

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
METEOROLOGIA – BACHARELADO

Lucas Henrique dos Santos Rocha

**Estudo dos eventos climáticos extremos, probabilidade e período de retorno
na Bacia hidrográfica do rio São Francisco.**

Maceió-AL
2022

Lucas Henrique dos Santos Rocha

**Estudo dos eventos climáticos extremos, probabilidade e período de retorno
na Bacia hidrográfica do rio São Francisco.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Campus A.C. Simões, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Meteorologia, sob orientação da Prof^a. Dr^a. Djane Fonseca da Silva.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

R672e Rocha, Lucas Henrique dos Santos.
Estudo dos eventos extremos, probabilidade e período de retorno na
Bacia hidrográfica do rio São Francisco / Lucas Henrique dos Santos
Rocha. – 2022.
65 f. : il. color.

Orientadora: Djane Fonseca da Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia:
Bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências
Atmosféricas. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 63-65.

1. Eventos extremos. 2. Precipitação (Meteorologia). 3. Probabilidades.
4. Período de retorno. 5. Bacia Hidrográfica - Rio São Francisco. I. Título.

CDU: 551.5

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a Deus, por toda capacitação a mim concedida, e presto agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram para a minha formação acadêmica, incluindo professores e amigos descobertos na graduação e em todas as etapas do ensino fundamental e médio. Agradeço, ainda, especialmente, à minha família que sempre me incentiva e me ajuda na dedicação aos estudos, à minha orientadora que me acompanhou por toda a graduação e às pessoas que me ajudaram nesta breve caminhada em busca do diploma de ensino superior. Obrigado a todos!

RESUMO

A frequência de eventos extremos de precipitação vem crescendo nos últimos anos, com maior intensidade e duração, e assim favorecendo desastres naturais como inundações e secas severas. É necessário conhecer as causas ou o que desencadeou o desastre, para assim, definir as medidas preventivas que serão adotadas. Desta forma, a detecção das causas de ciclos e extremos pluviométricos, principalmente em regiões socioeconomicamente vulneráveis torna-se uma maneira de baixo custo para auxiliar o gerenciamento de setores de recursos hídricos e socioeconômicos locais, além do mais importante, prevenir a perda de vidas humanas. Ainda assim, em várias regiões, mudanças em extremos de temperatura têm sido observadas nos últimos 50 anos. Tais mudanças nos eventos extremos têm impactos nas atividades humanas como na agricultura, saúde, desenvolvimento e planejamento urbano e gerenciamento de recursos de água. Dentro da temática eventos extremos, é de suma importância, principalmente dentro de uma bacia hidrográfica, conhecer o período de retorno dos principais eventos extremos, tanto para segurança hídrica, quanto para construção de obras e segurança da população local. Associado ao conhecimento do período de retorno, é importante saber e calcular a probabilidade de ocorrência de eventos extremos em áreas urbanas, áreas agrícolas ou susceptíveis ao evento extremo, pois assim, planeja-se melhor as atividades econômicas, novas obras e construções e até mesmo pode-se deslocar populações, na tentativa de amenizar possíveis perdas econômicas e até de vidas humanas. Portanto, objetiva-se neste trabalho, o estudo dos eventos climáticos extremos, probabilidade e período de retorno na Bacia hidrográfica do rio São Francisco. Para tanto, foram utilizados dados pluviométricos diários que foram obtidos através da Agência Nacional das Águas (ANA), com período de dados de 1949-2019 para 26 estações pluviométricas dispostas ao longo de todo o rio São Francisco. Por meio do Standardized Precipitation Index (SPI) foi possível quantificar e qualificar os eventos extremos ocorridos e, com a utilização de outras técnicas, como a análise de ondaletas, foi possível verificar e associar as possíveis causas desses eventos. Além disso, de forma geral, através de mapas de probabilidade, constatou-se que para o Rio São Francisco há uma maior probabilidade de ocorrência de eventos chuvosos do que eventos de seca.

PLAVRAS-CHAVE: Ondaleta; SPI; Quartis.

ABSTRACT

The frequency of extreme precipitation events has been growing in recent years, with greater intensity and duration, and thus favoring natural disasters such as floods and severe droughts. It is necessary to know the causes or what triggered the disaster, in order to define the preventive measures that will be adopted. In this way, the detection of the causes of rainfall cycles and extremes, especially in socioeconomically vulnerable regions, becomes a low-cost way to help the management of water resources and local socioeconomic sectors, in addition to preventing the loss of human lives. . Yet, in several regions, changes in temperature extremes have been observed over the past 50 years. Such changes in extreme events have impacts on human activities such as agriculture, health, urban development and planning, and water resource management. Within the theme of extreme events, it is of paramount importance, especially within a watershed, to know the return period of the main extreme events, both for water security and for construction works and safety of the local population. Associated with the knowledge of the return period, it is important to know and calculate the probability of the occurrence of extreme events in urban areas, agricultural areas or areas susceptible to the extreme event, because in this way, economic activities, new works and constructions and even populations can be displaced, in an attempt to mitigate possible economic losses and even human lives. Therefore, the objective of this work is to study extreme weather events, probability and return period in the São Francisco River Basin. For this, daily rainfall data were used, which were obtained through the National Water Agency (ANA), with a data period from 1949-2019 for 26 rainfall stations arranged along the entire São Francisco River. Through the Standardized Precipitation Index (SPI) it was possible to quantify and qualify the extreme events that occurred and, with the use of other techniques, such as wavelet analysis, it was possible to verify and associate the possible causes of these events. In addition, in general, through probability maps, it was found that for the São Francisco River there is a greater probability of occurrence of rainy events than drought events.

KEY WORDS: Wavelet; SPI; Quartiles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Bacia hidrográfica do Rio São Francisco.....	18
FIGURA 2 – Representação e fórmulas da técnica de quartil.....	26
FIGURA 3 – Classificação e quantificação dos eventos extremos do Alto São Francisco.....	27
FIGURA 4 – Classificação e quantificação dos eventos extremos do Médio São Francisco.....	28
FIGURA 5 – Classificação e quantificação dos eventos extremos do Submédio São Francisco.....	28
FIGURA 6 - Classificação e quantificação dos eventos extremos do Baixo São Francisco.....	29
FIGURA 7 – Análise de agrupamentos entre as sub-bacias hidrográficas do rio São Francisco.....	29
FIGURA 8 – Fator 1.....	30
FIGURA 9 – Fator 2.....	30
FIGURA 10 – Fator 3.....	31
FIGURA 11 – Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o ASF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados.....	34
FIGURA 12 – Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o MSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados.....	35
FIGURA 13 – Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o SMSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados.....	36
FIGURA 14 – Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o BSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados.....	37
FIGURA 15 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico positivo de Janeiro a Junho.....	38
FIGURA 16 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico positivo de Julho a Dezembro.....	38
FIGURA 17 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico negativo de Janeiro a Junho.....	39
FIGURA 18 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico negativo de Julho a Dezembro.....	39
FIGURA 19 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de El Niño de Janeiro a Junho.....	39

FIGURA 20 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de El Niño de Julho a Dezembro.....	39
FIGURA 21 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de La Niña de Janeiro a Junho.....	39
FIGURA 22 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de La Niña de Julho a Dezembro.....	39
FIGURA 23 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases positivas, de janeiro a junho.....	41
FIGURA 24 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases positivas, de julho a dezembro.....	41
FIGURA 25 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases negativas, de janeiro a junho.....	42
FIGURA 26 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases negativas, de julho a dezembro.....	42
FIGURA 27 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP positiva e DA negativo), de janeiro a junho.....	42
FIGURA 28 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP positiva e DA negativo), de julho a dezembro.....	42
FIGURA 29 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP negativa e DA positivo) de janeiro a junho.....	42
FIGURA 30 – SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP negativa e DA positivo) de julho a dezembro.....	42
FIGURA 31 – Probabilidade de ocorrência de secas (%).....	43
FIGURA 32 – Período de retorno de secas (em anos).....	43
FIGURA 33 – Probabilidade de ocorrência de chuvas (%).....	44
FIGURA 34 – Período de retorno de chuvas (em anos).....	44
FIGURA 35 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de El Niño (%).....	45
FIGURA 36 – Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de El Niño (%).....	45
FIGURA 37 – Período de retorno de secas em anos de El Niño (em anos).....	45
FIGURA 38 – Período de retorno de cheias em anos de El Niño (em anos).....	45
FIGURA 39 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de La Niña (%).....	46
FIGURA 40 – Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de La Niña (%).....	46
FIGURA 41 – Período de retorno de secas em anos de La Niña (em anos).....	47

FIGURA 42 – Período de retorno de cheias em anos de La Niña (em anos).....	47
FIGURA 43 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Dipolo do Atlântico negativo (%).....	48
FIGURA 44 – Probabilidade de ocorrência cheias em anos de Dipolo do Atlântico negativo (%).....	48
FIGURA 45 – Período de retorno de secas em anos de Dipolo do Atlântico negativo (em anos).....	49
FIGURA 46 – Período de retorno de cheias em anos de Dipolo do Atlântico negativo (em anos).....	49
FIGURA 47 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Dipolo do Atlântico positivo (%).....	50
FIGURA 48 – Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Dipolo do Atlântico positivo (%).....	50
FIGURA 49 – Período de retorno de secas em anos de Dipolo do Atlântico positivo (em anos).....	51
FIGURA 50 – Período de retorno de cheias em anos de Dipolo do Atlântico positivo (em anos).....	51
FIGURA 51 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (%).....	52
FIGURA 52 – Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (%).....	52
FIGURA 53 – Período de retorno de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (em anos).....	53
FIGURA 54 – Período de retorno de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (em anos).....	53
FIGURA 55 – Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (%).....	54
FIGURA 56 – Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (%).....	54
FIGURA 57 – Período de retorno de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (em anos).....	55
FIGURA 58 – Período de retorno de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (em anos).....	55
FIGURA 59 – Box plot de valores de SPI para as sub-bacias do rio São Francisco.....	55

FIGURA 60 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase negativa.....	56
FIGURA 61 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase positiva.....	57
FIGURA 62 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra em sua fase negativa.....	58
FIGURA 63 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra em sua fase positiva.....	59
FIGURA 64 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco em anos de El Niño.....	60
FIGURA 65 – Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco em anos de La Niña.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Coordenadas geográficas das estações pluviométricas de cada sub-bacia utilizadas na pesquisa.....	19
TABELA 2 – Classificação do SPI.....	20
TABELA 3 – Anos e meses de ocorrência do ENOS entre 1976-2018.....	23
TABELA 4 – Anos de ocorrência do DA e suas fases.....	24
TABELA 5 – Anos de ocorrência de ODP e suas fases.....	24
TABELA 6 – Anos em comum de ODP e DA e suas fases.....	25
TABELA 7 – Coeficientes de similaridade entre as sub-bacias do rio São Francisco.....	32

