Para a nova delimitação do semiárido brasileiro, o grupo de trabalho do Ministério adotou três critérios técnicos que caracterizam os municípios que fazem parte dessa delimitação:

- i) Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros;
- ii) Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990;
- iii) Risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

Esses três critérios foram aplicados fortemente a todos os municípios que pertencem à área da antiga SUDENE, inclusive os municípios do norte de Minas e do Espírito Santo (BRASIL, 2005).

No presente trabalho, tanto foi estudado o comportamento da precipitação em um curto prazo de tempo, através de informações extraídas da matriz de transição (Tabelas 2.3 e 2.4), como também foi quantificada a chance de certa condição climática ocorrer em um determinado momento futuro do tempo, conforme as informações expostas nas Tabelas 2.5 e 2.6, o que permite planejar medidas de contingência em função da magnitude da probabilidade ser maior ou menor.

Além disso, existem as probabilidades estacionárias (Tabelas 2.7 e 2.8), que permitem calcular o tempo de retorno para diversas condições climáticas, possibilitando saber se certa condição ocorrerá em um futuro próximo, dada a condição climática atual da área.

Outrossim, também é possível obter informações a respeito das condições climáticas que servem para avaliar o tempo esperado de permanência em

determinada condição climática. Os valores esperados estão apresentados nas Tabelas 2.9 e 2.10.

Tabela 2.9. Tempo esperado de permanência para o SPI-06 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	2,0	1,5	1,1	2,5	5,5
Pilão Arcado	2,2	1,5	1,4	2,6	6,2
Fazenda Tapera	2,3	1,6	1,3	2,6	6,0
Propriá	4,8	1,4	1,9	3,4	8,1

Fonte: O próprio autor.

Tabela 2.10. Tempo esperado de permanência para o SPI-12 para as estações da BHSF.

<b>Estação</b>	<b>Seca extrema</b>	<b>Seca severa</b>	<b>Seca moderada</b>	<b>Seca leve</b>	<b>Chuvoso</b>
Iguatama	5,7	1,6	2,3	4,5	10,8
Pilão Arcado	7,0	2,3	1,5	5,0	12,8
Fazenda Tapera	4,5	2,4	2,4	6,1	12,9
Propriá	6,3	1,9	1,8	4,1	12,3

Fonte: O próprio autor.

O que se espera na avaliação de condições de seca é que os tempos sejam pequenos. Dessa forma, como pode ser observado nas Tabelas 2.9 e 2.10, o tempo esperado em meses para a classe chuvosa nas escalas de seis e doze meses são maiores e iguais a 5,5 meses. Esta informação pode ser usada, por exemplo, para o planejamento de plantio de uma determinada cultura, uma vez que é conhecido o início da chuva. Em várias circunstâncias, como o cálculo de sistemas de escoamento de água ou em projetos de irrigação, é de suma importância conhecer a probabilidade de chover mais ou menos que um determinado valor (PEREIRA et al., 2007).

## 2.4. CONCLUSÕES

A modelagem dos resultados do SPI para as escalas de seis e doze meses através de Cadeias de Markov mostrou-se útil na busca de entendimento das características estocásticas do comportamento climático das sub-regiões da BHSF, através da análise de probabilidade para cada classe climática, tempo de recorrência e valor esperado do tempo de permanência em cada classe.

Em ambas as escalas a matriz de transição revelou que, dado que o clima esteja em um momento de seca severa ou chuvoso, a mudança para outra classe é pouco provável a curto prazo. Correlacionando esta informação com as probabilidades da distribuição estacionária, foi possível encontrar as regiões que têm maior chance de no momento futuro estar em um clima chuvoso ou sob as condições de seca. Ainda assim, os resultados obtidos com a aplicação do SPI e cadeias de Markov devem ser monitorados e correlacionados com outras informações climáticas, como a sazonalidade dos fenômenos El Niño-Oscilação Sul (ENOS), caracterizados por anomalias positivas (El Niño) ou negativas (La Niña) (INPE, 2018).

O cálculo do tempo de permanência em um determinado estado é importante pois informa a propensão das regiões a períodos de seca extrema, como objetiva o presente estudo. Em todos os casos estudados e em ambas as escalas esta propensão foi baixa mesmo para a região do semiárido representada pela estação Fazenda Tapera (Tabelas 2.9 e 2.10). A avaliação do valor esperado do tempo de permanência retifica as informações do período de duração de cada condição climática. O que se espera na avaliação de condições de seca é que os tempos sejam pequenos, como foi observado para todas as estações. Esta informação pode ser usada para o planejamento de plantio de uma determinada cultura, conhecendo o início da classe de chuva ou para o planejamento da concentração de recursos hídricos para a geração de energia ou para reserva de açúcares.

Além disso, os dados das séries históricas da BHSF podem ser avaliados com a contribuição de outras técnicas estatísticas tais como: análise por processos estocásticos não homogêneos, modelos log-lineares, modelos multivariados, aplicação de outros índices de seca e análise de variáveis climáticas. Essa análise conjunta permite fornecer diversas informações aos órgãos que administram os recursos hídricos da BHSF, melhorando o planejamento de medidas de contingência para casos de condições extremas de chuva ou de seca.

### **3. Precipitação Máxima Provável da Bacia do Rio São Francisco**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

A Precipitação é um dos fatores climáticos mais importantes para se estudar o regime hidrológico de uma dada região ou de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2004). A Precipitação Máxima Provável (PMP) é definida como um limite superior da precipitação que corresponde a uma duração fisicamente possível de ocorrer sobre uma determinada região de drenagem (bacia hidrográfica) em uma dada época do ano. A determinação pode ser feita usando metodologias físicas ou através de técnicas estatísticas (WMO, 2012).

Já o Tempo de Retorno (TR) de totais pluviométricos permite estimar a frequência com que uma precipitação de certa magnitude possa ocorrer, ser igualada ou até mesmo ser superada (RAMOS et al., 1989).

O ajuste de dados de chuva a uma distribuição de probabilidade tanto possibilita calcular o TR, como auxilia na previsão de ocorrências ou ausências de chuvas em regiões com escassez de recursos hídricos, decorrentes de períodos de seca ou estiagem (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

O monitoramento de episódios hidrológicos extremos e a análise da precipitação são ferramentas importantes no gerenciamento de recursos naturais em áreas com grandes limitações hídricas como o semiárido brasileiro, que faz parte da Bacia do Rio São Francisco (ALVALA et al., 2017; MARENGO et al., 2017). Na região do semiárido que está sujeito a longos períodos de estiagens, observa-se um êxodo de parte de sua população (ANA, 2017).

A precipitação média anual da bacia é maior na região da cabeceira, diminuindo no sentido da foz, que fica entre o sub-médio e o baixo, voltando a crescer até a foz devido à proximidade do litoral (PEREIRA et al., 2007). Próximo à montante de Xingó (no alto, médio e sub-médio), o trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, o que contribui com 55 a 60% da precipitação anual, já o período mais seco é de junho a agosto. Enquanto no baixo São Francisco a chuva ocorre de maio a junho.

Diante disso, o objetivo desse estudo é encontrar o Tempo de Retorno, a partir dos ajustes dos valores da Precipitação Máxima Provável (PMP) para algumas distribuições, utilizando dados pluviométricos de 7 estações da Bacia do Rio São Francisco.

## 3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.2.1 Área de Estudo

A área de estudo está situada na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) e os dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018). Os dados correspondem à precipitação pluvial expressa em altura de lâmina d'água (mm) de 7 estações localizadas na extensão da BHSF, no período de janeiro de 1970 a dezembro de 2015, totalizando 46 anos. Os dados cadastrais das estações estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dados das estações escolhidas para estudo de precipitação da BHSF.

Sub-região	Latitude	Longitude	Código	Estação	Estado
Alto	-20,178889	-45,700278	2045002	Iguatama	MG
	-19,013056	-44,036667	1944020	Pirapama	MG
	-16,371667	-45,082778	1645000	São Romão	MG
Médio	-13,566667	-44,306111	1344015	Colônia do Formoso	BA
	-10,002222	-42,474167	1042015	Pilão Arcado	BA
Sub-médio	-8,520278	-39,640833	839034	Fazenda Tapera	PE
Baixo	-10,215278	-36,823889	1036048	Propriá	SE

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

### 3.2.2 Método de Interpolação

Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória dos dados, de forma que alguns valores discrepantes foram eliminados. Essa eliminação com o intuito de controle de dados é importante, pois como algumas medições foram feitas manualmente, além de existirem erros grosseiros de medida. Existem também ausência de observações, gerando descontinuidade de registros na série de dados pluviométricos e com o intuito de preencher essas falhas foi utilizado um método de interpolação para os dados de precipitação referentes às 7 estações pluviométricas.

O método de interpolação usado para o preenchimento das falhas foi a Ponderação pelo Inverso da Distância (*Inverse Distance Weighting-IDW*), inicialmente proposto por Shepard (1968), e presume que, quanto mais distante uma estação com determinado valor de precipitação observado estiver da estação cujo valor de chuva vai ser estimado, menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor interpolado.

### 3.2.3 Estimação da Precipitação Máxima Provável

Para estimar a PMP, a *World Meteorological Organization* (WMO, 2009) recomenda o método de Hershfield (1961), baseado na análise de frequência dos dados pluviométricos máximos anuais registrados no local de interesse. O procedimento de Hershfield é baseado na equação geral da frequência apresentada por Chow (1964):

$$X_{TR} = \bar{X}_n + K_{TR} \cdot \sigma_n, \quad (3.1)$$

em que:  $X_{TR}$  corresponde à chuva para um tempo de retorno  $TR$ , e  $\bar{X}_n$  e  $\sigma_n$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série de  $n$  máximas anuais.  $K_{TR}$  é o fator de frequência. Hershfield avaliou que para a estimativa da PMP existe um valor de  $K_{TR}$  da Eq. (3.1) que não será excedido, e usou a seguinte equação de frequência:

$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m \cdot \sigma_n \quad (3.2)$$

$$K_m = \frac{X_{max} - \bar{X}_{n-1}}{\sigma_{n-1}}, \quad (3.3)$$

em que:  $X_{PMP}$  corresponde à *PMP* para uma determinada duração e local,  $\bar{X}_n$  e  $\sigma_n$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série de  $n$  valores de chuvas máximas anuais para uma determinada duração; e  $K_m$  é o fator de frequência.

### 3.2.4 Cálculo do Tempo de Retorno

Define-se Tempo de Retorno ( $TR$ ), ou período de recorrência de um evento hidrológico como sendo o intervalo de tempo médio, medido em anos, em que o evento de uma dada relevância  $X_0$  é igualado ou superado pelo menos uma vez. Dessa forma, se o evento de relevância  $X_0$  (precipitação ou vazão) ocorre ao menos uma vez em  $TR$  anos, tem-se que o período de retorno, em anos, corresponde ao inverso da probabilidade de excedência, ou seja:

$$P\{X \geq X_0\} = \frac{1}{TR} \quad (3.4)$$

As distribuições de probabilidade escolhidas para ajustar as séries históricas de precipitação e calcular o tempo de retorno foram: Distribuição Generalizada de Pareto (DGP), Burr XII, Generalizada de Valores Extremos (GEV), Gama Generalizada, Gaussiana Inversa e Dagum. A Tabela 3.2 exibe para cada distribuição: a função de distribuição acumulada, o suporte, os parâmetros e a referência usada.

Tabela 3.2. Distribuições escolhidas para ajuste de precipitação.

Distribuição	Função de distribuição de probabilidade	Suporte	Parâmetros
Burr XII (BURRXII) <sup>a</sup>	$f(x) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma_1} \left(1 + \gamma_2 \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma_1}\right)^{-\frac{1}{\gamma_1 \gamma_2} - 1}$	$x \geq 0$	$\gamma_1$ parâmetro de forma $\gamma_2$ parâmetro de forma $\beta$ parâmetro de escala
Dagum <sup>b</sup>	$f(x) = apx^{ap-1} / \left[ b^{ap} \left\{ 1 + \left(\frac{x}{b}\right)^{ap} \right\} \right]$	$x \geq 0$	$a$ parâmetro de forma ( $a > 0$ ) $b$ parâmetro de escala ( $b > 0$ ) $p$ parâmetro de forma ( $p > 0$ )
Gama Generalizada (GGAM) <sup>c</sup>	$f(x) = \frac{(x - \gamma)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\left(x - \frac{\gamma}{\beta}\right)\right)$	$\gamma \leq x < +\infty$	$\alpha$ parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ ) $\beta$ parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ) $\gamma$ parâmetro de localização ( $\gamma > 0$ )
Gaussiana Inversa Generalizada (GIG) <sup>d</sup>	$f(x) = \frac{\left(\frac{\psi}{\chi}\right)^{\frac{\gamma}{2}}}{2K_\gamma(\sqrt{\chi\psi})} x^{\gamma-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\chi x^{-1} + \psi x)\right\}$	$x > 0$	$\begin{cases} \{\psi > 0, \chi \geq 0\}, se \gamma > 0 \\ \{\psi > 0, \chi > 0\}, se \gamma = 0 \\ \{\psi \geq 0, \chi > 0\}, se \gamma < 0 \end{cases}$ $K_\gamma$ função Bessel 3º tipo, $\gamma \in \mathbb{R}$
Generalizada de Valor Extremo (GEV) <sup>e</sup>	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1 + kz\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + kz\right)^{-1-\frac{1}{k}}, k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)), k = 0 \end{cases}$ $onde z = \frac{x - \mu}{\sigma}$	$1 + \frac{k(x - \mu)}{\sigma} > 0,$ $k \neq 0$ $-\infty < x < +\infty,$ $k = 0$	$k$ parâmetro de forma $\sigma$ parâmetro de escala ( $\sigma > 0$ ) $\mu$ parâmetro de localização
Pareto Generalizada (GPD) <sup>e</sup>	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \left(1 - \frac{\alpha(x - \mu)}{\beta}\right)^{\frac{1}{\alpha} - 1}, \alpha \neq 0 \\ \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{x - \mu}{\beta}\right), \alpha = 0 \end{cases}$	$\mu \leq x < +\infty,$ $\alpha \geq 0$ $\mu \leq x < \mu - \frac{\beta}{\alpha},$ $\alpha < 0$	$\alpha$ parâmetro de forma $\beta$ parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ) $\mu$ parâmetro de localização

Fontes: <sup>a</sup>Papalexiou & Koutsoyiannis (2016); <sup>b</sup>Kleiber & Kotz (2003); <sup>c</sup>Mayooran & Laheetharan (2014); <sup>d</sup>Hörmann & Leydold (2013); <sup>e</sup>Douka & Karacostas (2018).

Com o objetivo de avaliar o ajuste da amostra a uma distribuição populacional, foram aplicados métodos de bondade de ajuste (*Goodness-of-fit Techniques*). Foram usados métodos gráficos e métodos numéricos de análise. Os métodos gráficos são muito usados pois apresentam diversas aplicações e facilidade na obtenção dos resultados. Estes métodos são menos formais que os métodos de análise numérica, mas têm grande relevância, auxiliando evidenciar características e comportamentos presentes na amostra.

Os métodos gráficos usados para avaliação do ajuste das distribuições foram:

- FDAE x FDAA: gráfico que expõe a Função Distribuição Acumulada Empírica (FDAE) e a Função Distribuição Acumulada Ajustada (FDAA), que permitem avaliar se o comportamento da FDAA está próximo do comportamento da FDAE.
- O gráfico de histograma da Função Densidade Empírica (FDE) juntamente com o gráfico da Função Densidade Ajustada (FDA), que expõe de forma semelhante ao gráfico (FDAA x FDAE), se o comportamento da FDA se assemelha ao comportamento da FDE.
- O gráfico Quantil-Quantil conhecido como Q-Q Plot, onde é plotado os quantis empíricos (eixo y) contra os quantis teóricos (eixo x), proporciona a verificação do ajuste nas caudas da distribuição.
- O gráfico Probabilidade-Probabilidade conhecido como P-P Plot, onde é plotado a função de distribuição empírica avaliada em cada ponto de dados (eixo y) contra a função de distribuição ajustada (eixo x), proporciona a verificação do ajuste no centro da distribuição.

A análise gráfica sozinha pode implicar em deduções tendenciosas. Dessa forma, o uso de técnicas numéricas é essencial para evitar este tipo de problema.

As avaliações numéricas podem ser feitas através do cálculo de diferentes estatísticas de qualidade do ajuste, a fim de comparar se as distribuições ajustadas aderem bem aos dados. Isso é feito medindo-se a distância entre a função de distribuição ajustada aos dados  $F$  e a distribuição empírica  $F_n$ .

As estatísticas usadas com esta finalidade foram: Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises e Anderson-Darling. Suas definições estão expostas na Tabela 3.3. O software R versão 3.5.1 foi usado para computar os resultados (R CORE TEAM, 2018).

Tabela 3.3. Estatísticas usadas para a qualidade do ajuste.

Estatísticas	Fórmulas	Fórmulas Computacionais
Kolmogorov-Smirnov (KS)	$\sup F_n(x) - F(x) $	$\max(D^+, D^-)$ with $D^+ = \max_{i=1, \dots, n} \left( \frac{i}{n} - F_i \right)$ $D^- = \max_{i=1, \dots, n} \left( F_i - \frac{i-1}{n} \right)$
Cramer-von Mises (CV)	$n \int_{-\infty}^{\infty} (F_n(x) - F(x))^2 dx$	$\frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left( F_i - \frac{2i-1}{2n} \right)^2$
Anderson-Darling (AD)	$n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(F_n(x) - F(x))^2}{(F(x)(1 - F(x)))} dx$	$-n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \log(F_i(1 - F_{n+1-i}))$

Fonte: D'Agostino &amp; Stephens (1986).

Onde:  $F_i \triangleq F(x_i)$ 

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foram usadas técnicas tradicionais de estatística com a finalidade de verificar a presença de padrões nos dados de precipitação. Assim, a partir da avaliação dos dados das séries históricas de precipitação, foram calculadas as precipitações médias anuais para cada estação e mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Precipitação média anual (mm) das estações escolhidas.

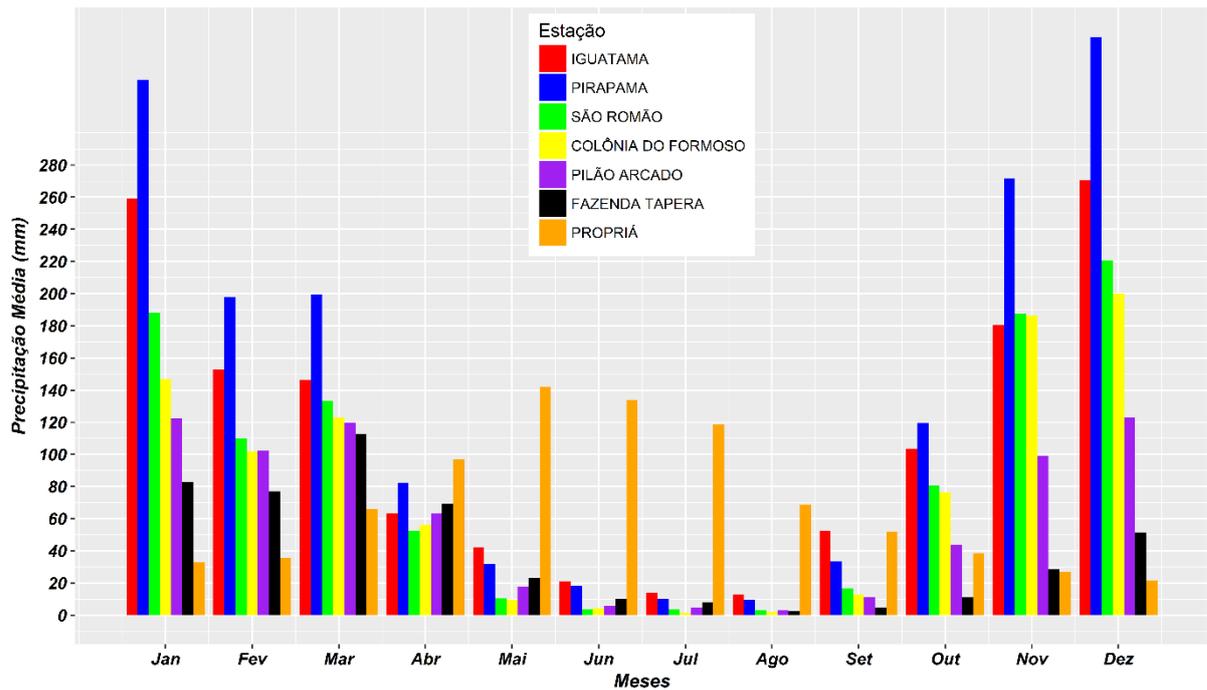
Sub-região	Estação	Precipitação média anual (mm)
Alto	Iguatama	1317,66
Alto	Pirapama	1666,06
Médio	São Romão	1009,54
Médio	Colônia do Formoso	920,11
Médio	Pilão Arcado	715,87
Sub-médio	Fazenda Tapera	481,12
Baixo	Propriá	832,77

Fonte: O próprio autor.

É possível verificar que os valores da precipitação média anual para cada estação estão de acordo com os valores indicados na literatura e também com o esperado para os climas referentes a cada sub-região da BHSF.

A Figura 3.1 mostra o comportamento das médias mensais para os dados correspondentes ao período de estudo (46 anos).

Figura 3.1. Valores médios de precipitação para as 7 estações da BHSF.



Fonte: O próprio autor.

Analisando a Figura 3.1, pode-se observar que as maiores médias de chuva na região do baixo São Francisco (estação Propriá) ocorrem nos meses de abril a julho. Já o comportamento das médias pluviométricas das demais estações que estão no alto, médio e sub-médio São Francisco seguem um comportamento inverso, onde os meses com maiores médias vão de novembro a janeiro, conforme registrado historicamente pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017).

As estatísticas para análise inicial da precipitação estão expostas nas tabelas do Apêndice A (Tabelas A.1 a A.7). Os cálculos de média, desvio, valores extremos (máximos e mínimos), assimetria e curtose foram feitos para o acumulado mensal das precipitações para cada estação, durante o período de 1970 a 2015.

Para as estações Iguatama, Pirapama, São Romão, Colônia do Formoso e Pilão Arcado notou-se uma definição clara dos períodos com ou sem chuva, ou seja,

choveu nos meses de novembro a março e houve ausência de chuva no período de abril a outubro, confirmando as características das regiões do alto e do médio São Francisco.

Para a estação Fazenda Tapera, pertencente à região do sub-médio, percebeu-se uma ausência de chuva praticamente durante todo o ano, estando de acordo com o esperado para essa sub-região da bacia que predomina o clima semiárido, com exceção para o mês de março, que apresentou uma precipitação média de 112,58 mm.

Pelas estatísticas descritivas da estação Propriá, que corresponde à região do baixo São Francisco, percebeu-se a ocorrência de chuva nos meses de maio a julho e ausência de chuva em todo o restante do ano, como é esperado para essa sub-região.

Verificou-se, em todas as estações, que os valores do desvio padrão foram elevados, evidenciando uma grande variação nos valores da precipitação, assim, estatisticamente, a variabilidade dos dados de precipitação se mostra inadequada para auxiliar num planejamento agrícola ou dimensionamento de projetos de irrigação, incentivando dessa forma estudos estatísticos mais aprofundados, objetivando obter dados mais confiáveis.

A assimetria é uma medida que avalia o grau de simetria de uma distribuição de frequência em relação à média. Infelizmente, a distribuição da maioria das variáveis hidrológicas apresenta algum grau de assimetria, sendo uma delas a precipitação mensal total. Em relação à curtose, observou-se que na maioria dos casos a distribuição empírica dos dados tem caudas mais pesadas, com exceção do mês de dezembro para a estação Iguatama que ficou bem ajustada com distribuições que possuem caudas mais leves.

A precipitação máxima provável (PMP) é uma medida que é usada como medida limite de contingência para construção de barragens, sistemas de escoamento de águas pluviais e armazenamentos de reservatórios, a fim de que estes resistam a possíveis eventos extremos de chuva (CASAS et al., 2010).

Na Tabela 3.5 estão expostos os valores da PMP e do fator de frequência K calculados para as 7 estações pluviométricas escolhidas para a avaliação da PMP.

Tabela 3.5. Valores da PMP e do fator de frequência.

<b>Estação</b>	<b>PMP</b>	<b>K</b>
Iguatama	178,05	3,78
Pirapama	322,21	4,14
São Romão	190,65	3,75
Colônia do Formoso	175,99	3,59
Pilão Arcado	161,47	4,60
Fazenda Tapera	154,99	3,41
Propriá	110,20	2,48

Fonte: O próprio autor.

Observa-se na Tabela 3.5 um crescimento do valor da PMP na direção jusante do Rio São Francisco. Mesmo que as condições atuais da bacia estejam mais próximas da ideia de diminuição de chuvas, levando aos órgãos de gestão de recursos hídricos do São Francisco a executar medidas como a diminuição da vazão do rio, sempre vai existir a possibilidade de ocorrência de um evento extremo.

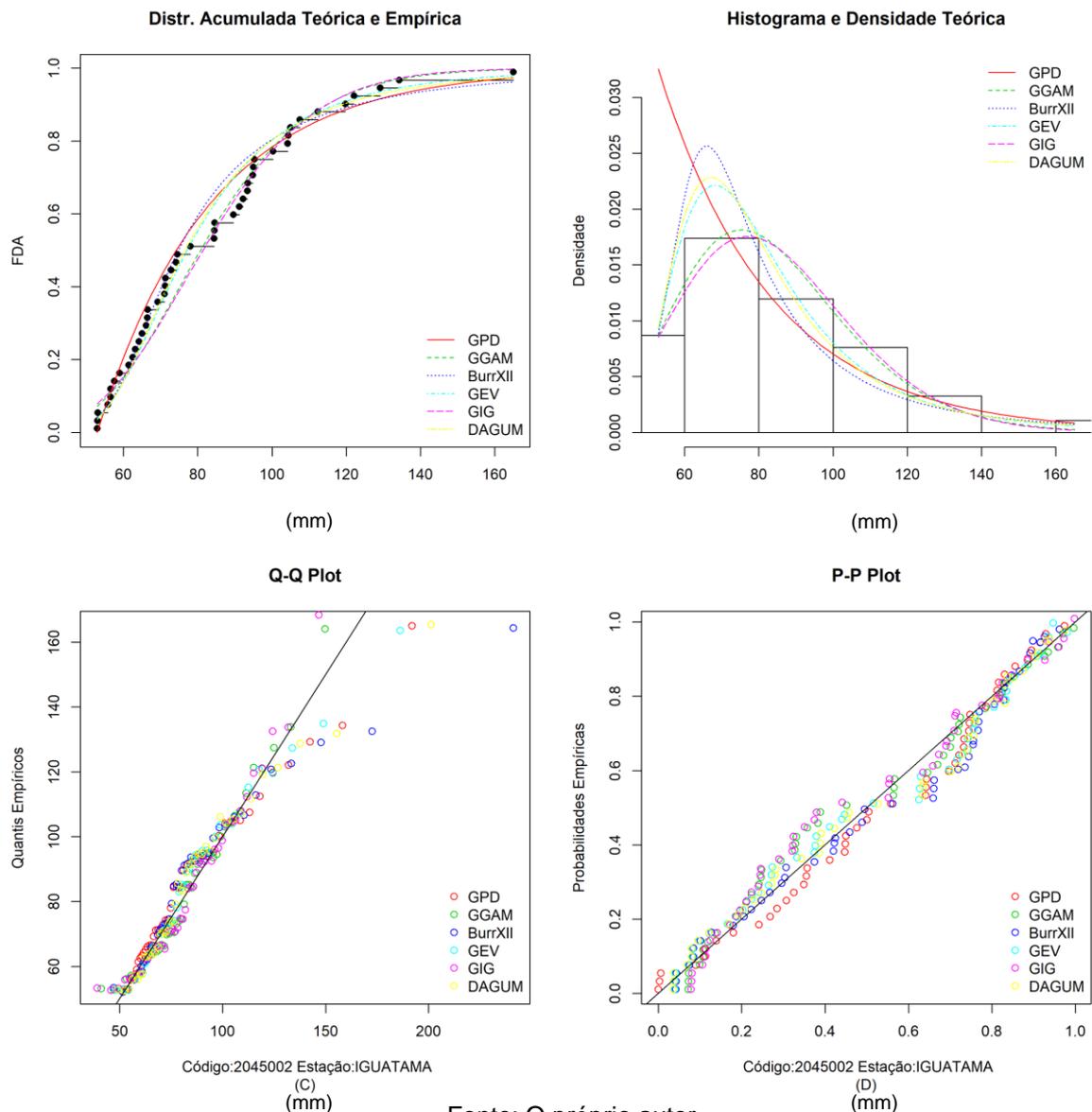
Contudo, se a condição de diminuição de chuva for uma possível realidade futura, a PMP pode auxiliar nessa avaliação. Além disso, como a PMP é um valor associado aos máximos por definição, para caracterizar seu comportamento probabilístico, pode-se ajustar modelos de probabilidade para encontrar o tempo de retorno de que algum evento possa ocorrer.