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – Índice de Precipitação Normalizado.....	20
EQUAÇÃO 2 – Índice de Prp.....	22
EQUAÇÃO 3 – Ondaleta Morlet.....	22
EQUAÇÃO 4 – Probabilidade.....	25
EQUAÇÃO 5 – Período de Retorno.....	25
EQUAÇÃO 6 – Primeiro Quartil.....	26
EQUAÇÃO 7 – Segundo Quartil.....	26
EQUAÇÃO 8 – Terceiro Quartil.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional de Águas
AO	Análise de Ondaleta
ASF	Alto São Francisco
BSF	Baixo São Francisco
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
DA	Dipolo do Atlântico
MSF	Médio São Francisco
NEB	Nordeste Brasileiro
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OIP	Oscilação Interdecadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
SMSF	Submédio São Francisco
SPI	Standard Precipitation Index
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	METODOLOGIA.....	16
2.1	Área de Estudo.....	16
2.2	Dados e Métodos.....	19
2.3	Índice de Precipitação Normalizado (SPI).....	20
2.4	Análise de Agrupamentos e ACP.....	20
2.5	Coefficiente de Similaridade.....	21
2.6	Análise de Ondaleta.....	22
2.7	Software Surfer.....	23
2.8	Probabilidade e Período de Retorno.....	25
2.9	Quartil.....	25
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
3.1	Índice de Precipitação Normalizado (SPI).....	26
3.2	Análise de agrupamentos e ACP.....	29
3.3	Coefficiente de Similaridade.....	31
3.4	Análise de Ondaleta.....	32
3.5	Distribuição espacial do Índice de Precipitação Normalizado (SPI).....	37
3.6	Probabilidade e Período de retorno.....	43
3.7	Quartil.....	55
4	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O rio São Francisco é um dos rios brasileiros mais extensos e sua Bacia está situada em áreas dos Estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Distrito Federal, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. A importância desse rio está no volume de água transportada por ele através da região semiárida, na sua contribuição histórica e econômica para fixação das populações ribeirinhas e criação das cidades hoje plantadas ao longo do vale. Seu potencial hídrico é fundamental na geração de energia elétrica, com 10.000 MW de potência instalados à jusante de Barra (BA), além de projetos de irrigação dos excelentes solos situados as suas margens (Da Silva, 2003; Rocha et al., *in prelo*, 2022).

Os eventos extremos de tempo e clima são também um aspecto integral da variabilidade climática (Marengo, 2009). De acordo com o Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas – GPMC – INPE (Marengo, 2009), nas regiões onde os eventos extremos de tempo serão mais intensos e/ou mais frequentes, os custos econômicos e sociais desses eventos aumentarão, e esses aumentos serão substanciais nas áreas mais diretamente afetadas. Nas áreas secas, espera-se que as mudanças climáticas levem à salinização e desertificação de terras agrícolas, assim como também diminuição da produtividade do gado e de algumas colheitas importantes, com consequências adversas para a segurança alimentar (Marengo et al., 2013).

Por meio de ciclos, a variabilidade climática, produz deficiência e/ou excesso de chuvas em todo o globo, que por consequência, gera secas ou inundações. Os eventos climáticos de extremas intensidades demonstram um papel significativo no dia a dia das sociedades, seja por sua intensidade e frequência de ocorrência, seja pela vulnerabilidade socioambiental (SANTOS et al., 2017). O ano de 1979, por exemplo, foi marcado por uma cheia originada no Alto e Médio São Francisco e sua ocorrência, entre 6 de janeiro a 22 de fevereiro, foi relacionada ao fenômeno El Niño de intensidade fraca (SANTOS et al., 2011; DIAS, 2014).

Com o aumento de eventos extremos no Brasil (MARENGO, 2016), vem a necessidade de utilizar e desenvolver métodos que são capazes de possibilitar o estudo de tais casos.

De acordo com Costa et al. (2015) a frequência de eventos extremos de precipitação vem crescendo nos últimos anos, com maior intensidade e duração, e assim favorecendo desastres naturais como inundações e secas severas.

Para melhorar a capacidade de detecção e monitoramento de eventos pluviométricos em diferentes escalas de tempo os autores Mckee et al. (1993) desenvolveram um índice de precipitação padronizado, conhecido como Standardized Precipitation Index (SPI), o qual se destaca por permitir a caracterização do déficit ou do excesso de precipitação em uma determinada localidade, com sua flexibilidade temporal e simplicidade, e utilização de apenas dados mensais de precipitação (PELLEGRINO et al., 2007).

O objetivo geral deste trabalho é estudar os eventos climáticos extremos na Bacia hidrográfica do rio São Francisco, sua probabilidade e seu período de retorno. Para isso, os objetivos específicos são:

- Identificar e quantificar os eventos extremos ocorridos na Bacia hidrográfica do rio São Francisco, através do SPI;
- Descobrir as causas climáticas desses eventos utilizando análise de ondaleta;
- Gerar mapas espaciais do SPI para toda a bacia hidrográfica, apontando períodos críticos para ocorrência de eventos extremos (secas ou chuvas extremas) diante de eventos de ENOS, Dipolo do Atlântico e ODP;
- Pontuar quais regiões sofrem maiores e menores impactos na ocorrência de extremos chuvosos e secos;
- Realizar o cálculo da probabilidade de eventos extremos de seca/chuvas em toda a bacia hidrográfica, juntamente com o cálculo do período de retorno desses eventos extremos;
- Utilizar a técnica dos Quartis para classificar os limiares de cada classe de chuva para cada sub-bacia, adicionando informações aos estudos de eventos extremos nesta Bacia hidrográfica.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A parte inicial da Bacia do rio São Francisco (Figura 1) é a sub-bacia do Alto São Francisco (ASF), área montanhosa onde o rio nasce na Serra da Canastra, a 1280 m de altitude e que se estende até a cidade de Pirapora, no centro-norte de Minas Gerais; a região perfaz uma área de 111.804 km². Escoando no sentido sul-norte, no trecho seguinte, o rio atravessa todo o oeste da Bahia, até o ponto onde se formou o lago represado de Sobradinho, no município de Remanso. Nessa região, a sub-bacia é denominada Médio São Francisco (MSF) e é a maior das quatro divisões, alcançando 339.763 km² (CBHSF, 2013).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), no Submédio São Francisco (SMSF), entre Sobradinho e a Cachoeira de Paulo Afonso (BA), o perfil do solo é ondulado com vales bastante abertos devido à pouca resistência à erosão. Nesta região encontra-se a Chapada do Araripe, com aproximadamente 800 m de altitude, que se estende para leste através da Serra dos Cariris em Pernambuco. Essa sub bacia caracteriza-se como quente, semiárido, com sete a oito meses secos e regime de chuvas de outono a inverno com total anual de cerca de 550 mm concentradas, principalmente, entre os meses de novembro a março (Sá et al, 2009).

O Baixo São Francisco (BSF) vai da cidade de Paulo Afonso, na Bahia, até à foz do rio no Oceano Atlântico, localizada entre os municípios de Piaçabuçu, em Alagoas, e de Brejo Grande, em Sergipe. Sua área, abrange, portanto, porções dos estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe (sub-bacias de Jacaré, Capivara, Betume) e Alagoas (sub-bacias do Capiá, Riacho Grande, Jacaré, Ipanema, Traipú e Piauí). A vegetação predominante é de caatinga no trecho mais alto, e mata atlântica, manguezais e restingas na região costeira. O clima é considerado tropical semiúmido. Nessa região, com 32.013 km², correspondendo a 5,1% da bacia, observa-se uma nítida mudança na distribuição anual das chuvas, que nas proximidades do oceano se distribuem por todo ano, embora mais concentradas no outono e inverno, enquanto que, no interior, os meses chuvosos são os de verão (CBHSF, 2013).

O ASF, de acordo com Da Silva et al. (2011), se estende de suas nascentes na Serra da Canastra até a cidade de Pirapora, e ambos locais fazem parte do estado de Minas Gerais. Caracteriza-se, no ASF, o clima tropical úmido, temperado e de altitude, com sua quadra chuvosa iniciando em novembro e se prolongando até fevereiro. A precipitação média se mantém entre 1100 mm e 2000 mm.

Segundo a ANA (2018), a Serra do Espinhaço, localizada em Minas Gerais, atua como a principal feição de relevo na região do ASF; ademais é um divisor natural entre a Bacia do Rio São Francisco e a do Rio Grande.

Medeiros et al. (2007) afirma que, no MSF, predominam os climas tropical e semiárido; e em Da Silva et al. (2004) informou-se que há o predomínio da Caatinga como vegetação da região. Na região do MSF há planícies da Depressão São-franciscana encontradas entre Carinhanha, sudoeste da Bahia, até a barragem de Sobradinho, localizada a norte do Estado da Bahia. Nesta parte, o relevo adquire altitudes mais elevadas, variando entre 350 m e 2.050 m de altitude, com recortes, vales profundos e é, também, onde situa-se a Chapada Diamantina (BA) (ANA, 2018).

A extensão do SMSF vai de Remanso até Paulo Afonso, ambas cidades contidas do Estado da Bahia e abrangendo, também, áreas do Estado de Pernambuco. O clima presente na região é semiárido e a maior quantidade de precipitação acontece entre janeiro e abril com valores de 350 mm até 800 mm (DA SILVA et al., 2011). No SMSF, entre Sobradinho (BA) e a Cachoeira de Paulo Afonso, o perfil do solo é ondulado com vales bastante abertos devido à pouca resistência à erosão. Nesta região encontra-se a Chapada do Araripe, com aproximadamente 800 m de altitude, que se estende para leste através da Serra dos Cariris em Pernambuco (ANA, 2018).

Já o BSF tem um clima tropical quente e úmido e está localizado na zona costeira do Nordeste brasileiro (NEB) (Medeiros et al., 2007). A vegetação predominante é a caatinga juntamente com mata Atlântica e, além disso, o BSF contém afluentes provenientes do semiárido. Por fim, no BSF, que se inicia de Paulo Afonso (BA) até a sua própria foz, na divisa do Estado de Alagoas e Sergipe, se fazem presentes os tabuleiros do grupo Barreiras, que se prolongam por toda região costeira norte e nordeste, cujas altitudes estão compreendidas de 100 a 200 m, além da planície costeira, com baixas altitudes que não ultrapassam mais de 100 m (ANA, 2018).



Figura 1: Bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Fonte: ANA, 2004.

2.2 Dados e Métodos

Os dados pluviométricos diários foram obtidos através da Agência Nacional das Águas (ANA) e o período de dados é de 1949-2019 para 26 estações pluviométricas (Tabela 1).

Tabela 1: Coordenadas geográficas das estações pluviométricas de cada sub-bacia utilizadas na pesquisa. Fonte: Autor (2020).