O ajuste de distribuições é um processo comum em estudos estatísticos e consiste na escolha de um modelo probabilístico que modele a variável assim como a estimação dos parâmetros desses modelos. A metodologia de escolha muitas vezes faz uso de processos iterativos e julgamento de resultados. A amostra do atual trabalho consiste do máximo de cada um dos 46 anos sob estudo. E para o ajuste foram utilizadas as seguintes distribuições: Pareto Generalizada, Gama Generalizada, BurrXII, Generalizada de Valores Extremos, Gaussiana Inversa e Dagum. O ajuste foi realizado por máxima verossimilhança, de acordo com o artigo de Delignette-Muller & Dutang (2015).

Uma técnica que pode auxiliar na escolha da distribuição é o método gráfico apresentado nas figuras a seguir (Figuras 3.2 a 3.8), permitindo verificar qual o comportamento de cada distribuição em relação aos dados.

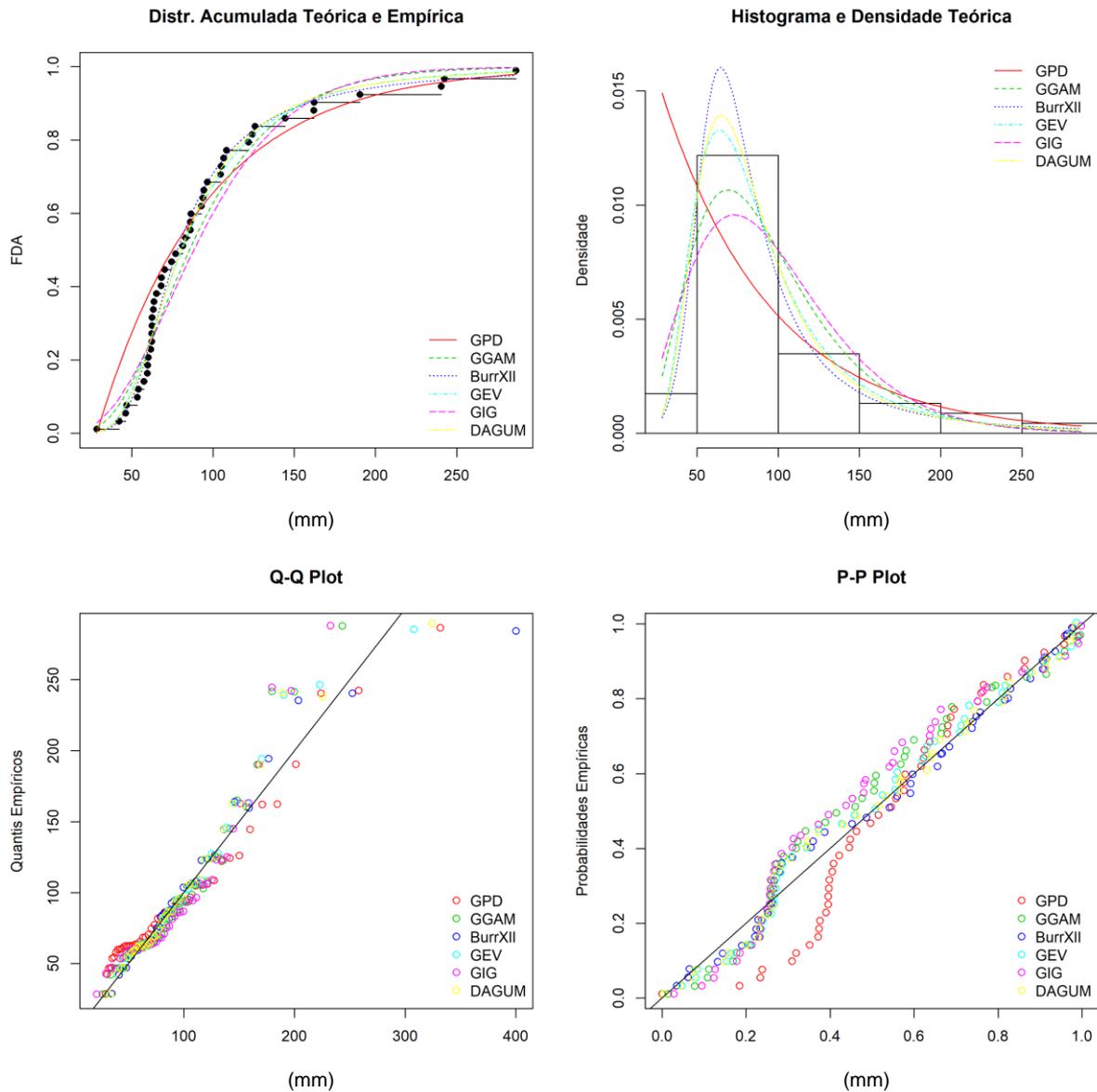
Para cada estação são apresentados quatro gráficos que devem ser avaliados conjuntamente. Primeiramente, tem-se um gráfico da Função Distribuição Acumulada (FDA), no qual é plotado tanto a distribuição empírica quanto a ajustada; um gráfico representando a função de densidade da distribuição ajustada juntamente com o histograma da distribuição empírica; um gráfico Q-Q onde é plotado os quantis empíricos (eixo y) contra os quantis teóricos (eixo x); e, finalmente um gráfico P-P onde é plotado a função de distribuição empírica avaliada em cada ponto de dados (eixo y) contra a função de distribuição ajustada (eixo x).

Figura 3.2. Ajustes das distribuições para a estação Iguatama.



Para a estação Iguatama, as distribuições GIG e GGAM se ajustam bem os quantis centrais e a cauda superior, mas não a cauda inferior. As distribuições GPD, GEV e Dagum mostram um bom ajuste para os quantis baixos, mas não se ajustam bem ao restante dos dados. Já a BurrXII mostra um melhor desempenho nos quantis baixos. Para o histograma e densidades teóricas, a GPD afasta-se da forma da distribuição dos dados nas classes iniciais do histograma, mas as demais seguem bem o comportamento dos dados. As distribuições GGAM e GIG possuem uma forma cujo desenho está mais próximo dos limites superiores da distribuição empírica. Para o Q-Q Plot, observam-se que as distribuições GIG e a GGAM descrevem melhor a cauda superior, enquanto a BurrXII ajusta melhor no centro da distribuição.

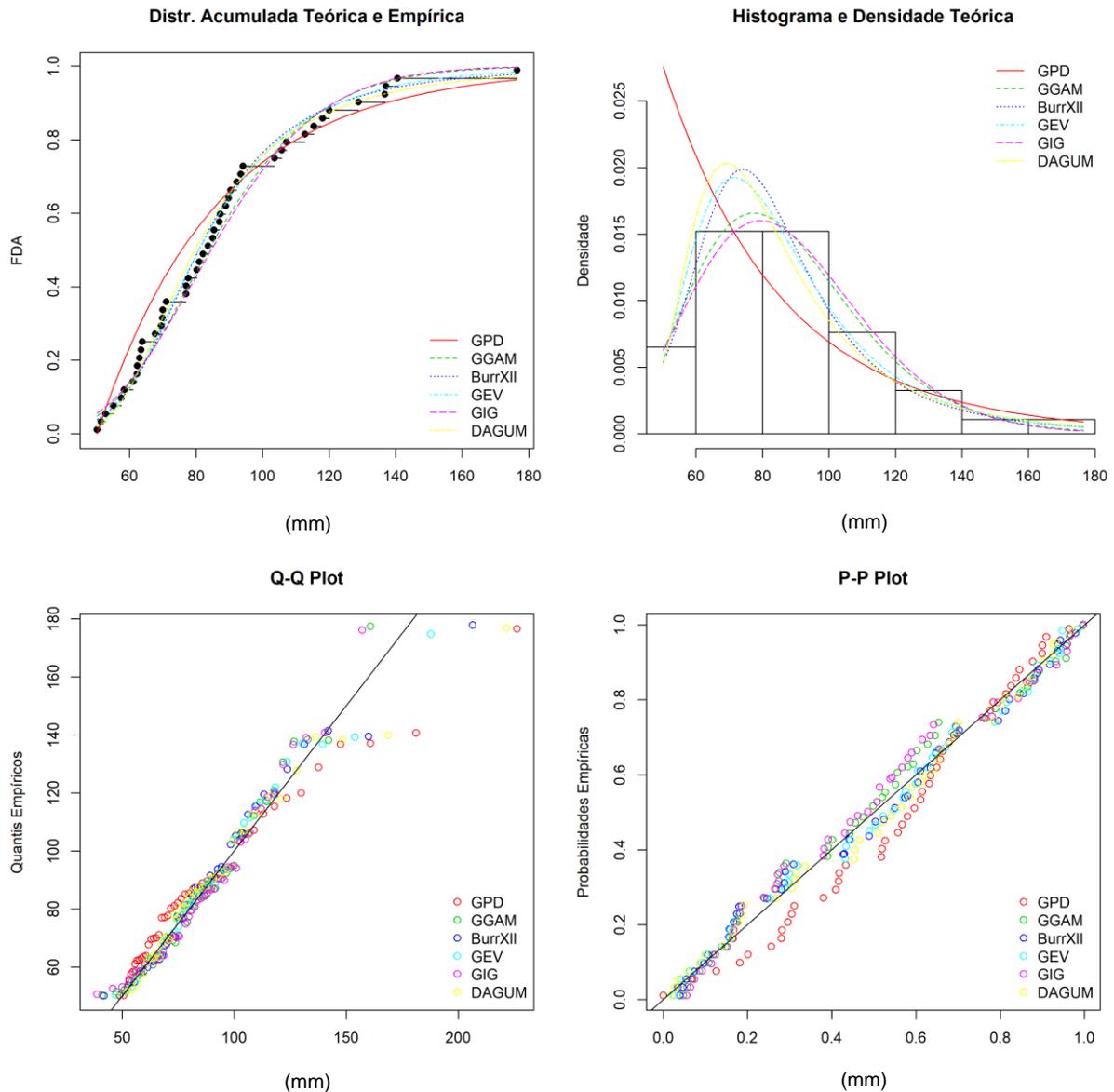
Figura 3.3. Ajustes das distribuições para a estação Pirapama.



Fonte: O próprio autor.

Para a estação Pirapama, observa-se que as distribuições BurrXII, GEV e Dagum se ajustam bem aos dados ao longo da distribuição, sendo a BurrXII a que melhor se ajusta. Entretanto, as distribuições GPD, GIG e GGAM não se ajustam bem aos dados. A forma das distribuições GEV e Dagum se assemelham bastante com a forma da distribuição empírica, sendo a BurrXII mais leptocúrtica na classe modal. A distribuição que melhor se ajusta a cauda superior é a GEV conforme apresenta o gráfico do Q-Q Plot, enquanto que pelo gráfico do P-P Plot nenhuma das distribuições se ajustam bem a parte central da distribuição dos dados.

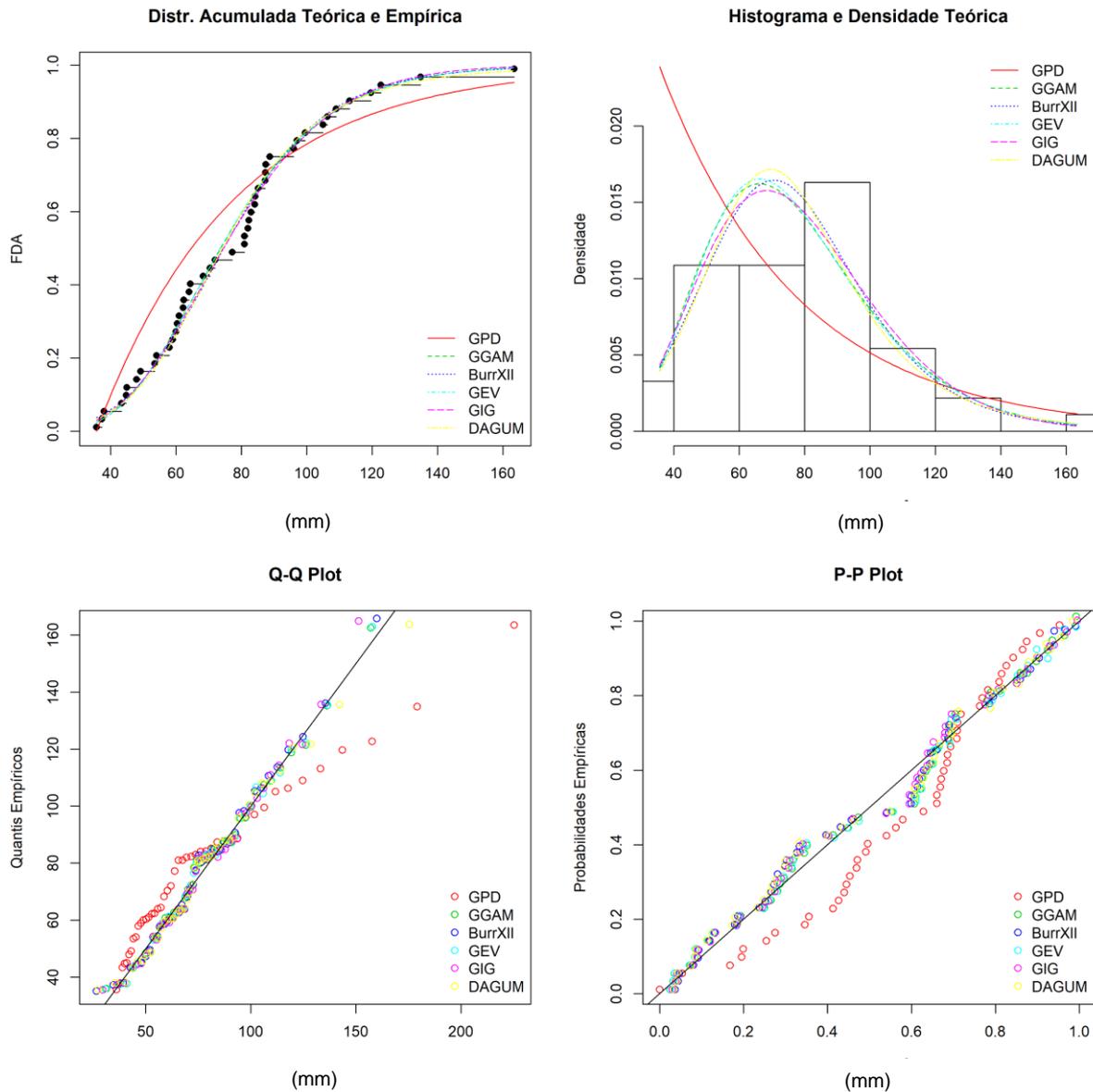
Figura 3.4. Ajustes das distribuições para a estação São Romão.



Fonte: O próprio autor.

Para os ajustes da estação São Romão, é possível observar no gráfico da FDP que todas as distribuições escolhidas se ajustam bem a cauda inferior, com exceção para a distribuição GPD. Na parte central da curva os melhores ajustes estão por conta das distribuições GGAM e GIG. Já as distribuições GEV, BurrXII e Dagum se ajustam melhor as caudas superiores. A forma das densidades de todas as distribuições, exceto para a GPD, segue o comportamento da distribuição empírica. Observando o Q-Q Plot, nota-se que GEV satisfaz melhor os dados da cauda da distribuição. Observando o P-P Plot, a distribuição GGAM ajusta melhor o centro da distribuição.

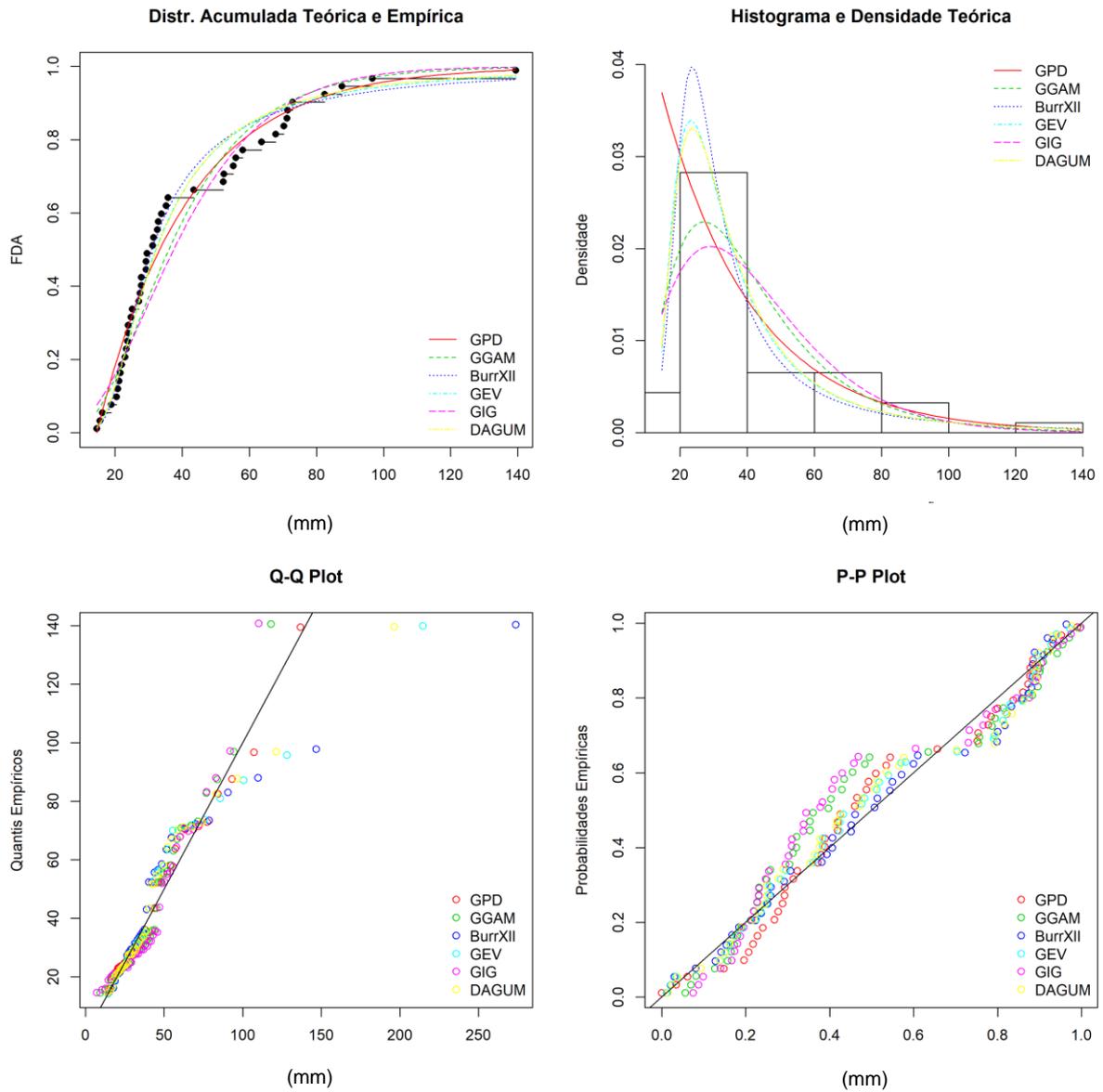
Figura 3.5. Ajustes das distribuições para a estação Colônia do Formoso.



Fonte: O próprio autor.

Para a estação Colônia do Formoso, o gráfico da FDA mostra que todas as distribuições, exceto a GPD, adequam-se as caudas superior e inferior, mas nenhuma se adequa bem aos dados do centro da distribuição como se observa no gráfico P-P Plot. A forma de todas as distribuições se assemelham ao comportamento dos dados com a exceção da GPD. Mas observando o gráfico de Q-Q Plot as distribuições se ajustam bem a cauda superior.

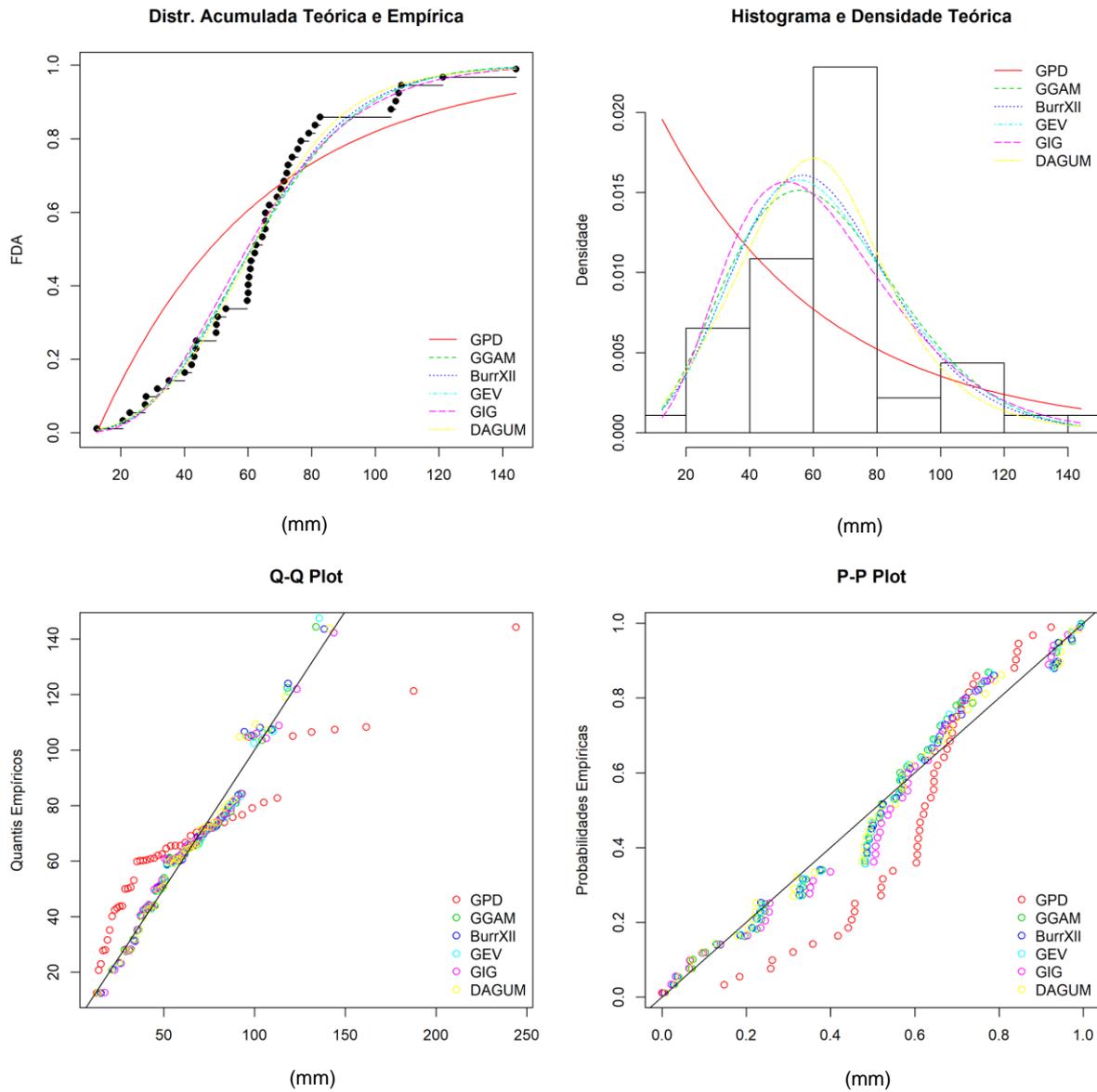
Figura 3.6. Ajustes das distribuições para a estação Pilão Arcado.



Fonte: O próprio autor.

Para a estação Pilão Arcado, tem-se que as distribuições BurrXII, GEV e Dagum se adequam bem aos dados da cauda superior, nenhuma delas se ajusta bem aos valores do centro dos dados conforme observado no gráfico P-P Plot. Apenas a GPD tem um bom ajuste na cauda superior segundo observado no gráfico quantil-quantil.

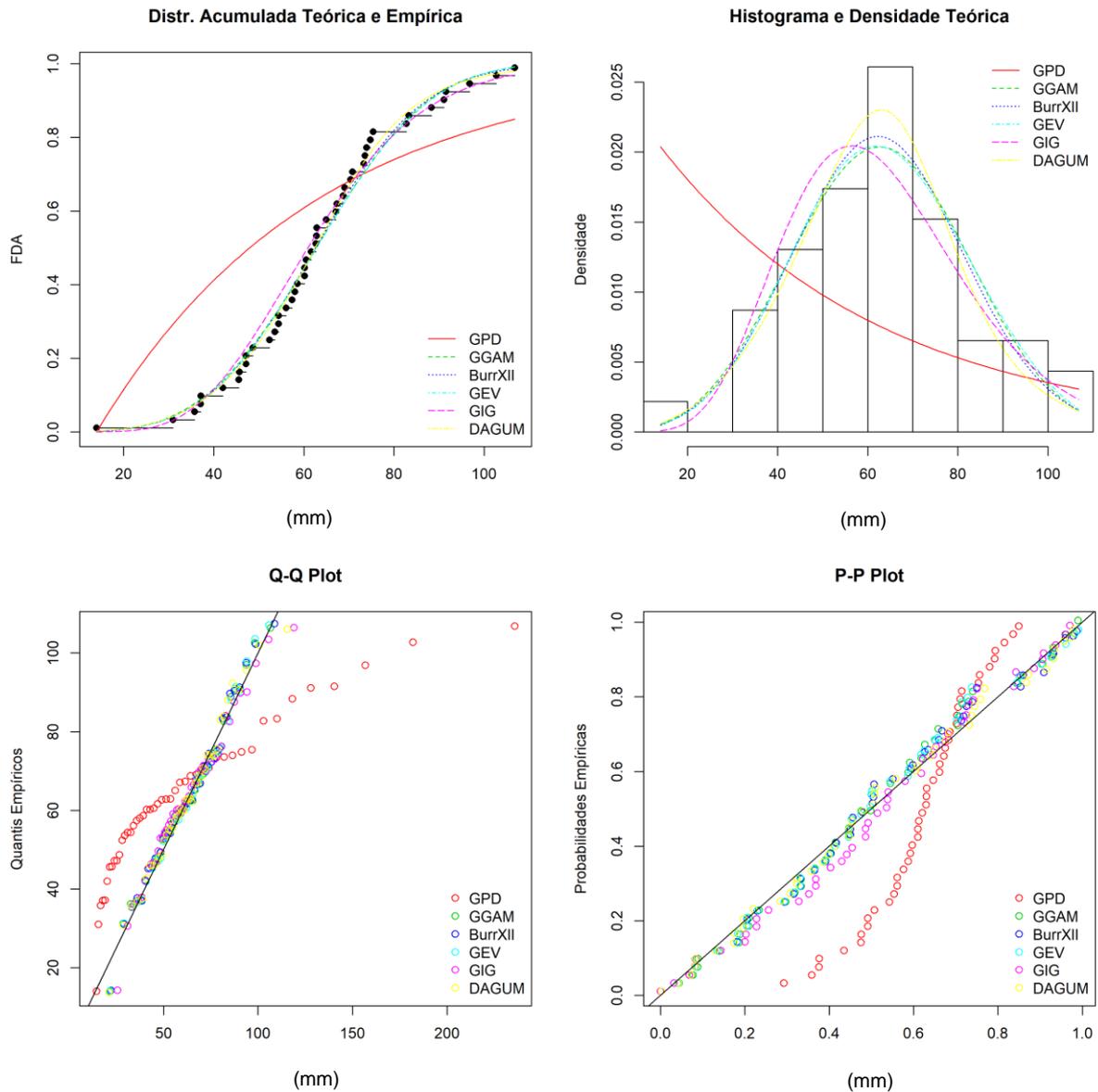
Figura 3.7. Ajustes das distribuições para a estação Fazenda Tapera.