Estação pluviométrica	Latitude (em graus)	Longitude (em graus)	Localização
Barra do Rio de Janeiro	-17,9581	-45,1022	ASF
Vargem Bonita	-20,33	-46,3661	
Lassance	-17,89	-44,5767	
Remanso	-9,625	-42,085	MSF
Formosa do Rio Preto	-11,05	-45,1833	
Oliveira dos Brejinhos	-12,3161	-42,8956	
Cabeceiras	-15,8008	-46,9247	
Barreiro - DF (Brasília)	-15,8386	-47,6272	
Rio Preto (Brasília)	-15,7922	-47,4328	
Lagoa dos Patos	-16,9833	-44,6	
São José do Egito	-7,4667	-37,2833	SMSF
São José do Belmonte	-7,8667	-38,7833	
Serra Talhada	-7,9833	-38,3	
Triunfo	-7,8333	-38,1167	
Exú (Novo Exú)	-7,5167	-39,7167	
Serrita (Serrinha)	-7,9333	-39,3137	
Lagoa Grande	-8,9989	-40,2731	
Baixa Grande	-9,1469	-40,9644	
Riacho Grande	-9,4667	-37,4667	
Cacimbinhas	-9,4	-37	
Mata Grande	-9,1333	-37,7333	BSF
Olho d'água das Flores	-9,5333	-37,2833	
Pão de Açúcar	-9,7333	-37,4333	
Porto da Folha	-9,9167	-37,2667	
Canindé de São Francisco	-9,65	-37,8	
Curralinho	-9,7	-37,6667	

O preenchimento dos dados faltosos ocorreu por correlação com outra estação meteorológica mais próxima e que apresentem melhor coeficiente de correlação ou por média climatológica. Os dados foram adquiridos em formato de bloco de notas, convertidos para o Excel®.

2.3 Índice de Precipitação Normalizado (SPI)

Utilizou-se o método estatístico SPI (Standardized Precipitation Index – Índice de Precipitação Normalizada), desenvolvido por McKee et al. (1993), o qual vem sendo utilizado por instituições de pesquisa e órgãos governamentais e se mostrou como uma ferramenta extremamente útil para identificar e quantificar os eventos climáticos extremos tanto chuvosos quanto secos. Foi feito o cálculo do SPI e foi retornado um valor adimensional para um período de tempo específico que corresponde a uma classe. Valores positivos equivalem a uma superioridade em relação à média, enquanto valores negativos são reflexos de uma inferioridade também em relação à média. Além disso, valores iguais a zero indicam valor do SPI igual à média de precipitação, como indica a tabela abaixo em coerência com McKee et al. (1993).

Tabela 2: Classificação do SPI. Fonte: McKee et al (1993).

Valores de SPI	Classes
< -2.00	Seca Extrema
-1.99 a -1.50	Seca Severa
-1.49 a -1.00	Seca Moderada
-0.99 a -0.49	Seca Leve
-0.48 a 0.49	Quase Normal
0.50 a 0.99	Chuva Leve
1.00 a 1,49	Chuva Moderada
1.50 a 1.99	Chuva Severa
> 2.00	Chuva Extrema

O SPI é calculado através da seguinte equação:

$$SPI = Z_i = \frac{(P_i - \bar{P}_i)}{\delta_i} \quad (1)$$

2.4 Análise de Agrupamentos e Análise de Componentes Principais

A análise de agrupamentos tem como objetivo agrupar indivíduos em classes, de forma que os indivíduos pertencentes a essas classes mantenham características semelhantes em algum aspecto (GUIMARÃES *et al.*, 2013).

Deste modo, nesta etapa foram submetidos à análise de agrupamentos, as quatro sub-bacias que compõem o Rio São Francisco, juntamente com as estações meteorológicas contidas em cada sub-bacia. A análise de agrupamento foi feita através do software SPSS versão 20, com licença temporária gratuita.

Essa estatística de análise multivariada tem como objetivo principal classificar os indivíduos de uma população que são conhecidos por suas características, ou seja, mostrar indivíduos semelhantes (UNAL *et al.*, 2003; FARIAS *et al.*, 2005). Foi também aplicado o dendrograma, que tem como objetivo, unificar indivíduos em classes ou grupos sucessivamente maiores através da utilização de alguma medida de similaridade ou de distância (GUEDES *et al.*, 2010; 2012).

Por fim, segundo Macedo *et al.* (2010), a análise de agrupamentos é utilizada em processos de classificação e consiste em determinar o nível de similaridade ou dissimilaridade entre indivíduos, aplicando uma função de agrupamento a uma determinada variável.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi desenvolvida por Pearson em 1901, e é uma técnica estatística de análise multivariada que, através de transformações lineares, descreve a interrelação das variáveis, explicando estrutura de interdependência dessas e cria um novo conjunto com o número de variáveis inferior ao conjunto original. A ACP foi utilizada para observar os diferentes ou semelhantes comportamentos da pluviométricos da Bacia Hidrográfica Rio São Francisco.

2.5 Coeficiente de similaridade

Para validar/reforçar os resultados da análise de agrupamentos, foram calculados os coeficientes de similaridade entre as precipitações das sub-bacias através do software SPSS versão 20, conforme método desenvolvido por Jaccard (1901) e também utilizado por Souza *et al.* (1997).

O coeficiente de similaridade de Jaccard apresenta valor 1 se as amostras são idênticas e valor 0 se são completamente distintas, e de posse dos dados desse coeficiente foi construída a tabela com coeficientes de similaridade.

2.6 Análise de Ondaleta

Os dados coletados foram tratados para gerar o índice de Prp e em seguida submetidos à Análise de Ondaleta (AO) para identificação das causas (fenômenos ou sistemas meteorológicos) que ocasionaram os eventos extremos em cada sub-bacia do rio São Francisco. Essa identificação ocorre através da identificação e determinação das escalas dominantes e ciclos, já que a AO é uma técnica eficiente para identificar as escalas de variabilidade dominantes em uma série temporal, juntamente com suas localizações no tempo (TORRENCE; COMPO, 1998).

O índice de Prp se refere à anomalia mensal de precipitação, normalizada pelo respectivo desvio-padrão mensal, calculado através de:

$$AVar_{ij} = \left(\frac{Var_{ij} - \overline{Var}_i}{\delta_i} \right) \quad (2)$$

Em que: $AVar_{ij}$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; Var_{ij} é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; \overline{Var}_i e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

O uso desse índice é justificado e utilizado por diversos autores como Kousky e Chu (1978), Aceituno (1988), Andreoli et al. (2004), Kayano e Blain (2007), Da Silva (2009), Da Silva (2017).

O termo ondaleta, ondeleta ou wavelet estende-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas produzidas por dilatações e translações de uma função simples $\psi(t)$ de variável real t , eventualmente chamada de *ondaleta-mãe* ou *ondaleta básica*.

A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes aos de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria e variação temporal brusca ou suave.

Estes critérios são adotados para a utilização da ondaleta para identificações de variações em escalas sinóticas, oscilações intra-sazonais e outras variações meteorológicas de diferentes escalas temporais (WENG; LAU, 1994) e é definida pela seguinte expressão:

$$\Psi(t) = e^{iW_0t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

a qual representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano. Em que: i = parâmetro de dilatação e compressão da onda; W_0 = parâmetro de frequência e t = tempo.

Todos introduzidos no ‘script’ de programação de Torrence e Compo (1998) no software Matlab 12 com licença pessoal.

2.7 Software Surfer

Foi utilizado o software Surfer 9, com licença pessoal, para gerar mapas de distribuição espacial dos valores de probabilidade de eventos específicos e de seus períodos de retorno, como exemplo: ENOS na fase positiva ocorrendo simultaneamente com ODP na fase positiva; ENOS na fase positiva ocorrendo simultaneamente com ODP; sempre em ocasiões de ocorrência simultânea dos principais fenômenos climáticos, verificando o comportamento pluviométrico resultante da união desses fenômenos, conforme teorias de Rockwood e Maddox (1988) e Hastenrath e Heller (1977), e assim visualizar áreas vulneráveis aos impactos dos eventos extremos na Bacia em momentos climáticos específicos. O software também foi utilizado para gerar mapas com índices de SPI. Os anos escolhidos para o desenvolvimento de mapas de distribuição espacial de SPI durante eventos de ENOS foram baseados na Tabela 3, da NOAA (2019).

Tabela 3: Anos e meses de ocorrência do ENOS (El Niño em vermelho, La Niña em azul, e Neutralidade em preto) entre 1976-2018. Fonte: NOAA/ CPC (2019).

	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1976	-1,5	-1,1	-0,7	-0,4	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,8
1977	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	0,8
1978	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	0
1979	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6
1980	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,2	0	0,1	0,1	0
1981	-0,2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0
1982	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5	1,9	2,1	2,1
1983	2,1	1,8	1,5	1,2	1,0	0,7	0,3	0	-0,3	-0,6	-0,8	-0,8
1984	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3	-0,6	-0,9	-1,1
1985	-0,9	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3
1986	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,0	1,1
1987	1,1	1,2	1,1	1,0	0,9	1,1	1,4	1,6	1,6	1,4	1,2	1,1
1988	0,8	0,5	0,1	-0,3	-0,8	-1,2	-1,2	-1,1	-1,2	-1,4	-1,7	-1,8
1989	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
1990	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4
1991	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	1,2	1,4
1992	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	0,5	0,2	0	-0,1	-0,1	0
1993	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
1994	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	1,0
1995	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0	-0,2	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-0,9
1996	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5
1997	-0,5	-0,4	-0,2	0,1	0,6	1,0	1,4	1,7	2,0	2,2	2,3	2,3
1998	2,1	1,8	1,4	1,0	0,5	-0,1	-0,7	-1,0	-1,2	-1,2	-1,3	-1,4

1999	-1,4	-1,2	-1,0	-0,9	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,2	-1,4	-1,6
2000	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8
2001	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3
2002	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,8	0,9	1,1	1,2	1,1
2003	0,9	0,7	0,4	0	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
2004	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7
2005	0,7	0,6	0,5	0,5	0,3	0,2	0	-0,1	0	-0,2	-0,5	-0,7
2006	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9
2007	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,1	-1,3	-1,3
2008	-1,4	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,7	-0,6	-0,4	-0,1	0,2	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	1,1	1,3
2010	1,3	1,2	0,9	0,5	0,0	-0,4	-0,9	-1,2	-1,4	-1,5	-1,4	-1,4
2011	-1,3	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-0,9
2012	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	-0,2
2013	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
2014	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,4	0,5	0,6
2015	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,2	2,3
2016	2,5	2,2	1,7	1	0,5	0	-0,3	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	-0,1	-0,4	-0,7	-0,9	-1
2018	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,7	0,9	0,8

Para a escolha preliminar dos anos que foram utilizados para desenvolver as figuras dos mapas de Dipolo do Atlântico (DA), foi utilizado a Tabela 4

Tabela 4: Anos de ocorrência do DA e suas fases.
Fonte: Souza e Nobre (1998) e Andreoli & Kayano (2007).

Fase negativa	Fase positiva
1949, 1964, 1965, 1971, 1972, 1973, 1974, 1977, 1984, 1985, 1986, 1989	1951, 1953, 1954, 1956, 1958, 1966, 1969, 1970, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1992, 1997

Na escolha preliminar dos anos para a ocorrência de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), utilizou-se a seguinte Tabela 5:

Tabela 5: Anos de ocorrência de ODP e suas fases.
Fonte: Mantua *et al* (1997).

ODP e DA positivos	ODP e DA negativos	ODP positiva e DA negativo	ODP negativa e DA positivo
1980	1964	1984	1966
1981	1965	1985	1969
1983	x	1986	1970
x	x	1983	x

Por fim, para a escolha definitiva dos anos tanto de DA quanto de ODP, foram relacionados anos com ocorrência simultânea de ODP e DA positivos, ODP e DA negativos, ODP positiva e DA negativo e ODP negativa e DA positivo, conforme a Tabela 6:

Tabela 6: Anos em comum de ODP e DA e suas fases.
Fonte: Autor

Fase negativa	Fase positiva
1962 a 1970, e de 2000 a 2002	1935 a 1945, e de 1980 a 1989

2.8 Probabilidade e Período de Retorno

Chama-se de P , a probabilidade de um evento ocorrer em um ano qualquer (Cavalcante, 2019). Para Mendonça (2018) período de retorno (T) é o intervalo de tempo (geralmente em anos) em que se espera que o evento extremo seja igualado ou superado ao menos uma vez. Dessa forma, foram utilizadas as seguintes equações:

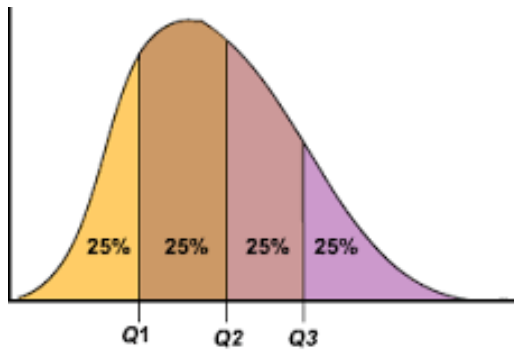
$$P = m / n \quad (4)$$

$$T = 1 / P \quad (5)$$

Em que: P = probabilidade de ocorrência de um evento igual ou superior (\geq), m = número de eventos iguais ou inferiores, n = número de dados do evento e T = período de retorno do evento.

2.9 Quartil

Quartis (Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4) são valores dados a partir do conjunto de observações ordenado em ordem crescente, que dividem a distribuição em quatro partes iguais. O primeiro quartil, Q_1 , é o número que deixa 25% das observações abaixo e 75% acima, enquanto que o terceiro quartil, Q_3 , deixa 75% das observações abaixo e 25% acima. Já Q_2 é a mediana, deixa 50% das observações abaixo e 50% das observações acima. Por fim, do valor de Q_4 para baixo, tem-se 100% dos dados (Figura 2). As fórmulas utilizadas nesta pesquisa podem ser verificadas em Xavier (2001) (Figura 2):



$$Q_1 = X_1 + \left(\frac{n+1}{4} - k\right) (X_{k+1} - X_k) \quad (6)$$

$$Q_2 = X_3 + \left(\frac{2(n+1)}{4} - k\right) (X_{k+1} - X_k) \quad (7)$$

$$Q_3 = X_5 + \left(\frac{3(n+1)}{4} - k\right) (X_{k+1} - X_k) \quad (8)$$

Figura 2: Representação e fórmulas da técnica de quartil.
Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Índice de Precipitação Normalizado (SPI)

As classificações pelo SPI foram utilizadas em vários trabalhos, em diferentes lugares do Brasil: Paraíba (MACEDO et al., 2010); Piauí (GUEDES et al., 2012); Espírito Santo (ULIANA et al., 2015); Bahia (SOUSA et al., 2016); Maranhão (NASCIMENTO et al., 2017); Amazônia (SANTOS et al., 2017); São Paulo (BONFIM & DA SILVA, 2018); assim, todos os autores confirmam que o SPI mostra ser uma importante ferramenta na detecção dos eventos extremos de chuvas/secas.

No geral, as quantidades de secas leves e secas moderadas foram maiores que as de chuvas leves e chuvas moderadas; a persistência de secas com intensidade leve requer atenção por parte de gestores, visto que, os eventos menos intensos de secas podem se desenvolver para mais intensos, consoante à atuação de fenômenos externos (NASCIMENTO *et al.*, 2017), contribuindo com possíveis agravamentos nos setores hídrico, e agro econômico.

Altos valores de SPI caracterizando eventos extremos foram identificados em todas as sub-bacias. Esses eventos ocorreram em muitos casos devido à ocorrência simultânea de várias escalas temporais, ou ausência de todas, sendo responsáveis por anomalias pluviométricas, corroborando com Andreoli *et al.* (2004), Gershunov e Barnett (1998) e Da Silva (2017).

No ASF houveram maiores atividades entre as escalas cujo período é de 0,25 a 4 anos. Dentre essas, as mais frequentes, ocorreram entre as escalas sazonal (0,25 anos) e semestral (0,5 anos). Alguns eventos na escala interanual (> 1 ano) ocorreram em 1955, 1958, 1965, 1970 a 1980, 1982, 1985, 1990, 2000, 2010. Já os mais intensos eventos em decorrência do ENOS (entre as escalas de 1 a 2 anos) foram em 1950, 1955, 1972, 1976, 1982, 1990, 2005

a 2009. Os ENOS estendidos (escala temporal de até 8 anos) foram mais fortes e, 1955, 1965 e 2009. No ASF, o Dipolo do Atlântico (escala de 7 anos) mostrou-se menos intenso mas presente em alguns períodos.

Através da Figura 3 verifica-se que no Alto São Francisco (ASF), ocorreu só um único caso de seca extrema. Lembrando que no ASF encontra-se a cabeceira do rio São Francisco, o que pode levar a uma considerável diminuição de sua chuva, e conseqüentemente, da vazão.

Na região do ASF a maior parte dos eventos foram classificados como “quase normal”, com 46,83% das ocorrências. Somando todas as classes que são denominadas como seca, totalizou-se 28,99% dos eventos, enquanto 24,17% é o somatório de todas as classes de chuva. No entanto, chuvas extremas e severas no ASF são superiores às ocorrências de secas extremas e severas. Do ponto de vista de ocorrência de secas, os possíveis impactos podem apresentar uma abrangência de veranicos de curtos prazos, no caso da categoria de “seca fraca”, quando a seca ainda está em estado inicial, a perdas de culturas e escassez de água em poços e reservatórios, gerando situações emergenciais, como é o caso da ocorrência de “seca extrema”.

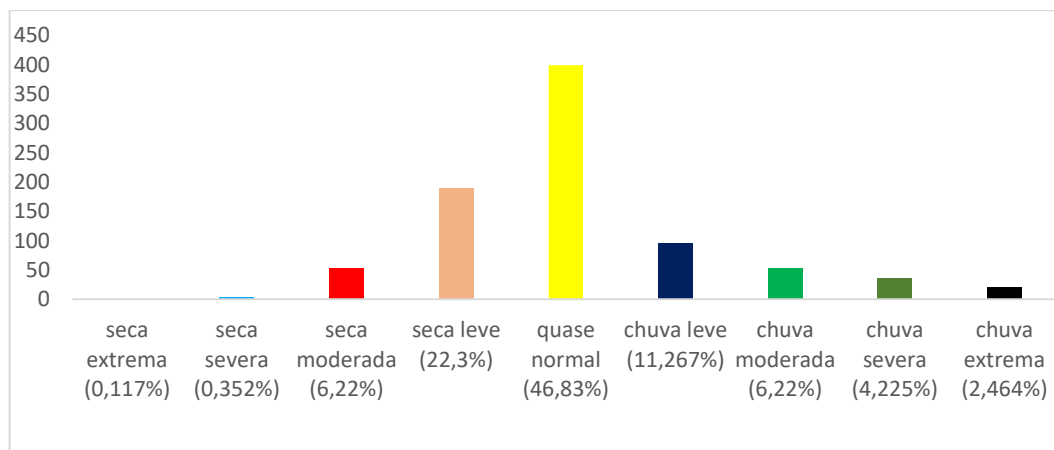


Figura 3: Classificação e quantificação dos eventos extremos do Alto São Francisco.
Fonte: Autor.

No Médio São Francisco (MSF), observa-se que ocorreu a maior quantidade de eventos climáticos na categoria “quase normal”, aproximadamente 60% dos casos (Figura 4). O MSF obteve o somatório de todas as secas igual a 23,11%, e o somatório de todas as chuvas apresentou uma porcentagem de 17,75%. Embora, de acordo com o que é exibido na Figura 4, não apresente nenhum evento de “seca extrema”, foi a região que mais apresentou eventos de “seca severa” em relação à toda Bacia do Rio São Francisco.

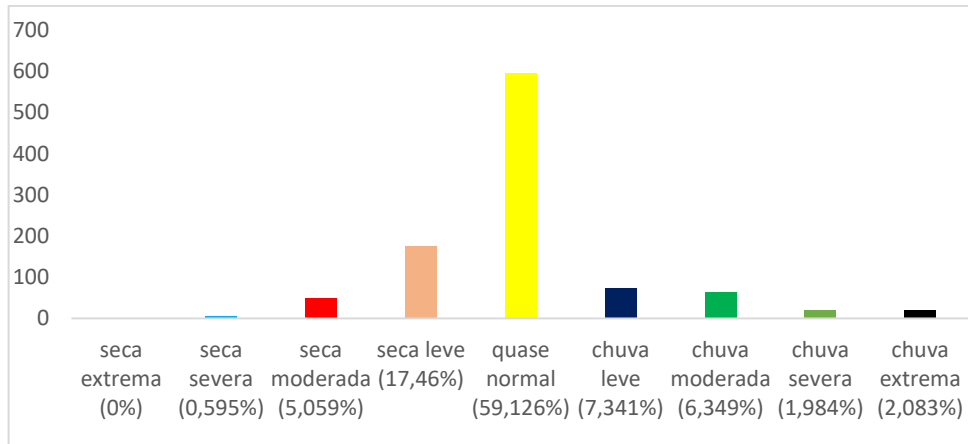


Figura 4: Classificação e quantificação dos eventos extremos do Médio São Francisco. Fonte: Autor.

A sub-bacia do Submédio São Francisco (SMSF) não apresentou valores que se adequem na categoria “seca extrema” e nem “seca severa” (Figura 5); e ao mesmo tempo, também registrou o menor índice de “chuva extrema”. Contudo, destacou-se por ter maior índice em relação as outras sub-bacias na categoria de “seca leve”. Quando somadas as porcentagens dos índices classificados como “seca”, a quantidade das secas no SMSF equivale a 24,84% dos casos, e o somatório das classes de chuva é igual a 17,66%.