Fonte: O próprio autor.

Para a estação Fazenda Tapera, observando os gráficos dos ajustes, tem-se que todas as distribuições se ajustam bem as caudas superior e inferior, conforme é mostrado no gráfico Q-Q Plot, com exceção da GPD. Em relação ao centro da distribuição, pode-se afirmar que nenhuma das distribuições se ajusta bem aos dados, o que é ratificado observando o gráfico P-P Plot.

Figura 3.8. Ajustes das distribuições para a estação Propriá.



Fonte: O próprio autor.

Para os dados da estação Propriá, todas as distribuições se ajustam bem aos dados ao longo de toda a distribuição, com exceção da GPD. Em relação a cauda superior e o centro da distribuição, pode-se observar que todas as distribuições se ajustam bem, como confirmado pelos gráficos Q-Q Plot e P-P Plot, com exceção da distribuição GPD.

Para avaliar as distribuições mais adequadamente (Figuras 3.2 a 3.8) foram calculadas medidas de ajuste para cada modelo de probabilidade escolhido e para cada uma das estações pluviométricas. Os resultados estão expostos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Medidas de qualidade de ajuste para as estações da BHSF.

Medidas	Estação	Distribuições de Probabilidade					
		GPD	GGAM	BurrXII	GEV	GIG	Dagum
KS	Iguatama	0,12	0,11	0,14	<b>0,11</b>	0,12	0,12
CVM		0,11	0,09	0,11	<b>0,09</b>	0,10	0,09
AD		1,15	0,56	0,66	<b>0,49</b>	0,62	0,50
AIC		<b>412,96</b>	423,26	423,92	420,39	424,60	420,58
BIC		<b>418,45</b>	428,74	429,41	425,88	430,09	426,06
KS	Pirapama	0,22	0,11	<b>0,09</b>	0,09	0,13	0,09
CVM		0,45	0,16	<b>0,05</b>	0,07	0,24	0,06
AD		Inf	0,98	<b>0,29</b>	0,42	1,44	0,38
AIC		484,92	477,46	<b>471,42</b>	472,85	482,04	472,35
BIC		490,41	482,94	<b>476,91</b>	478,34	487,52	477,84
KS	São Romão	0,15	0,09	0,08	<b>0,08</b>	0,10	0,08
CVM		0,23	0,05	0,04	<b>0,04</b>	0,07	0,05
AD		1,52	0,36	0,29	<b>0,23</b>	0,47	0,28
AIC		430,47	431,77	432,31	<b>429,63</b>	433,18	430,41
BIC		435,96	437,26	437,80	<b>435,12</b>	438,67	435,89
KS	Colônia do Formoso	0,20	0,11	0,10	0,11	<b>0,10</b>	0,11
CVM		0,45	0,05	0,05	0,05	<b>0,04</b>	0,06
AD		2,56	0,24	0,26	0,26	<b>0,23</b>	0,30
AIC		441,61	<b>434,57</b>	435,89	434,88	434,85	436,45
BIC		447,09	<b>440,05</b>	441,38	440,37	440,33	441,94
KS	Pilão Arcado	<b>0,11</b>	0,16	0,13	0,12	0,18	0,12
CVM		<b>0,12</b>	0,25	0,07	0,09	0,32	0,10
AD		<b>0,96</b>	1,28	0,49	0,53	1,62	0,58
AIC		<b>401,26</b>	409,78	404,39	403,79	414,08	403,90
BIC		<b>406,74</b>	415,26	409,88	409,28	419,57	409,39
KS	Fazenda Tapera	0,27	0,13	0,14	0,13	0,16	<b>0,13</b>
CVM		1,03	0,11	0,09	0,10	0,13	<b>0,07</b>
AD		5,43	0,59	0,52	0,55	0,68	<b>0,42</b>
AIC		459,98	435,27	434,71	435,14	436,12	<b>433,82</b>
BIC		465,47	440,76	440,19	440,63	441,61	<b>439,30</b>
KS	Propriá	0,35	0,09	0,08	0,09	0,09	<b>0,06</b>
CVM		1,66	0,04	0,04	0,04	0,07	<b>0,02</b>
AD		8,31	0,29	0,24	0,27	0,43	<b>0,18</b>
AIC		456,13	407,10	406,94	406,50	410,77	<b>406,89</b>
BIC		461,61	412,58	412,43	411,99	416,26	<b>412,38</b>

Fonte: O próprio autor.

As estatísticas de bondade de ajuste medem a diferença entre  $F_n(x)$  e  $F(x)$  e são desenvolvidas com base na distância em módulo  $|F_n(x) - F(x)|$  ou no quadrado da distância  $(F_n(x) - F(x))^2$ . Dessa forma, quanto melhor for o ajuste, menor será o valor da estatística calculada. Além dessas estatísticas foram usados os critérios de informação de Akaike – AIC (*Akaike Information Criterion*) e o critério de informação Bayesian – BIC (*Bayesian Information Criterion*).

Na Tabela 3.6 pode ser visto (destacado em vermelho) que não houve uniformidade nos ajustes, ou seja, para cada estação uma distribuição distinta foi melhor ajustada. Os resultados encontrados para cada estação foram:

- Estação Iguatama: a distribuição GEV seria escolhida segundo os critérios de KS, CVM e AD; e GPD pelos critérios AIC e BIC.
- Estação Pirapama: a distribuição BurrXII seria escolhida segundo todos os critérios.
- Estação São Romão: a GEV seria a distribuição escolhida por todos os critérios.
- Estação Colônia do Formoso: a distribuição GIG seria escolhida segundo os critérios KS, CVM e AD. Usando os critérios AIC e BIC seria escolhida a distribuição GGAM.
- Estação Pilão Arcado: segundo os critérios KS, AIC e BIC a distribuição escolhida seria a GPD, enquanto a BurrXII seria escolhida pelos critérios CVM e AD.
- Estação Fazenda Tapera: a distribuição Dagum seria escolhida segundo todos os critérios.
- Estação Propriá: seria escolhida a distribuição Dagum pelos critérios KS, CVM e AD, enquanto a distribuição GEV seria escolhida usando os critérios AIC e BIC.

Assim, é possível adotar como método de escolha da melhor distribuição para uma dada estação, aquela que apresentar maior número de critérios a seu favor. Logo, as escolhas das distribuições seriam as seguintes: a distribuição GPD seria a melhor para a estação Iguatama, a BurrXII para Pirapama, a GEV para São Romão, a distribuição GGAM seria escolhida para a estação Colônia do Formoso, a GPD para Pilão Arcado e finalmente a Dagum seria escolhida para as estações Fazenda Tapera e Propriá.

Observando-se, por exemplo, para a estação Pirapama, que as diferenças nas medidas de bondade do ajuste são pequenas também para as distribuições GEV e Dagum, estas também poderiam ser candidatas como uma distribuição bem aderente aos dados desta estação.

As pequenas diferenças encontradas pelos critérios de bondade de ajuste poderiam ser explicadas pelas características geoclimáticas das regiões onde os pluviômetros estão instalados, como, por exemplo, nas semelhanças entre as estações Fazenda Tapera e Propriá, que além de pouca distância geográfica, são pertencentes ao semiárido brasileiro. As estações São Romão, Colônia do Formoso e Pilão Arcado, apesar de todas pertencerem a mesma região do médio São Francisco, estão bem distantes geograficamente umas das outras. Em especial, a estação São Romão está mais próxima do alto São Francisco e assim sofrendo influência do clima desta sub-região, enquanto Pilão Arcado está mais próxima do baixo São Francisco.

Usando todas as distribuições escolhidas, o valor representante do TR para as estações analisadas foi aquele calculado usando a distribuição que melhor se ajustou aos dados. Assim, os valores do TR, em anos, para as estações foram: 59 para Iguatama, 55 para Pirapama, 100 para São Romão, 259 para Colônia do Formoso, 229 para Pilão Arcado, 157 para Fazenda Tapera e 63 anos para Propriá.

Estas informações a respeito do TR são importantes para que os órgãos de gerenciamento e controle hidrológicos possam desenvolver medidas convenientes para este tipo de evento nos locais de maior chance de ocorrência de chuva extrema.

### 3.4. CONCLUSÕES

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é uma medida que busca estimar o evento mais extremo de chuva possível numa dada região em um certo momento do tempo por definição. Contudo, neste trabalho, os valores da PMP foram usados para avaliar o comportamento das chuvas em uma dada região e a utilização de modelos de probabilidade para o ajuste da PMP também auxilia na previsão da ocorrência de eventos extremos e seu possível período de retorno.

As estações escolhidas da BHSF estavam razoavelmente distantes entre si e representativas das sub-regiões da bacia, de maneira que os valores calculados da PMP juntamente com o ajuste de distribuições foram capazes de captar as características climatológicas das regiões onde os pluviômetros estão instalados.

Todavia, estes resultados indicam a necessidade de uma avaliação mais detalhada com a contribuição de dados de precipitação de outras estações e também de outras variáveis climáticas, além da precipitação. Além disso, a utilização de modelos mais elaborados resultantes do uso de outras técnicas físicas e estatísticas tais como análise multivariada de dados, DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*), teoria da entropia, análise de agrupamento, redes neurais artificiais, etc.

## **4. Evolução Temporal da Precipitação Máxima Provável da Bacia do Rio São Francisco**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

O regime hidrológico ou a produção de água de uma bacia hidrográfica é determinado por fatores de natureza climática como a precipitação, evaporação, temperatura, umidade do ar, vento, etc. Diante da escassez de água que existe atualmente, é reconhecida a importância de se estudar a distribuição e os modos de ocorrência da precipitação, por ser a principal variável na aplicação do balanço hídrico em uma dada região hidrológica, como uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2004).

O monitoramento de episódios hidrológicos extremos e a análise da precipitação são ferramentas importantes no gerenciamento de recursos naturais em áreas com grandes limitações hídricas como o semiárido brasileiro, presente em grande extensão na Bacia do Rio São Francisco (ALVALA et al., 2017; MARENGO et al., 2017).

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é definida como um limite superior da precipitação que corresponde a uma duração fisicamente possível de ocorrer sobre uma determinada região de drenagem (bacia hidrográfica) em uma dada época do ano. A determinação pode ser feita usando metodologias físicas ou através de técnicas estatísticas (WMO, 2012).

Os dados de chuva ajustados a uma distribuição de probabilidade possibilitam calcular o Tempo de Retorno (TR) que uma precipitação de certa magnitude possa ocorrer (RAMOS et al., 1989). Esse ajuste também auxilia na previsão de ocorrências ou ausências de chuvas em regiões com escassez de recursos hídricos, decorrentes de períodos de seca ou estiagem (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

O monitoramento de episódios hidrológicos extremos e a análise da precipitação são ferramentas importantes no gerenciamento de recursos naturais em áreas com grandes limitações hídricas como o semiárido brasileiro (ALVALA et al., 2017; MARENGO et al., 2017).

Diante disso, o objetivo desse trabalho é analisar a evolução temporal da PMP aplicando a técnica de Janelas Móveis (*Slide Windows*) em séries históricas de precipitação de 4 estações da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

## 4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.2.1 Área de Estudo

A área de estudo está situada na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) e os dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

Para os cálculos realizados nesse trabalho foram usadas 4 estações (uma estação de cada região da BHSF) com dados de precipitação diária de chuva, para o período de janeiro de 1970 a dezembro de 2015, o que corresponde a 46 anos de registros de chuva. A distribuição espacial dos dados foi estimada usando a Interpolação Ponderação pelo Inverso da Distância (SHEPARD, 1968). A Tabela 4.1 apresenta os dados cadastrais das estações escolhidas.

Tabela 4.1. Dados das estações escolhidas para estudo de seca da BHSF.

Sub-região	Latitude	Longitude	Código	Estação	Estado
Alto	-20,178889	-45,700278	2045002	Iguatama	MG
Médio	-10,002222	-42,474167	1042015	Pilão Arcado	BA
Sub-médio	-8,520278	-39,640833	839034	Fazenda Tapera	PE
Baixo	-10,215278	-36,823889	1036048	Propriá	SE

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2018).

### 4.2.2 Janelas Móveis

A técnica de janelas móveis (*Sliding Window Analysis – SWA*) não usa a abordagem tradicional de trabalhar com a série temporal completa, mas utiliza janelas de tempo que selecionam um novo conjunto de dados da série que será estudado. Para isso, a abordagem de janelas móveis calcula a estatística relevante que é capaz de identificar a dependência da série para a primeira janela de um comprimento especificado e, em seguida, pula a amostra de um ponto eliminando a primeira observação e incluindo o próximo ponto para estimar novamente a medida. Este

processo deve continuar até que a última observação seja usada (BARKHORDARIAN et al., 2013).

A janela é então movida para frente no tempo incrementalmente, gerando uma solução completa cada vez, resultando em estimativas múltiplas para os parâmetros da série (FOSTER et al., 2005).

Três parâmetros são necessários para definir uma janela e o processo de janelas móveis: (i) a posição da janela; (ii) a largura da janela e (iii) o incremento com o qual a janela avança no tempo.

O algoritmo para implementar a técnica de janelas móveis está descrito a seguir, de forma que a sequência ou a série temporal está representada como  $X_t$ , onde:

$$X_t = X_{t=1}, X_{t=2}, \dots, X_{t=N} \quad (4.1)$$

Com  $t = 1, 2, \dots, N$  como indicador do tempo.

Algoritmo:

1. Defina uma subsequência  $Z_s^k = \{X_s, X_{(s+1)}, \dots, X_{(s+k-1)}\}$  com  $s = 1, 2, \dots, N - k + 1$  e  $k$  é o tamanho da janela.
2. Para cada sequência  $Z_s^k$  estime uma estatística de interesse (média, mediana, desvio padrão, assimetria, curtose, etc.)
3. Construa a curva  $s$  e  $Z_s^k$ .

De acordo com Machiwal & Jha (2012), as séries temporais estacionárias têm a tendência de manter características probabilísticas independente do instante de tempo, de forma que para análise em janelas móveis as estatísticas calculadas devem ser as mesmas ao longo do tempo se a série for estacionária.