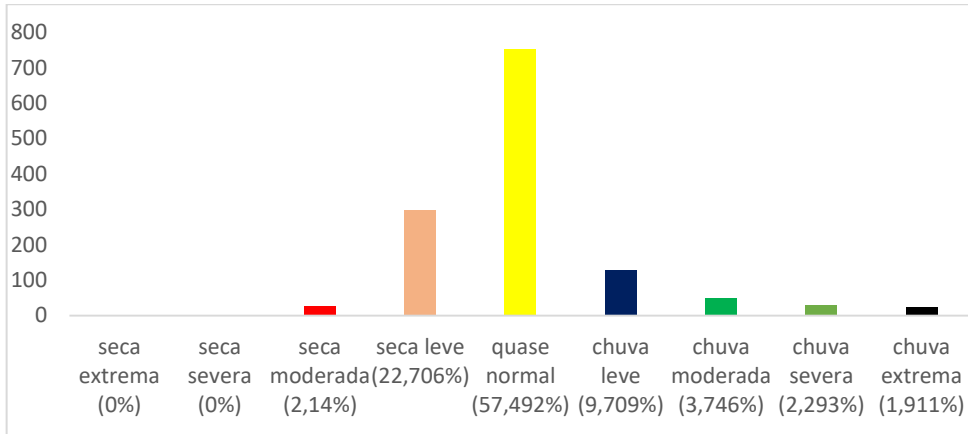


Figura 5: Classificação e quantificação dos eventos extremos do Submédio São Francisco. Fonte: Autor.

A região do Baixo São Francisco (BSF) apresentou o maior índice de “chuva extrema”, chegando a 3,24%, como visto na Figura 6. As categorias de chuva ocuparam 18,42% do total de eventos e quanto ao índice de precipitação normal, pode-se notar que 55,37% dos eventos, ficaram próximos ou igual à média climatológica da região (Figura 6).

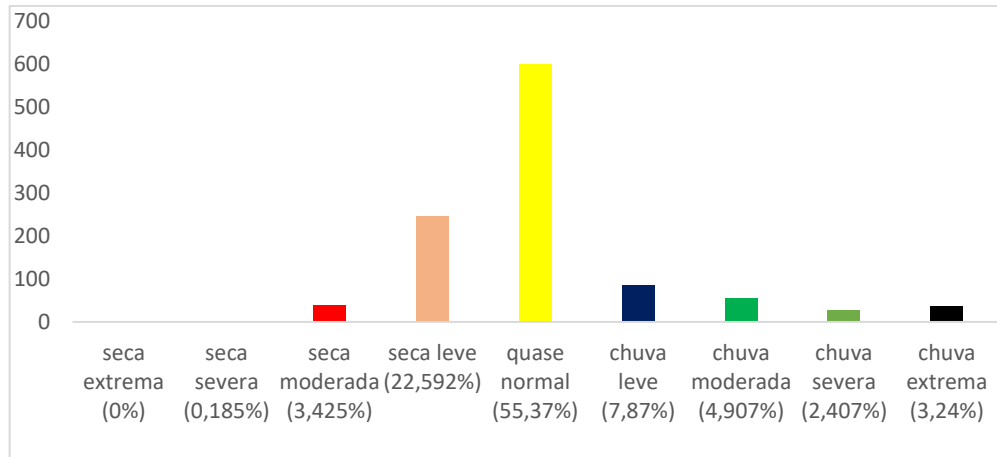


Figura 6: Classificação e quantificação dos eventos extremos do Baixo São Francisco.
 Fonte: Autor.

3.2 Análise de agrupamentos e Análise de Componentes Principais

Esse método também foi utilizado por Melo (2016) para identificar áreas homogêneas e suas semelhanças, dentro do domínio da região semiárida nordestina e por Farias (2016) para sub-bacia hidrográfica do Rio Taperoá (PB).

Através da Análise de Agrupamentos, vista na Figura 7, observa-se que as precipitações do SMSF e BSF apresentam ligação direta, ou seja, com maiores semelhanças devido à curta distância euclidiana entre essas sub-bacias, formando um grupo entre ambas. Posteriormente, este grupo tem relação menos direta com MSF, mostrando menor semelhança entre BSF/SMSF e MSF. Por fim, as três sub-bacias são relacionadas ao ASF em ligação indireta em virtude da máxima distância euclidiana adquirida, demonstrando a menor semelhança possível com o ASF.

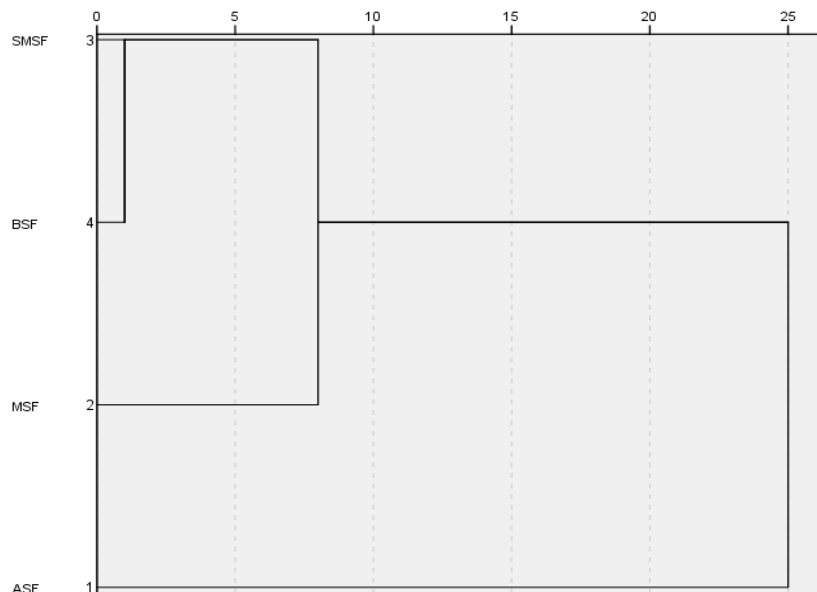


Figura 7: Análise de agrupamentos entre as sub-bacias hidrográficas do rio São Francisco. O eixo X representa a distância euclidiana; quanto maior, menor a semelhança; e o eixo Y são as localidades em estudo.
Fonte: Autor.

Os diferentes fatores encontrados pela Análise de Componentes Principais (ACP) representam os diferentes padrões ou regimes pluviométricos e ao mesmo tempo, áreas pluviometricamente homogêneas. O fator 1 evidencia o regime pluviométrico do BSF e parte do SMSF, que é ao mesmo tempo, distinto do ASF (Figura 8).

Segundo Alves *et al.* (2001; 2006) e Fedorova *et al.* (2006) o regime pluviométrico dessa região é decorrente da atuação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (FEDOROVA *et al.*, 2006), das Ondas de leste (COUTINHO e FRITSCH, 2007) e das Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios (POAs) (MOLION e BERNARDO, 2002), ocorrendo majoritariamente de maio a agosto, e podendo nos meses de verão ocorrer no NEB os VCANs e Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) em médios níveis da atmosfera (FEDOROVA *et al.*, 2006).

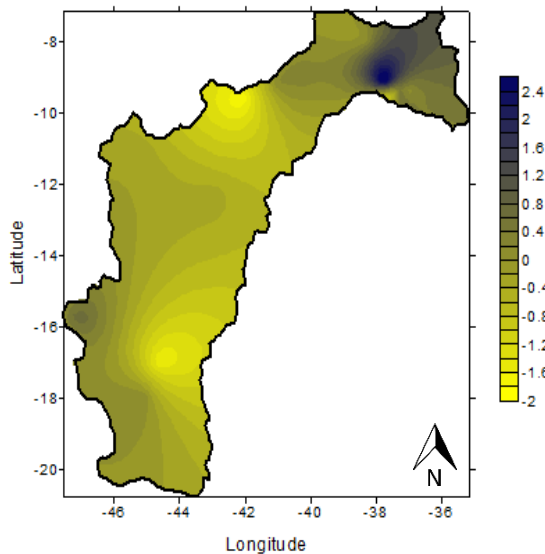


Figura 8: Fator 1. Fonte: Autor

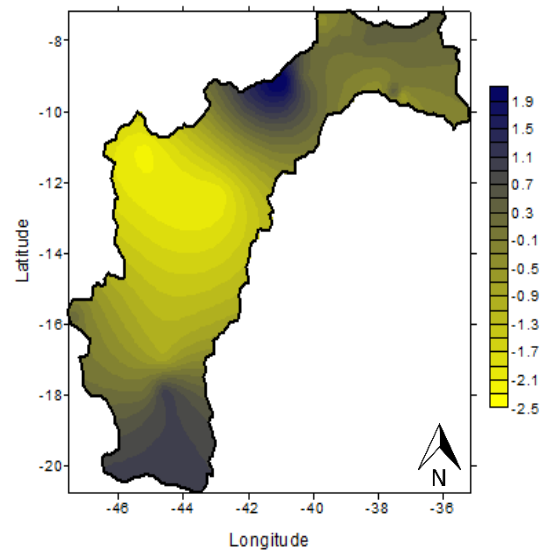


Figura 9: Fator 2. Fonte: Autor

O fator 2 (Figura 9) evidencia a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que ocorre de novembro a março no ASF, e os VCANs e VCMNs que podem ocorrer, de janeiro a março no NEB e podem proporcionar períodos simultâneos de precipitação em ambas sub-bacias, no entanto com sistemas causadores de chuva distintos. No entanto, o regime do MSF, mostra-se diferente do restante da Bacia hidrográfica (Figura 9).

De acordo com Da Silva (2005) ao longo da latitude 20° S é observada uma faixa de precipitação mais elevada nos meses de novembro a março, a qual seria a posição média da ZCAS sobre esta Bacia hidrográfica. Esse sistema foi apontado como o principal

mecanismo produtor de precipitação na Bacia. O fator 2 pode também estar relacionado à interação da ZCAS com a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao longo do verão, como apontado por Ferreira *et al* (2004).

No fator 2 (Figura 9) ainda percebe-se que o MSF não está em seu período chuvoso. De acordo com Da Silva (2005), no MSF, em torno da latitude de 15° S, há uma diminuição de umidade, aproximadamente na divisa entre Minas Gerais e Bahia, porque nessa região ocorre escoamento que é em média de nordeste, e a Chapada Diamantina serve de barreira ao escoamento de umidade. Desse modo, seria mais um fator para o MSF não apresentar o mesmo período chuvoso do ASF.

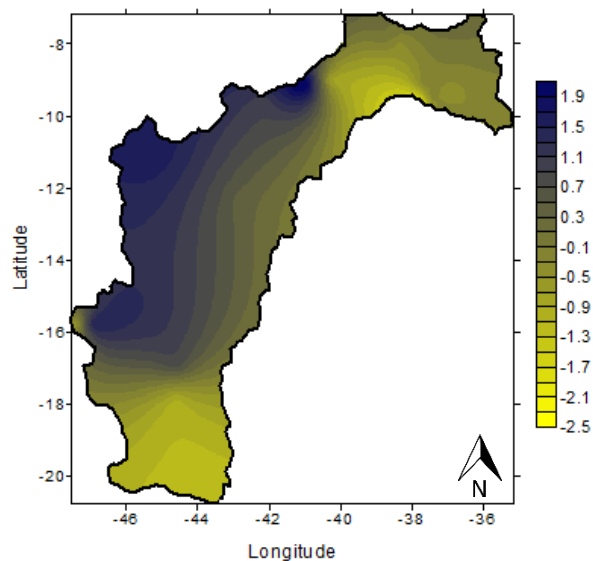


Figura 10: Fator 3. Fonte: Autor

3.3 Coeficiente de Similaridade

Os resultados da Análise de Agrupamentos e ACP, são reforçados pelos coeficientes de similaridade das sub-bacias, dispostos na Tabela 7. Nela, vê-se que o MSF tem pouca similaridade com BSF/SMSF e pouca relação e inversa com ASF, como também encontrado na análise de agrupamentos.

O ASF mostrou-se dissimilar às outras sub-bacias, acompanhando a análise de agrupamentos. O SMSF, é inverso ao comportamento do ASF e mais similar ao BSF. O BSF, por sua vez, é dissimilar ao ASF, tem baixa similaridade com MSF e melhor com SMSF (Tabela 7).

Tabela 7: Coeficientes de similaridade entre as sub-bacias do rio São Francisco.
Fonte: Autor.

	ASF	MSF	SMSF	BSF
ASF	-	-0,022	-0,052	-0,029
MSF	-0,022	-	0,075	0,024
SMSF	-0,052	0,075	-	0,118
BSF	-0,029	0,024	0,118	-

Desta forma, diante das correlações apresentadas, o SMSF e BSF têm uma correlação com ordem de grandeza 10 vezes maior quando comparadas com as correlações entre as outras sub-bacias, denotando que o SMSF e BSF têm maiores interações e semelhanças nos seus regimes pluviométricos.

3.4 Análise de Ondaleta

A Análise de Ondaleta apresenta a habilidade de detectar diferentes escalas temporais em uma série de dados. Foram identificadas ocorrências da escala sazonal a semestral de 0,25 - 0,5 anos, cujos picos espectrais são estatisticamente significantes. A presença de escala temporal de 1 a 2 anos foi observada em todas sub-bacias, estando associada ao ciclo anual dos sistemas acoplados oceano-atmosfera atuantes com causas e período de ocorrência distintos e ENOS. Também foi observada variabilidade na escala de até 7 anos, relacionadas com eventos de ENOS estendido e Dipolo do Atlântico (CLAUZET; WAINER, 1999) e na escala de 11 anos, a qual está associada ao Ciclo de manchas solares (KERR, 1996; ECHER et al., 2003; MOLION, 2005) e também ao Dipolo do Atlântico (SOUZA et al., 1998; SERVAIN et al., 1999).

A escala temporal de 22 anos também pode ser visualizada em alguns momentos em algumas séries. Beer et al (2000) revelam que além do ciclo solar de Schwabe (11 anos), o astro apresenta um ciclo solar que é um ciclo magnético no qual a polarização magnética das manchas solares se inverte a cada 22 anos, o chamado ciclo de Hale, o qual pode ser relacionado à escala temporal observada de 22 anos. No mesmo sentido, Zuffo (2015) afirmou que esse ciclo apresenta influência significativa dos efeitos do Sol no clima da Terra, uma vez que representa uma forçante radioativa considerável nas mudanças climáticas. Já Scafetta (2010; 2012) e Oliveira et al (2017) relacionaram a escala de 22 anos à Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP), que apresenta um ciclo variando entre 15 e 30 anos e afeta tanto norte quanto o sul do Pacífico.

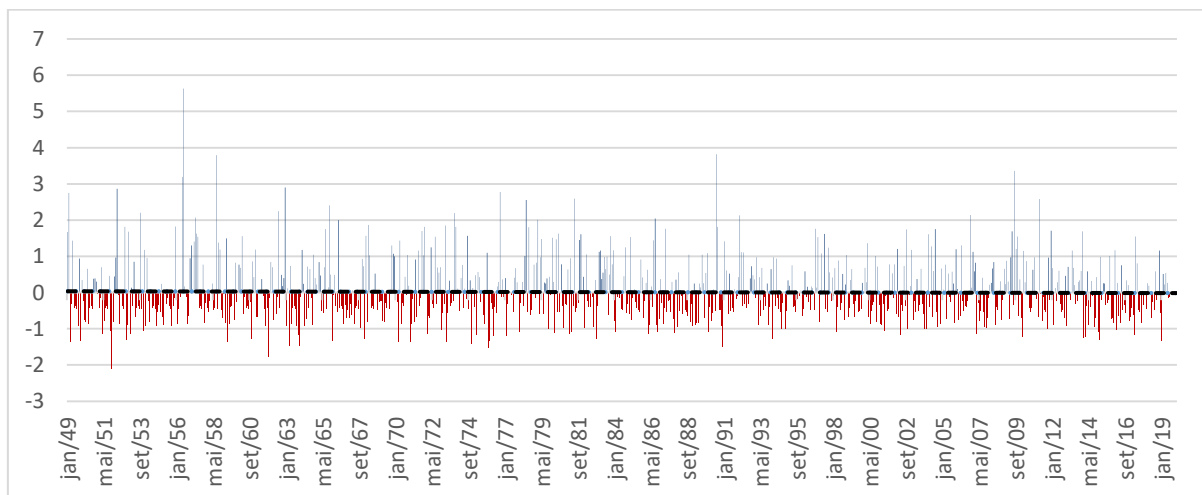
De acordo com Oliveira et al. (2015), o ciclo de 35 anos está relacionado ao período de periastro lunar. É objeto de investigação nos Países Baixos ainda no início do século

17. O ciclo de 35 anos ganhou notoriedade com os estudos de mudanças nos níveis do mar Cáspio conduzidos pelo Professor alemão Eduard Brückner, motivo pelo qual a periodicidade é ora conhecida como Ciclos de Brückner. Já ciclos de 64 a 80 anos alteraram a duração do dia em 4 milissegundos no início do século 20. Essas flutuações longas são devidas ao fluxo de ferro líquido no núcleo externo da Terra, onde o campo magnético terrestre se origina. Ao interagir com o manto da Terra, esse fluido afeta a rotação da Terra (DICKY et al. 2011). As variações recentes na duração do dia podem estar associadas a variações da temperatura média do ar na Terra, podendo provocar flutuações de até 0,2°C na temperatura superficial global.

Por fim, os ciclos de 50 a 70 anos são relacionados à Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (MANTUA et al, 1997; NEWMAN et al, 2003) e os de 50 a 90 anos, à Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) (GIORGIO, 2013).

Altos valores de SPI, caracterizando eventos extremos foram identificados em todas as sub-bacias, principalmente na sub-bacia do MSF, com máximo valor atingindo aproximadamente 8 na escala do SPI. Esses eventos acontecem em muitos casos devido à ocorrência simultânea de várias escalas temporais que podem favorecer a ocorrência de chuvas, ou em decorrência da ausência de todas ou de algumas, promovendo assim anomalias pluviométricas negativas, corroborando com Hastenrath e Heller (1977), Gershunov e Barnett (1998) e Da Silva (2017).

No ASF (Figura 11) houveram maiores atividades entre as escalas temporais de 0,25 a 1 ano. Os mais intensos eventos em decorrência do ENOS foram em 1950 a 1954, 1958 a 1963, 1970 a 1972, 1976 a 1980, 1980 a 1983, 1991, 2001 a 2010. O ENOS estendido teve atuação mais fortes em 1950, e de 2008 a 2011.



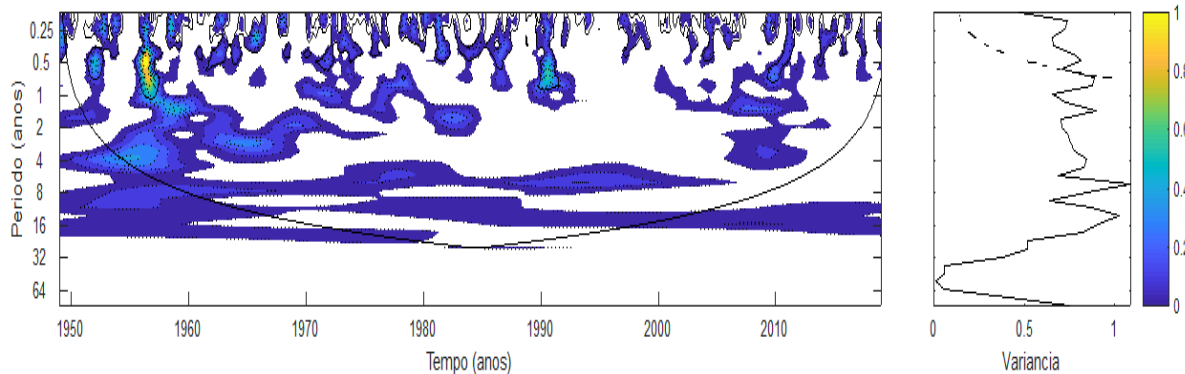


Figura 11: a) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o ASF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: Autor.

Já a escala temporal de 11 anos foi atuante no ASF de 1951 a 1962. Ocorreu chuva extrema na região do ASF, explicando o valor do SPI maior que 5 no ano de 1956 (Figura 11a). Esse evento foi devido associação de vários sistemas/fenômenos que ocorreram simultaneamente (Figura 11b) nas escalas sazonal + semestral + interanual + ENOS + ENOS estendido + escala de 11 anos + escala de 22 anos.

Além disso, no final do ano de 1951, ocorreu um período de seca extrema, devido à presença do fenômeno ENOS com intensidade moderada e nenhum evento nas escalas sazonal, semestral e anual. Houve também a existência de atividade na escala de 4 a 8 anos devido ao ENOS estendido e na escala de 11 a 22 anos, relacionada ao ciclo de mancha solares e OIP. Consolidou-se nesta sub-bacia como dominante, a escala de temporal entre 4 e 8 anos, relacionado ao ENOS estendido, no entanto, as escalas sazonal e semestral tiveram picos espectrais estatisticamente significantes.

Para o MSF (Figura 12) observou-se a presença da escala sazonal, da escala semestral, da escala associada ao ENOS, de escalas relacionadas à variabilidade oceânica entre 30 e 55 anos. Conforme já citado, escalas entre 15 e 30 anos relacionam à OIP, entre 50 e 70 anos ODP e entre 50 e 90 anos, à OMA; essas últimas não tiveram seus ciclos completos visualizadas no MSF devido tamanho da série temporal.