Neste estudo, o tamanho escolhido das janelas foi de 30 anos, baseado nas recomendações da Organização Meteorológica Mundial, que aponta o intervalo de tempo mínimo necessário para caracterização climática de uma região como sendo de 30 anos. As janelas foram calculadas para as séries históricas de chuva das 4 estações que tem 46 anos (de 1970 a 2015), com saltos de 1 ano para cada janela.

Os resultados foram calculados usando o software R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018).

### 4.2.3 Cálculo da PMP e Tempo de Retorno

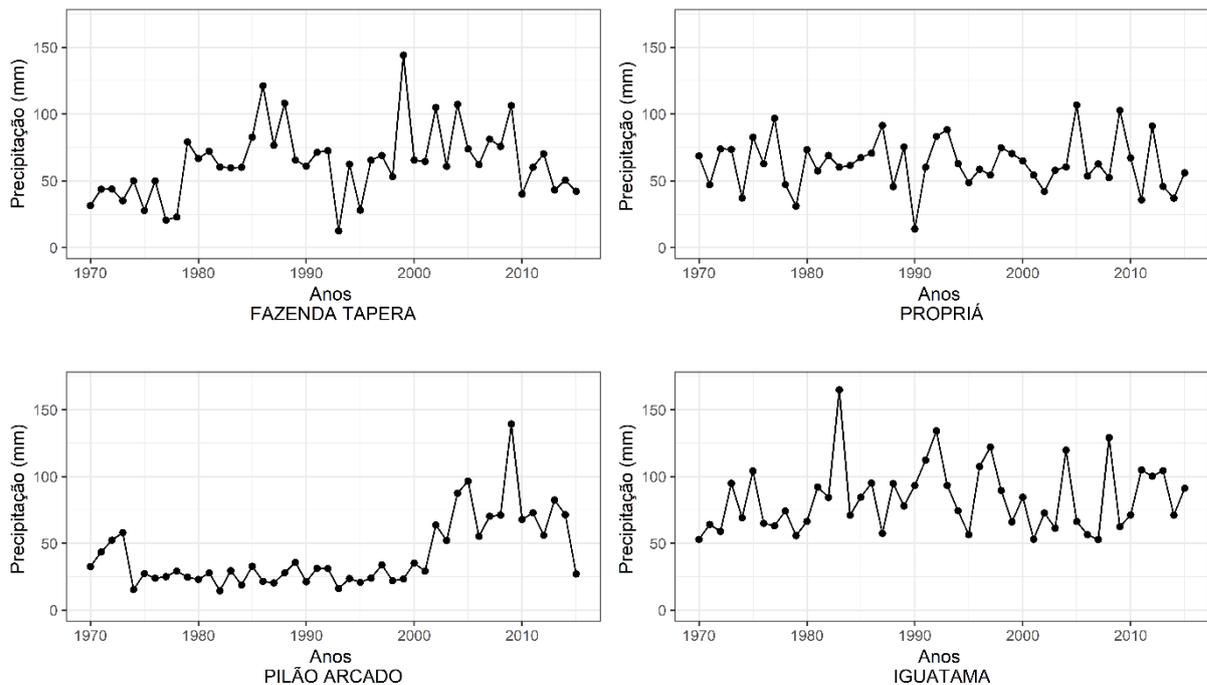
Para estudar a condição de diminuição ou aumento das chuvas para uma possível realidade futura, a Precipitação Máxima Provável (PMP) pode auxiliar nessa avaliação. Além disso, como a PMP é um valor associado aos máximos por definição, para caracterizar seu comportamento, modelos probabilísticos permitem encontrar o Tempo de Retorno (TR) de que algum evento possa ocorrer.

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é por definição a maior precipitação que é meteorologicamente possível em um determinado local, durante um determinado período de tempo (WMO, 2009). As equações que estimam a PMP e o cálculo do tempo de retorno estão descritos no Capítulo 3.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as 4 estações foram traçados gráficos com os valores máximos de precipitação (Figura 4.1).

Figura 4.1. Valores máximos anuais de precipitação para as 4 estações da BHSF.

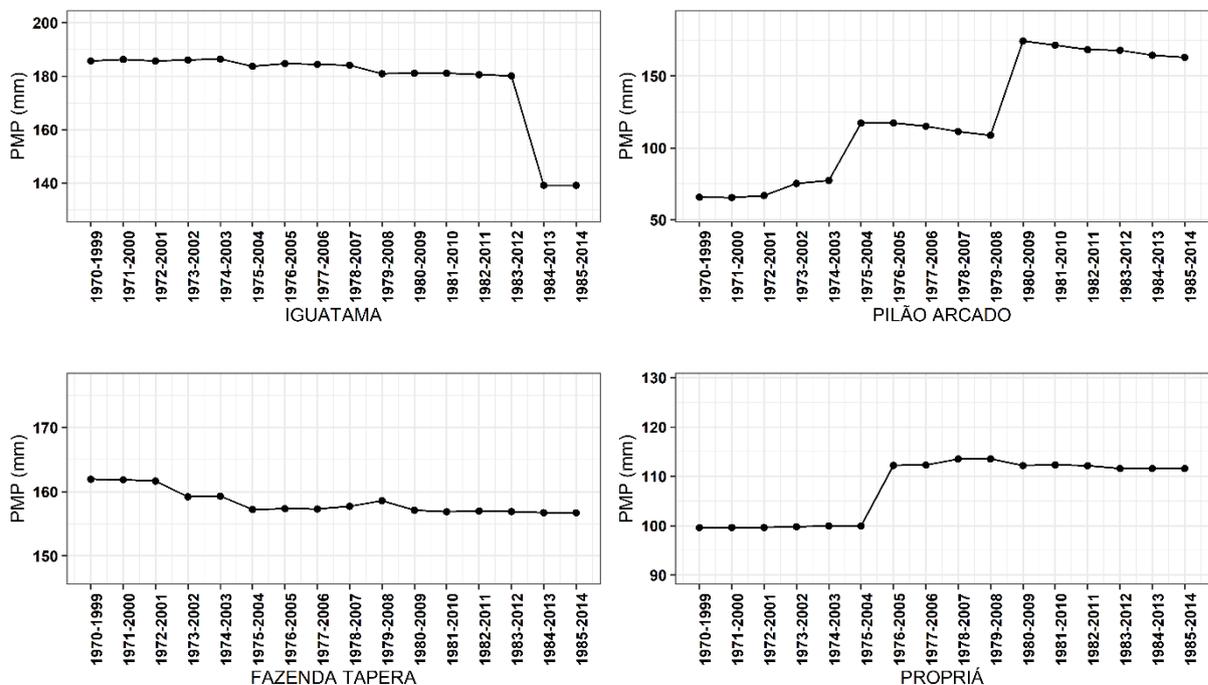


Fonte: O próprio autor.

Pela Figura 4.1, observa-se um crescimento dos valores de precipitação que vai do alto São Francisco em direção à foz do rio, no baixo São Francisco. Atualmente, as condições da bacia tendem para uma diminuição de chuvas, levando aos órgãos de gestão de recursos hídricos do São Francisco a executar medidas como a diminuição da vazão do rio, embora sempre exista a possibilidade de ocorrência de um evento extremo.

A Figura 4.2 mostra para as estações escolhidas gráficos de janelas móveis de 30 anos para a PMP das séries históricas da BHSF.

Figura 4.2. Janelas móveis de 30 anos para a PMP para as 4 estações da BHSF.



Fonte: O próprio autor.

Para a estação Iguatama, pertencente ao alto São Francisco, a PMP foi decrescendo lentamente ao longo dos anos e, em particular, entre os anos de 1983 a 2012, a série apresentou uma diminuição da PMP saindo de 185 mm para 140 mm e se estendeu até o ano de 2015.

Pela Figura 4.2, as séries das estações Pilão Arcado e Propriá apresentam um crescimento da PMP ao longo do tempo. Para Pilão Arcado, entre as janelas 1974-2003 e 1975-2004, e também entre 1979-2008 e 1980-2009, observou-se um aumento significativo da PMP, de 70-120 mm e de 110-170 mm, respectivamente.

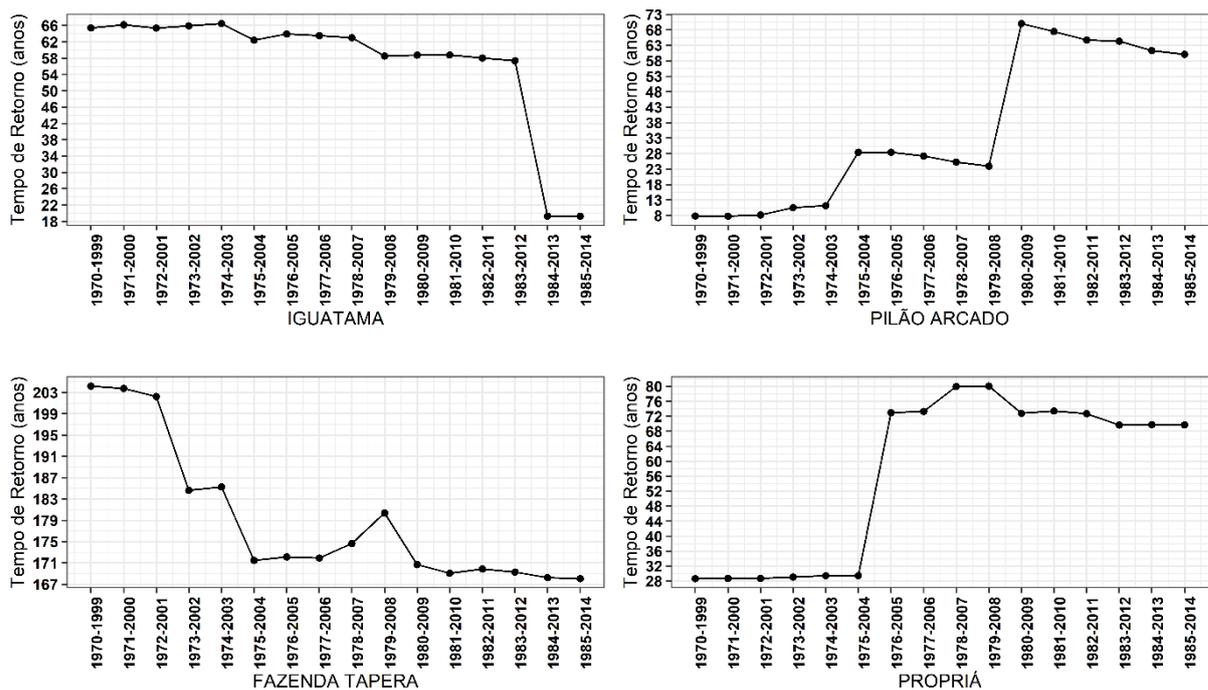
Para a estação Propriá, o valor da PMP se manteve constante em 100 mm até o ano de 2004, depois teve um aumento para um valor próximo de 112 mm e se manteve praticamente constante até a última janela que vai até o ano de 2015.

Para a estação Fazenda Tapera, observou-se um decréscimo da PMP. Para a janela 1974-2003, seu valor caiu de próximo de 162 mm para 157 mm. Em seguida, na janela 1979-2008 a PMP foi para 159 mm e voltou a cair para 157 mm permanecendo quase estável até 2015. Essa estação pertence ao sub-médio São Francisco e também da região do semiárido nordestino, cuja estiagem tem afetado significativamente essa região.

O aumento da PMP em Pilão Arcado e Propriá depois de 1974 poderia ser relacionado com uma maior ocorrência do fenômeno La Niña, (14 ocorrências até 2010) (INPE, 2018).

Para caracterizar o comportamento da PMP e encontrar o período em que algum evento extremo possa acontecer, é calculado o tempo de retorno (Figuras 4.3 e 4.4) a partir do ajuste das distribuições de probabilidade Dagum e Generalizada de Valores Extremos (GEV) das séries históricas de chuva. A Tabela 3.2 exibiu a função de distribuição acumulada, o suporte e os parâmetros para as distribuições Dagum e GEV, que foram escolhidas de acordo com os ajustes realizados no Capítulo 3.

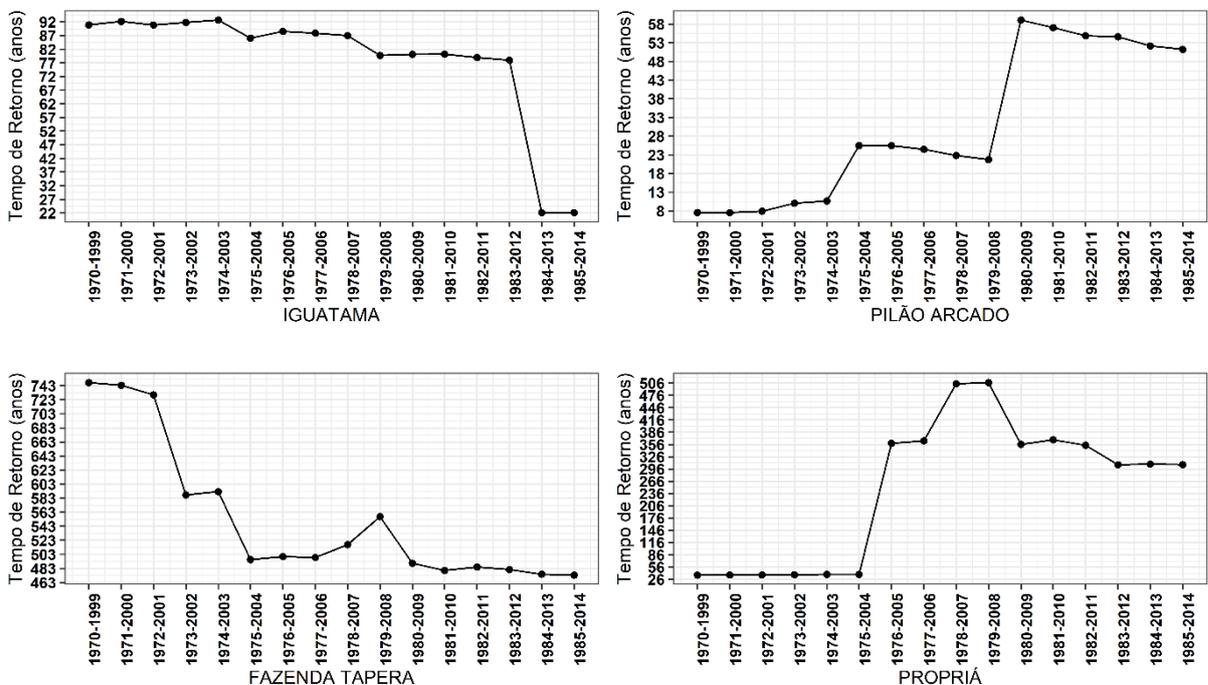
Figura 4.3. Tempo de retorno usando a distribuição Dagum para as 4 estações da BHSF.



Fonte: O próprio autor.

Ao observar a Figura 4.3 nota-se também que a variação dos tempos em cada uma das estações é diferente. As variações entre janelas para a estação Iguatama são menores indicando uma regularidade das chuvas ao longo do tempo enquanto nas demais existem maiores variações com a presença de tendências de crescimento (Pilão Arcado e Propriá) e decrescimento (Fazenda Tapera). Uma peculiaridade que se observa para as estações Pilão Arcado e Propriá dentro do contexto de variação é a alternância de períodos constantes e com saltos crescentes em 1975 para ambas estações e em 1980 para a estação Pilão Arcado.

Figura 4.4. Tempo de retorno usando a distribuição GEV para as 4 estações da BHSF.



Fonte: O próprio autor.

Nota-se na Figura 4.4 que o tempo de retorno da PMP obtido a partir da distribuição Dagum para as estações Iguatama, Pilão Arcado e Propriá apresentam valores entre 8 e 73 anos, enquanto a estação Fazenda Tapera tem variação entre os valores 167 e 205 anos. Observando a figura em função da região onde estão localizadas as estações, os valores mais baixos de tempo de retorno são esperados para as regiões que apresentam maiores médias de precipitação e desta forma a possibilidade de ocorrência de um evento é maior.

Para a estação Fazenda Tapera que está localizada no sub-médio São Francisco, os valores do tempo de retorno são maiores em decorrência da escassez de chuva.

Essas observações indicam a possibilidade de presença de algum evento climático, provavelmente La Niña em 1975, que motivou esta variação brusca nos valores do tempo de retorno.

Observando a Figura 4.4, nota-se que o ajuste através da distribuição GEV não exibe grandes diferenças em relação ao que foi observado no ajuste mostrado pelo modelo Dagum. As mesmas variações e tendências entre janelas também são constatados, ratificando que foi captado pelo processo estatístico de ajuste.

O Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC), entidade criada em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), publicou no Grupo de Trabalho 2 (IPCC, 2001) alguns resultados que apresentam estudos sobre variabilidade e mudanças no clima desde 1996, observando que variações em chuvas e vazões de rios no Nordeste apresentam uma variabilidade interanual e em escalas de tempo interdecadal, que está associada a padrões de variação da mesma escala de tempo nos oceanos Pacífico e Atlântico, como a variabilidade interanual associada a El Niño Oscilação Sul, ENOS, ou a variabilidade decadal do Pacífico, do Atlântico e a variabilidade do Atlântico Tropical e do Atlântico Sul (MMA, 2007).

Sobre o Nordeste, o relatório publicou que tem sido observado um ligeiro aumento de chuvas a longo prazo, mas a tendência não é estatisticamente significativa. Estudos sobre mudanças nos extremos de clima (chuvas, temperaturas e tempestades) são poucos e os resultados têm sido comprometidos devido à qualidade ou ausência de informação climatológica diária confiável (MMA, 2007). Os resultados da PMP obtidos com a utilização de janelas móveis estão de acordo com estas tendências, crescimento da PMP ao longo do tempo durante o período analisado.

#### 4.4. CONCLUSÕES

A técnica de Janelas Móveis trabalha com blocos de tempo em séries históricas e estuda uma medida, tal como a Precipitação Máxima Provável (PMP), avaliando o seu comportamento ao longo do tempo. A PMP busca estimar o evento mais extremo de chuva possível numa dada região em um certo momento do tempo. Além do cálculo da PMP, o ajuste da mesma usando distribuições de probabilidade permite prever a ocorrência de eventos extremos e seu período de recorrência.

A técnica permitiu estudar o comportamento de cada estação escolhida e associar com as particularidades climáticas presentes em cada sub-região.

Os resultados encontrados para os tempos de retorno usando os ajustes das distribuições escolhidas mostraram uma variabilidade nos valores que correspondem às diferenças específicas de cada estação, principalmente no que diz respeito à quantidade média de precipitação apresentada.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A gestão de recursos hídricos por parte dos órgãos reguladores como o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco criado pelo Decreto Nº 8.834, de 9 de agosto de 2016 necessita de informações para elaboração de ações, projetos e controle do uso da água de forma a preservar este recurso valioso para todos os seus consumidores como no abastecimento de cidades e na geração de energia elétrica.

O consumo feito de forma adequada requer informações relevantes como o conhecimento das probabilidades de ocorrência das chuvas, sabendo-se que a chuva é a principal forma de precipitação no Brasil. A utilização de funções de distribuição de probabilidade permite estimar a ocorrência de chuvas, sendo uma forma de compreender os fenômenos meteorológicos para determinar seus padrões de ocorrência e possibilitar uma previsão razoável do comportamento climático de uma região, auxiliando no gerenciamento de diversas atividades humanas e agropecuárias (RAMOS et al., 1989; NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Foram estudadas séries históricas de precipitação para diversas estações da BHSF, contendo dados diários de chuva com 46 anos de duração de 1970 a 2015, com finalidade de analisar a variável precipitação, quer seja para estudar períodos de seca, quer seja para estudar períodos chuvosos.

### **5.1. Estudo de seca usando o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Cadeias de Markov**

Nessa etapa foram escolhidas 4 estações de cada sub-região da BHSF. Foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizado e cadeias de Markov para estudar o comportamento climático, através da análise de probabilidade para cada classe climática (seca extrema, seca severa, seca moderada, seca leve e chuvosa), tempo de recorrência e valor esperado do tempo de permanência em cada classe. As escalas de tempo utilizadas foram de seis e doze meses e cada uma possui sua finalidade específica. Enquanto a escala de seis meses auxilia para a preconização e observação de seca agrícola, a escala de doze meses serve para a avaliação de seca hidrológica (WMO, 2012).

Correlacionando os resultados da matriz de transição com as probabilidades da distribuição estacionária foi possível apontar as regiões que possuem maior chance de

no momento futuro estarem sob clima chuvoso ou sob condições de seca, confirmando a predisposição do semiárido em apresentar maiores chances de períodos futuros de estiagem ou de seca.

## **5.2. Estudo da precipitação máxima provável e tempo de retorno usando diversas distribuições de probabilidade**

Nesse estudo foram escolhidas 7 estações da BHSF. Primeiramente, foram usadas análises descritivas para estudar o comportamento da precipitação nas regiões da BHSF e auxiliar na compreensão dos fenômenos de chuva de cada sub-região.

Em seguida, foram ajustados modelos de probabilidade aos dados das séries históricas e obtidos a partir destes modelos os valores do tempo de retorno (TR). Foram usados métodos gráficos e numéricos de bondade para avaliar os ajustes dos modelos escolhidos e também técnicas numéricas com o intuito de verificar se as distribuições ajustadas estavam bem aderentes aos dados.

Com os resultados obtidos, foi possível notar as diferenças existentes entre as estações, evidenciando as diversidades climáticas e fisiográficas nas quais o Velho Chico está inserido. Essas análises podem auxiliar o gestor a elaborar planos de contingências mais abrangentes e que permitam dar cobertura nas sub-regiões.

## **5.3. Estudo da precipitação máxima provável com janelas móveis de 30 anos**

A abordagem de janelas móveis foi usada para estudar a PMP de 4 estações escolhidas das sub-regiões da Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF). A variável PMP foi usada para estudar o comportamento dos fenômenos de chuva e auxiliar no entendimento das características climáticas de cada sub-região da bacia.

Correlacionando o resultado dos máximos de precipitação com os gráficos das janelas de 30 anos da PMP para as 4 séries históricas, foi possível caracterizar a medida PMP ao longo do tempo, associando às condições climáticas específicas de cada sub-região da BHSF. Além disso, os tempos de retorno obtidos a partir dos ajustes mostraram uma grande variação em relação às estações com tendências de crescimento ou decréscimo, apontando a possibilidade de que eventos extremos

de chuva possam ocorrer e confirmando a importância de se estudar as estações de acordo com suas características climáticas.

#### **5.4. Trabalhos futuros**

Após as análises aqui realizadas, propõe-se que todos os cálculos sejam realizados para as 421 estações da BHSF, cujos dados foram coletados inicialmente para este estudo. Além disso, sugere-se a utilização de outras técnicas estatísticas tais como análise geoestatística e multivariada de dados, processos estocásticos e análise multifractal.

Espera-se que com o aumento do número de estações e aplicação de novas técnicas, obtenham-se maior precisão nos resultados e conseqüentemente novas análises e conclusões exponham mais detalhes a respeito do comportamento climático da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. 2017. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/>.

AZEVEDO, P. V.; LEITÃO, M. M. V. B. R. Aplicação de processos em cadeia de Markov às precipitações diárias no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Meteorologia, 5(1): 389-402, 1990.

BARKHORDARIAN, A.; von STORCH, H.; BHEND, J. The expectation of future precipitation change over the Mediterranean region is different from what we observe, Climate Dynamics, 40: 225-244, 2013.

BEIJO, L. A.; MUNIZ, J. A.; VOLPE, C. A.; PEREIRA, G. T. Estudo da precipitação máxima em Jaboticabal (SP) pela distribuição de Gumbel utilizando dois métodos de estimação dos parâmetros. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 11(1): 141-147, 2003.

BELTRAME, L. F. S.; LANA, A. E. L.; LOUZADA, J. A. S. Chuvas Intensas. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 69 p. 1991.

BRABSON, B. B.; PALUTIKOF, J. P. Tests of the Generalized Pareto Distribution for predicting extreme wind speeds, American Meteorological Society, 39: 1627-1641, 2000.

BRAGA, D. O. M. Aplicação da Teoria de Valores Extremos para índice pluviométrico da cidade de Juiz de Fora - MG. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Curso de Estatística, 50 f, 2015.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Rio e Seus Números. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/web/projeto-sao-francisco/o-rio-e-seus-numeros>. Acessado em agosto de 2018.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005.

BRUTSAERT, W. Hydrology: An Introduction. [S.l.]: Cambridge University Press, 605 p. 2005.

BURGER, L. C. Adaptação e análise do método de Hershfield para estimativa da precipitação máxima provável (PMP). (Dissertação de Mestrado). Departamento de Hidráulica e Saneamento do Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 100 p. 2014.

CASAS, M. C.; RODRIGUEZ, R.; PROHOM, M.; GAZQUEZ, A.; REDANOC, A. Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, 31(9):1322-1327, 2010.

CHENG, L.; AGHAKOUCHAK, A.; GILLELAND, E.; KATZ, R. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Climatic Change*, 127(2): 353-369, 2014.

CHOW, V. T. Handbook of applied hydrology: a compendium of water resources technology. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.

CORREIA, F. C. Precipitações intensas. Caracterização com base em séries de duração parcial. Dissertação em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, 2013.

D'AGOSTINO, R. B; STEPHENS, M. A. Goodness-of-Fit Techniques. 1st edition. New York: Marcel Dekker, 1986.

DAVISON, A. C. Modelling excesses over high thresholds, with an application. In: "Statistical Extremes and Applications" (J. Tiago de Oliveira, Ed.), 131: 461-482, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1984.

DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. Fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, 64(4): 1-34, 2015.

DOUGLAS, E. M.; BARROS, A. P. Probable maximum precipitation estimation using multifractals: application in the Eastern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 4: 1012-1024, 2003.

DOUKA, M.; KARACOSTAS, T. Statistical analyses of extreme rainfall events in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, 208: 60-77, 2018.

ELTZ, F. L. P.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 16: 265-269, 1992.

FERREIRA, J. C.; DANIEL, L. A.; TOMAZELA, M. Parâmetros para equações mensais de estimativas de precipitação de intensidade máxima para o Estado de São Paulo: Fase I. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(6): 1175-1187, 2005.

FOSTER, J.; BEVIS, M.; BUSINGER, S. GPS Meteorology: Sliding-Window Analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22: 687-695, 2005.

GUMBEL, E. J. The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12 (2): 163-190, 1941.

GUMBEL, E. J. *Statistics of Extremes*. Dover Publications, 2012.

HERSHFIELD, D. M. Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 87(5): 99-116, 1961.

HÖRMANN, W.; LEYDOLD, J. Generating Generalized Inverse Gaussian Random Variates. Research Report Series / Department of Statistics and Mathematics, 123. Vienna: WU Vienna University of Economics and Business, 2013.

HUGHES, B. L.; SAUNDERS, M. A. A. Drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22: 1571-1592, 2002.

HUSAK, G. J., MICHAELSEN, J.; FUNK, C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. *International Journal of Climatology*, 27: 935-944, 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Perfil dos Municípios Brasileiros 2011. Rio de Janeiro: IBGE. 2012.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br>. Acessado em agosto de 2018.

IPPC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2001. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/>. Acessado em agosto de 2018.

KANTELHARDT, J. W.; RYBSKI, D.; ZSCHIEGNER, S. A.; BRAUN, P.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; LIVINA, V.; HAVLIN, S.; BUNDE, A. Multifractality of river runoff and precipitation: Comparison of fluctuation analysis and wavelet methods. *Physica A*, 330: 240-245, 2003.

KANTELHARDT, J. W. KOSCIELNY-BUNDE, E.; RYBSKI, D.; BRAUN, P.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *Journal of Geophysical Research*, 111: D11106, 2006.

KELLER FILHO, T.; ZULLO JUNIOR, J.; LIMA, P. R. S. R. Análise da Transição entre Dias Secos e Chuvosos Usando Cadeias de Markov de Terceira Ordem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(9): 1341-1349, 2006.

KLEIBER, C.; KOTZ, S. *Statistical Size Distributions in Economics and Actuarial Sciences*, Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2003.

KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N.; JOHNSON, N. L. *Continuous Multivariate Distributions, Volume 1: Models and Applications*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

KOTZ, S.; NADARAJAH, S. *Extreme Value Distribution: Theory and Applications*. London: Imperial College Press, 2000.