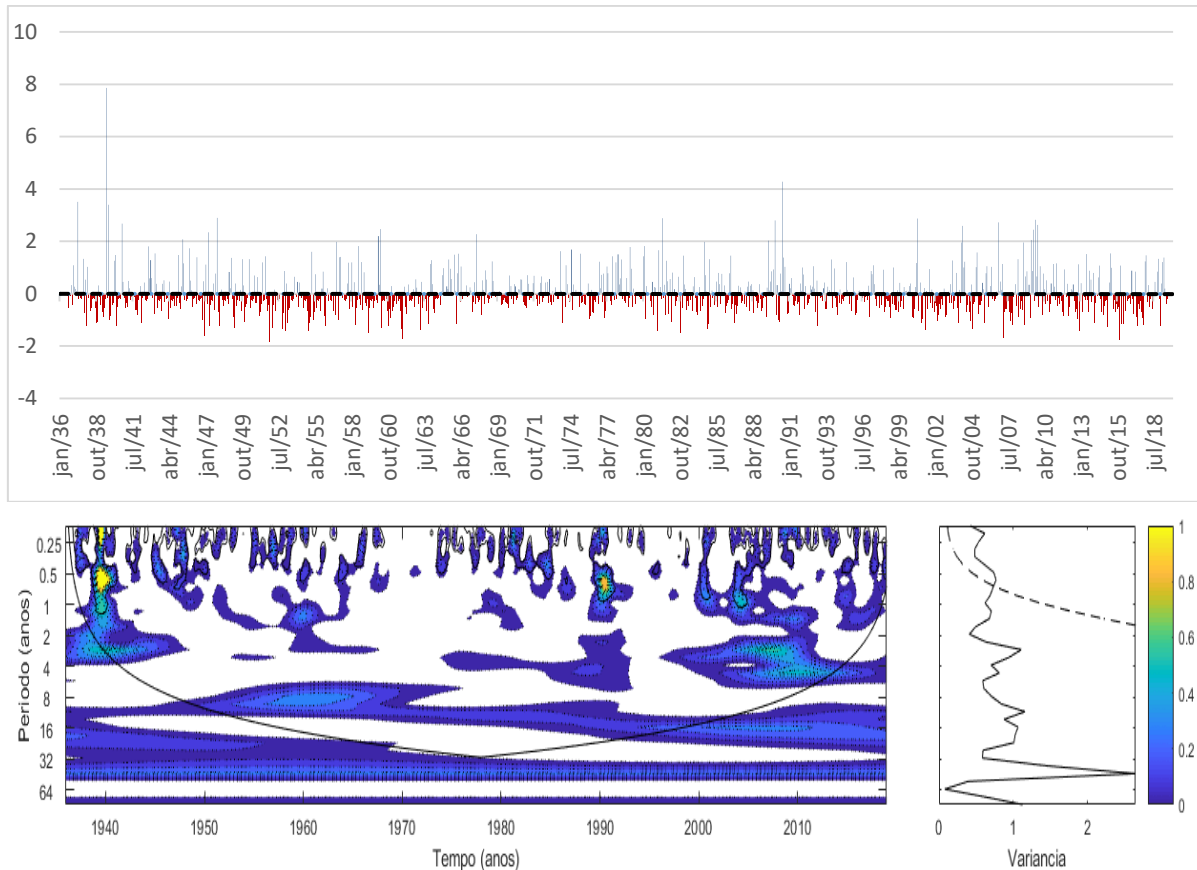


Figura 12: a) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o MSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: Autor.

Além disso, conforme a Figura 12, também foi notável a presença do fenômeno de manchas solares com ciclo de 11 anos, porém em fraca intensidade.

No MSF houve ausência de sinais na escala semestral, interanual curta e de ENOS. No entanto, foram presentes as escalas sazonal, de 11 anos, e a escala entre 20 e 35 anos, tendo como exemplo o ano de 1951. Contudo, ocasionaram uma seca severa, de acordo com o SPI. Os ciclos de 35 e de 64 anos também foram observados na série do MSF. O período de 50 anos se tornou a escala dominante, enquanto a maior significância estatística, com nível de confiança de 95%, se manteve na escala sazonal e semestral.

Diferentemente da análise de ondaleta do ASF e MSF, no SMSF (Figura 13) as escalas sazonal e semestral não ocorreram em alguns momentos da série, contudo foi a sub bacia que mais houve eventos meteorológicos mais intensos e duradouros na escala de 11 anos e na escala temporal maior que 60 anos. A região não apresentou índices de secas severas e nem secas extremas, ficando somente com ocorrência de secas moderadas. De acordo com a

ondaleta, a escala dominante ficou no período de 35 anos relacionado à interação entre Terra-Lua-Sol.

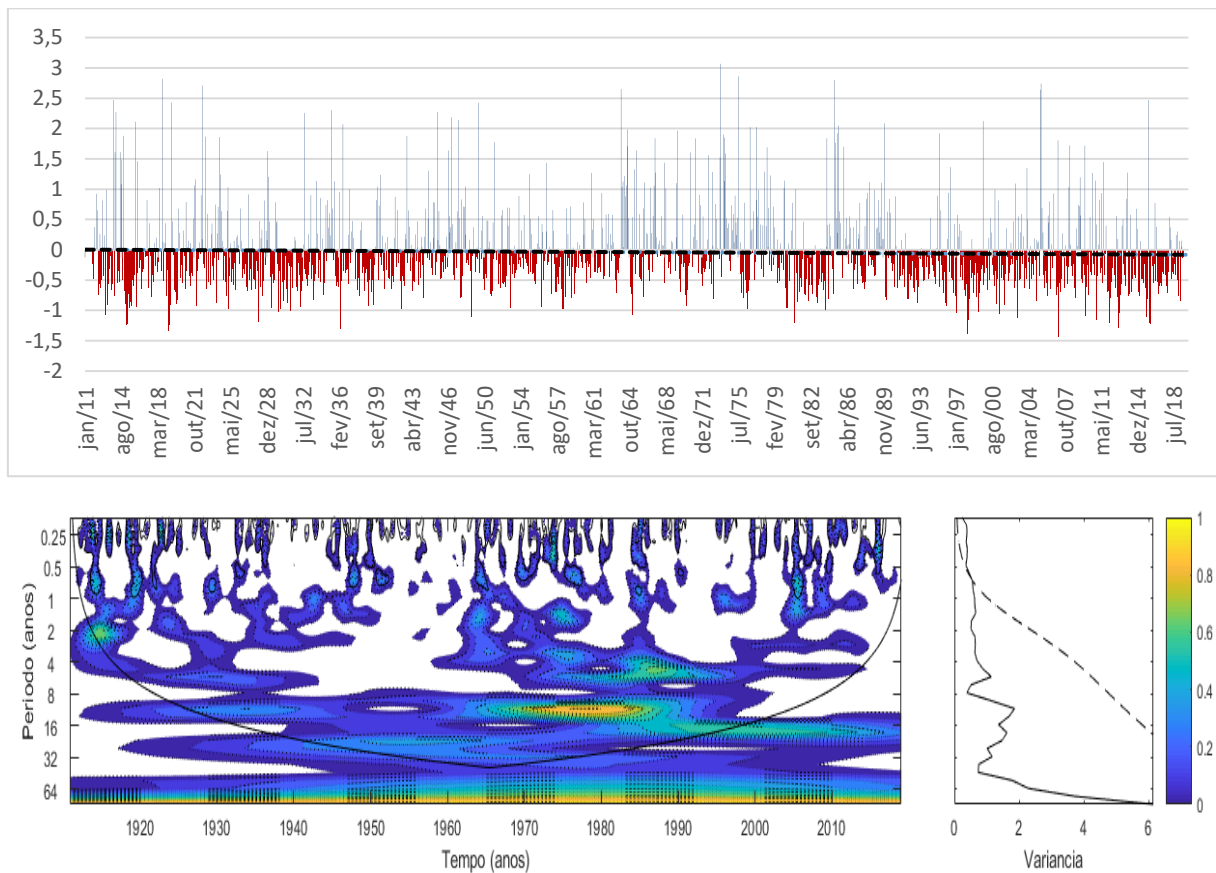


Figura 13: a) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o SMSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: Autor.

Tendo como exemplo o ano de 1973, a chuva extrema ocorrida foi ocasionada por sistemas e fenômenos meteorológicos simultâneos ocorridos na escala temporal sazonal, semestral de ENOS estendido, escalas de ciclos solares de 11 anos e 22 anos, além das atividades do Dipolo do Atlântico, escala temporal de 35 e a superior a 60 anos. Desse modo, o SMSF também corrobora com a hipótese de Gershunov e Barnett (1998).

Destacou-se como escala dominante no BSF o período de aproximadamente 22 anos e a significância estatística pode ser vista na escala sazonal e semestral. Escalas sazonal e semestral ocorreram em grande parte da série com ausência em 1957 a 1963, e após 1988, o que causou precipitações abaixo da média.

No BSF (Figura 14) foi ocasionada uma chuva extrema no início do ano de 1914 explicada por fortes atividades entre a escala semestral a de 1 ano, escalas de 2 a 4 anos devido ao fenômeno ENOS, e a escala de 22 anos ligados à OIP.

Já em 1955, pode-se notar que houve precipitação abaixo da média, sendo considerada como seca severa através da classificação do SPI, acarretada por pouquíssimas atividades na escala semestral até atuação da escala de ENOS estendido, no entanto, houve forte sinal na escala de 20 a 35 anos, os quais já foram explicados a que se relacionam. Essa interação entre sistemas e fenômenos de escalas temporais distintas também foi observada por Da Silva (2017), para parte do Nordeste brasileiro, o qual também é área do SMSF e BSF.