KOUTSOYIANNIS, D. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35(4): 1313-1322, 1999.

LENNARTSSON, L.; BAXEVANIA, A.; CHENB, D. Modelling precipitation in Sweden using multiple step Markov chains and a composite model. *Journal of Hydrology*, 363: 42-59, 2008.

LEOPOLDO, P. R.; SANSIGOLO, C. A.; MARTINS, D. Análise estatística das intensidades e precipitações máximas de Botucatu. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, 16: 11-14, 1984.

LIMA, M. I. P.; LIMA, J. L. M. P. Investigating the multifractality of point precipitation in the Madeira archipelago, *Nonlinear Processes of Geophysics*, 16: 299-311, 2009.

LIU, D.; WANG, D.; WANG, Y.; WU, J.; SINGH, V. P.; ZENG, X.; WANG, L.; CHEN, Y.; CHEN, X.; ZHANG, L.; GU, S. Entropy of hydrological systems under small samples: Uncertainty and variability. *Journal of Hydrology*, 532: 163-176, 2016.

LUO, W. W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, 28(7): 947-959, 2008.

MAHMOUDZADEH, H.; MAHMOUDZADEH, H.; AFSHAR, M. H.; YOUSEFI, S. Applying First-Order Markov Chains and SPI Drought Index to Monitor and Forecast Drought in West Azerbaijan Province of Iran. *International Journal of Geosciences and Environment Planning*, 1(2): 44-53, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 2017.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. *Hydrologic time series analysis: Theory and practice*. India: Capital Publishing Company, 2012.

MAYOORAN, T.; LAHEETHARAN, A. The Statistical Distribution of Annual Maximum Rainfall in Colombo District. *Sri Lankan Journal of Applied Statistics*, 15(2): 107-130, 2014.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales. *American Meteorological Society. 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, 179-184, 1993.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de Gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. *Irriga*, 10(4): 318-334, 2005.

MICOVIC, Z.; SCHAEFER, M. G.; TAYLOR, G. H. Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 521: 360-373, 2015.

MISHRA, A.; SINGH, V. P.; DESAI, V. R. Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23: 41-55, 2009.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391: 202-216, 2010.

MMA. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco. Brasília: MMA, 2006.

MMA. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade. 2ª Ed. Brasília: MMA, 2007.

NADARAJAH, S.; ALI, M. M. Pareto Random Variables for Hydrological Modeling. *Water Resour Manage*, 22: 1381-1393, 2008.

NAGHETTINI, M. & PINTO, E. J. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 552 p. 2007.

NOBUKUNI, P. Análise das precipitações com duração de 5 minutos a 24 horas, nas regiões de Jaboticabal e Presidente Prudente. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 65 f. 2000.

PANDEYA, G.; LOVEJOYB, S.; SCHERTZERC, D. Multifractal analysis of daily river flows including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years. *Journal of Hydrology*, 208: 62-81, 1998.

PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D. A global survey on the seasonal variation of the marginal distribution of daily precipitation. *Advances in Water Resources*, 94: 131-145, 2016.

PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S. Prediction of SPI Drought Class Transitions Using Markov Chains. *Water Resour Manage*, 21:1813-1827, 2007.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia agrícola. Ed. Revista e Ampliada. São Paulo: USP, 2007.

PEREIRA, S. B.; PRUSKIII, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(6): 615-622, 2007.

PINTO, F. R. L. Equações de intensidades-duração-frequência da precipitação para os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo: estimativa e espacialização. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 70 f., 1999.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. Hidrologia Básica. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

PROUTSKI, V.; HOLMES, E. Sliding window analysis of nucleotide sequence variability. *Bioinformatics*, 14(5): 467-468, 1998.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acessado em agosto de 2018.

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G., VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHAES, P. C.; CLEARY, R. Engenharia Hidrológica, Rio de Janeiro: ABRH/Ed. UFRJ, 1989.

ROBESON, S. M. Revisiting the recent California drought as an extreme value. *Geophysical Research Letters*, 42(16): 6771-6779, 2015.

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em Piracicaba, SP (1917-2006). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(3): 341-346, 2008.

SANTOS, I.; FILL, H. T.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. Hidrometria Aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, 2001.

SADEGHI, L.; SHAMSELDIN, A. Y. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Hawke's Bay, New Zealand. *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*, p. 139, 2014.

SANTOS FILHO, J. Funções densidade de probabilidade para estimação de veranicos no município de Lavras, MG. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, 2013.

SANUSI, W.; JEMAIN, A. A.; ZIN, W. Z. W.; ZAHARI, M. The drought characteristics using the first-order homogeneous Markov chain of monthly rainfall data in peninsular Malaysia. *Water Resources Management*, 29(5), 1523-1539, 2015.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: *ACM. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. p. 517-524. 1968.

SHIAU, J. T. Return period of bivariate distributed extreme hydrological events. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17: 42-57, 2003.

SOUSA, F. A. S.; MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, V. P. R. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). *Ambiência Guarapuava (PR)*, 12(2): 707-719, 2016.

SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh>. Acessado em agosto de 2018.

SOCOL, O. J.; CARDOSO, C. O.; MIQUELLUTI, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14 (6): 569-574, 2010.

SU, Z.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D.; TIMMERMANS, J.; CHEN, X.; HUNGERSHOEFER, K.; ROEBELING, R.; SCHRÖDER, M.; SCHULZ, J.; STAMMES, P.; WAN, P. First results of the earth observation Water Cycle Multi-mission Observation Strategy (WACMOS). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 270-285, 2014.

STERN, R. D.; DENNETT, M. D.; DALE, I. C. Analysing rainfall measurements to give agronomically useful results. I. Direct Methods. *Experimental Agriculture*, 18: 223-236, 1982.

SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R. B.; ROCHA, R. P. Estimativa da probabilidade do evento extremo de precipitação de janeiro de 2000 no Vale do Paraíba, baseada na distribuição generalizada de Pareto. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(2): 193-208, 2010.

TAJIMA, F. Determination of window size for analysing DNA sequences. *Journal of Molecular Evolution*, 33: 470-473, 1991.

THIBERT, E.; SIELENOU, P. D.; VIONNET, V.; ECKERT, N.; VINCENT, C. Causes of glacier melt extremes in the Alps since 1949. *Geophysical Research Letters*, 45 (2): 817-825, 2018.

THOM, H. C. S. Same methods of climatological analyses. Geneva World Meteorological Organization, 53p. 1966.

TONG, C.-S., HUANG, Q., LIU, H. Study on runoff series complexity based on approximate entropy. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, v. 33(6): 121-126, 2005.

TONKAZ, T. Spatio-temporal assessment of historical droughts using SPI with GIS in GAP Region, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 12(6): 2565-2571, 2006.

TSAKIRIS, G.; VANGELIS, H. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resources Management*. 18: 1-12, 2004.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS / ABRH, 3ª Ed., 2004.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. *Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres*. 2. ed. rev. ampl. Volume Brasil. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

VIEIRA, D. B.; LOMBARDI NETO, F.; SANTOS, R. P. Análise das intensidades máximas de chuva em Pindorama (SP). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 18(2): 255-260, 1994.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3ª Ed. Oxford: Elsevier 2011.

WRI. World Resources Institute. *Aqueduct Measuring and Mapping Water Risk*. Disponível em: <http://www.wri.org/applications/maps/aqueduct-atlas>. Acessado em agosto de 2018.

WMO. World Meteorological Organization. *Manual on estimation of probable maximum precipitation - PMP*. Geneva, 291 p. 2009.

WMO. World Meteorological Organization. *Standardized Precipitation Index User Guide*. nº 1090. Geneva, 16 p. 2012.

WOW, World Meteorological Organization. *The Global Climate in 2011–2015*. World Meteorological Organization, 2016. (WMO Series). Disponível em: [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=3103](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3103). 24

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris, UNESCO, 2017.

ZISCHG, A. P., FELDER, G., WEINGARTNER, R., QUINN, N., COXON, G., NEAL, J., FREER, J.; BATES, P. Effects of variability in probable maximum precipitation patterns on flood losses. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2018: 1-24, 2018.

## APÊNDICE A – Estatística descritiva da variável precipitação para as séries históricas de 7 estações da BHSF.

Tabela A.1. Estatísticas da precipitação para a estação Iguatama da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	259,04	133,83	521,90	22,60	2,00	0,40
Fevereiro	152,90	91,20	370,90	4,50	2,13	0,31
Março	146,14	83,72	412,40	23,20	3,67	0,77
Abril	63,05	39,00	197,70	4,20	4,88	1,12
Mai	42,01	32,43	117,40	0	2,89	0,71
Junho	20,93	27,18	113,40	0	4,68	1,47
Julho	13,77	18,28	63,40	0	3,49	1,27
Agosto	12,91	20,19	87,50	0	6,12	1,91
Setembro	52,53	40,81	166,80	0	3,50	0,80
Outubro	103,48	59,71	277,00	22,40	3,03	0,61
Novembro	180,52	75,77	388,20	25,90	3,33	0,59
Dezembro	270,38	100,81	510,31	10,80	2,85	-0,10

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.2. Estatísticas da precipitação para a estação Pirapama da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	332,97	350,77	1718,30	6,60	9,49	2,42
Fevereiro	197,67	274,85	1638,80	0	18,13	3,59
Março	199,23	195,00	972,80	12,40	8,79	2,28
Abril	82,05	95,07	441,80	0	6,97	2,00
Mai	31,88	45,86	273,00	0	17,96	3,49
Junho	18,13	52,49	271,20	0	17,12	3,82
Julho	10,24	18,41	86,80	0	8,50	2,34
Agosto	9,48	14,94	72,80	0	8,54	2,20
Setembro	33,62	33,71	123,80	0	3,00	0,93
Outubro	119,38	153,85	1001,40	10,20	24,74	4,28
Novembro	271,71	270,77	1348,20	40,00	10,02	2,70
Dezembro	359,70	269,81	1350,20	45,40	6,71	1,93

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.3. Estatísticas da precipitação para a estação São Romão da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	187,96	133,17	473,40	6,80	2,27	0,51
Fevereiro	109,72	89,81	353,60	7,00	4,01	1,33
Março	133,27	98,73	390,80	0	3,15	0,76
Abril	52,27	37,96	139,20	0	2,37	0,52
Maio	10,38	15,87	80,90	0	9,94	2,42
Junho	3,79	9,28	38,60	0	8,65	2,62
Julho	3,53	14,98	94,20	0	31,20	5,28
Agosto	3,28	8,14	40,80	0	14,09	3,31
Setembro	16,38	18,22	76,30	0	4,07	1,24
Outubro	80,63	61,04	216,90	1,00	2,71	0,71
Novembro	187,52	87,72	462,00	6,40	3,85	0,54
Dezembro	220,81	100,83	520,00	33,50	3,55	0,54

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.4. Estatísticas da precipitação para a estação Colônia do Formoso da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	146,99	130,24	664,50	3,50	7,18	1,83
Fevereiro	101,90	89,53	349,00	9,40	4,18	1,45
Março	122,71	87,22	345,80	0	2,98	0,68
Abril	56,30	51,99	206,00	0	4,40	1,47
Maio	9,41	11,52	55,50	0	7,15	1,83
Junho	3,90	12,22	63,40	0	16,54	3,71
Julho	1,23	2,95	14,20	0	11,31	2,90
Agosto	1,88	3,98	14,60	0	6,63	2,18
Setembro	13,03	16,57	63,90	0	3,85	1,25
Outubro	76,51	61,81	284,23	0	4,32	1,13
Novembro	186,23	97,46	488,90	28,40	3,68	0,48
Dezembro	200,02	145,60	830,68	26,30	8,87	1,98

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.5. Estatísticas da precipitação para a estação Pilão Arcado da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	122,59	85,73	349,99	4,80	3,52	1,05
Fevereiro	102,17	71,94	346,80	0	4,55	1,18
Março	119,74	80,94	354,10	0	4,14	1,08
Abril	63,31	36,30	150,30	0	2,67	0,24
Maio	17,55	22,31	130,90	0	15,79	3,17
Junho	5,83	6,78	33,19	0	7,78	2,01
Julho	4,66	5,02	21,82	0	6,15	1,76
Agosto	3,03	3,91	21,62	0	12,32	2,62
Setembro	11,03	14,38	59,65	0	5,69	1,76
Outubro	43,82	30,78	108,12	0	1,88	-0,01
Novembro	99,19	53,16	205,41	8,60	2,19	0,19
Dezembro	122,95	83,03	448,91	8,10	6,65	1,42

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.6. Estatísticas da precipitação para a estação Fazenda Tapera da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	82,85	88,92	458,30	0	8,77	2,15
Fevereiro	77,04	67,49	265,80	0	3,54	1,08
Março	112,58	77,68	304,40	0	2,45	0,43
Abril	69,44	68,88	285,90	0	4,08	1,28
Maio	23,24	27,52	147,90	0	10,50	2,32
Junho	10,31	14,78	78,10	0	11,10	2,56
Julho	7,81	7,02	33,57	0	5,34	1,28
Agosto	2,40	4,00	16,50	0	6,08	1,97
Setembro	4,61	11,79	65,40	0	17,44	3,63
Outubro	10,98	17,98	76,66	0	5,49	1,75
Novembro	28,52	34,75	106,26	0	2,69	1,09
Dezembro	51,34	45,98	188,40	0	3,77	1,13

Fonte: O próprio autor.

Tabela A.7. Estatísticas da precipitação para a estação Propriá da BHSF.

<b>Mês</b>	<b>Média (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
Janeiro	32,88	56,23	350,30	0	23,58	4,24
Fevereiro	35,48	39,36	194,90	0	7,40	1,90
Março	65,75	63,41	275,90	0	4,68	1,47
Abril	96,70	72,30	289,12	0	3,23	0,86
Maio	142,17	100,50	508,04	0	5,17	1,10
Junho	133,92	72,81	317,30	0	3,20	0,65
Julho	118,72	65,66	341,88	0	4,68	0,75
Agosto	68,64	39,96	183,46	3,80	3,68	0,89
Setembro	51,74	40,29	167,80	0	3,60	1,08
Outubro	38,56	51,40	218,40	0	6,44	1,95
Novembro	26,87	35,37	146,39	0	5,14	1,66
Dezembro	21,34	26,10	99,70	0	5,38	1,74

Fonte: O próprio autor.