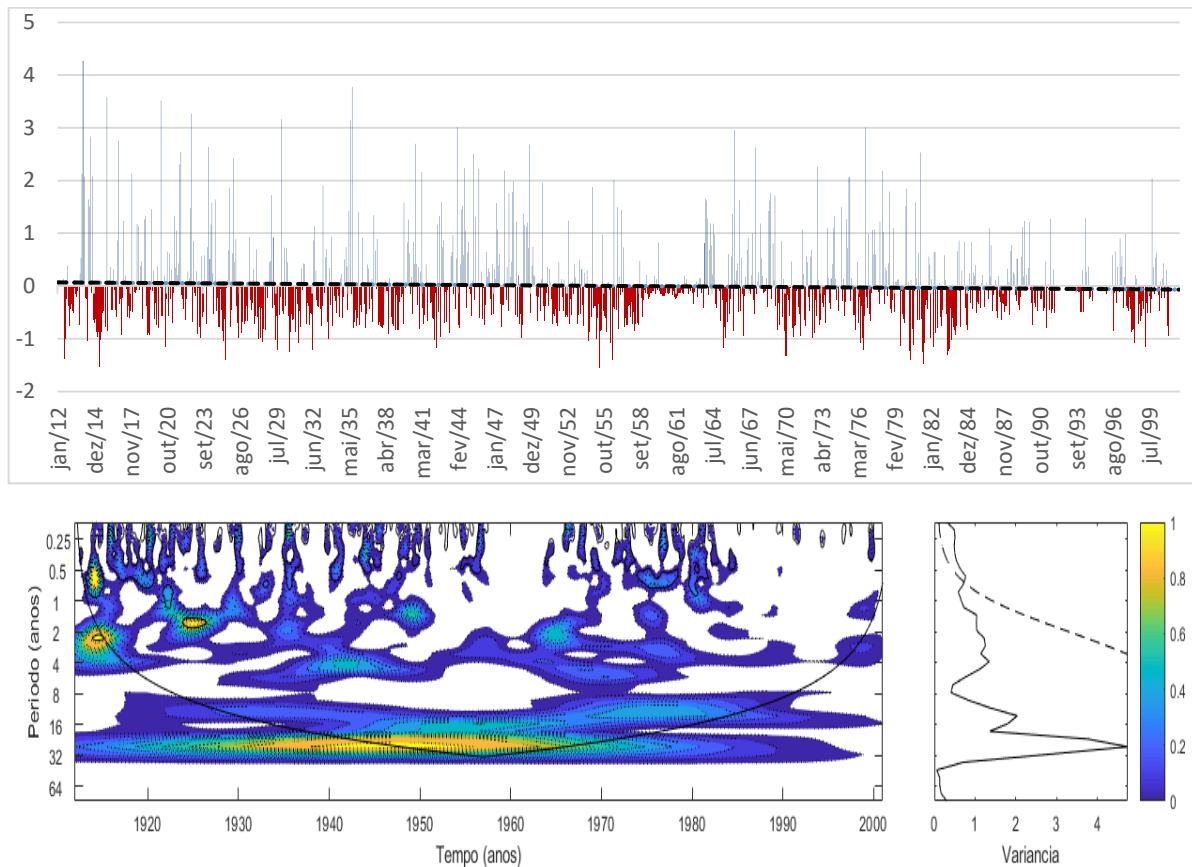


Figura 14: a) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o BSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; b) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: Autor.

3.5 Distribuição espacial do Índice de Precipitação Normalizado (SPI)

Na tentativa de verificar alguma modificação nos valores de SPI em anos de ocorrência de ENOS e de Dipolo do Atlântico, gerou-se mapas de distribuição espacial de SPI durante os anos desses fenômenos. Os anos de ocorrência de ENOS, Dipolo e ODP estão descritos nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

Durante Dipolo positivo (Atlântico Norte quente e Atlântico Sul frio) não há evidências de influências do Dipolo sobre o ASF/MSF, assim, os SPIs positivos nessas sub-bacias deve-se à parte da estação chuvosa em decorrência da atuação da ZCAS de novembro a março (Figura 15). Já o Atlântico sul frio, causou SPIs negativos no SMSF e BSF, corroborando com Andreoli e Kayano (2007). Ainda com Dipolo negativo, de Julho a dezembro (Figura 16), SPIs positivos ficaram restritos ao ASF, quando inicia atuação da ZCAS em novembro. Os valores negativos continuam no SMSF e BSF.

Como o ASF não está relacionado ao Dipolo, foram observadas leves anomalias positivas de janeiro a junho e de julho a dezembro, com exceção da divisa entre ASF e MSF, com SPI negativo. Mesmo com Atlântico sul positivo, o SMSF/BSF apresentaram baixos valores positivos de SPI (Figuras 17 e 18). Durante anos de El Niño visualizou-se SPI positivos do ASF ao MSF, e SPI negativos em quase totalidade no SMSF e BSF, como já era esperado mediante os impactos conhecidos do El Niño no Sudeste e Nordeste do Brasil. No entanto, de julho a dezembro o Sudeste (ASF) apresentou em algumas áreas o SPI negativo e o Nordeste, algumas áreas com valores positivos, possivelmente devido precipitações consideráveis no NEB ocorreram até agosto (Figuras 19 e 20).

Durante atuação de La Niña (Figuras 21 e 22) o ASF/MSF apresentaram SPI negativos em maior parte das sub-bacias e no SMSF/BSF ocorreram máximos valores de SPI em pequenas áreas do NEB e os valores de SPI negativos foram baixos/amenos. De julho a dezembro os valores positivos de SPI no ASF, mesmo durante La Niña, pode ser em decorrência da interação da ZCAS com a La Niña, conforme apontado por Ferreira et al (2009).

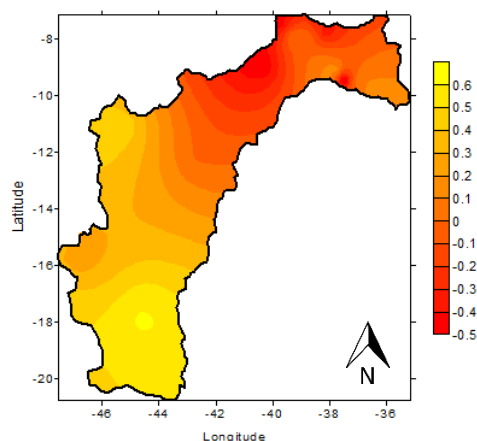


Figura 15: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico positivo de Janeiro a Junho.
Fonte: Autor.

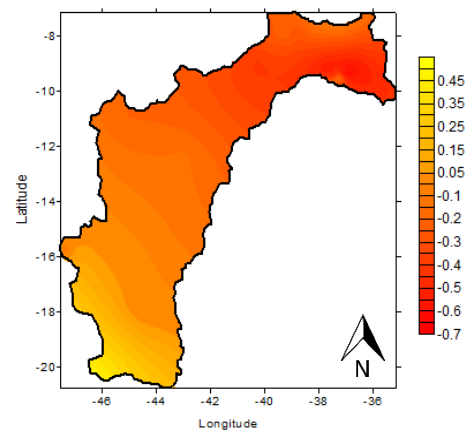


Figura 16: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico positivo de Julho a Dezembro.
Fonte: Autor.

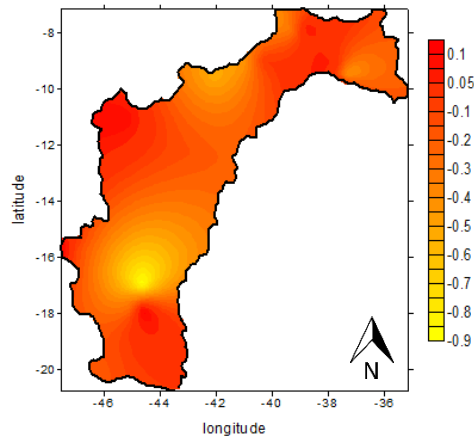


Figura 17: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico negativo de Janeiro a Junho. Fonte: Autor.

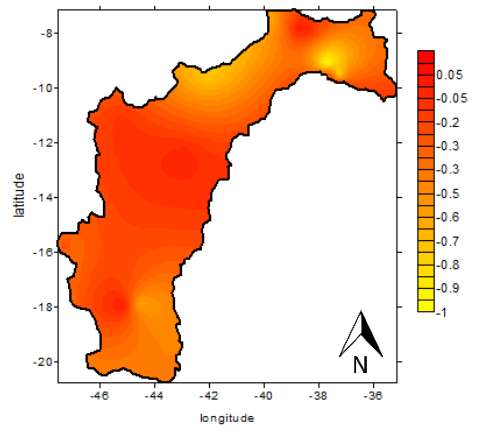


Figura 18: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de Dipolo do Atlântico negativo de Julho a Dezembro. Fonte: Autor.

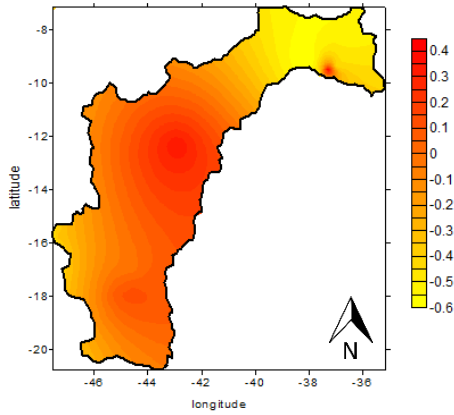


Figura 19: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de El Niño de Janeiro a Junho. Fonte: Autor

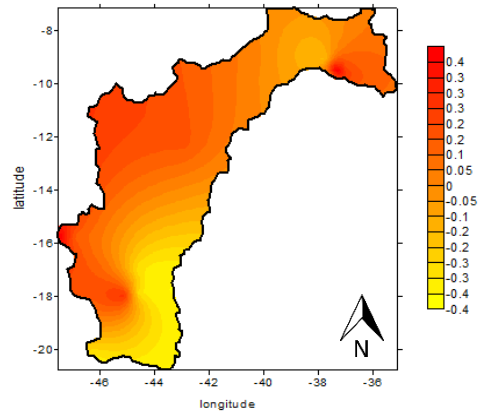


Figura 20: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de El Niño de Julho a Dezembro. Fonte: Autor

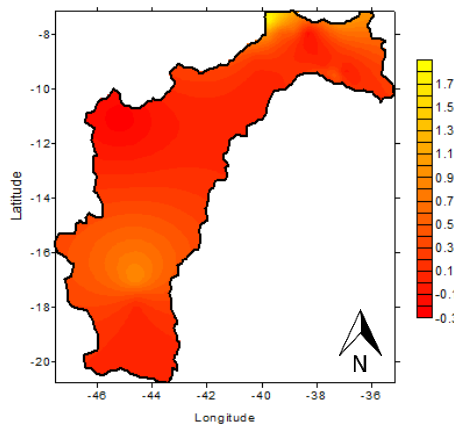


Figura 21: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de La Niña de Janeiro a Junho. Fonte: Autor.

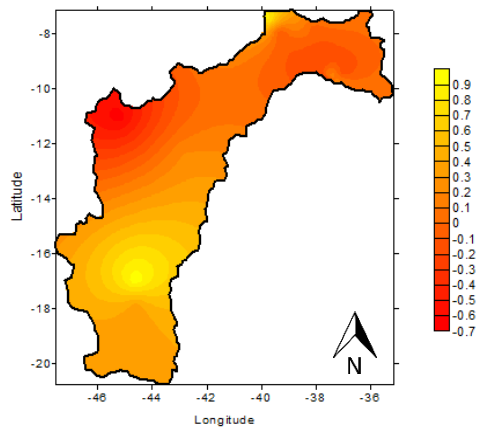


Figura 22: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de La Niña de Julho a Dezembro. Fonte: Autor.

Nos anos de ocorrência do fenômeno de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) juntamente com o fenômeno de Dipolo do Atlântico (DA), de janeiro a junho (Figura 23) a variação de índice do SPI, de acordo com a escala da Figura 23 foi de -0,5 até 0,6, sendo mais intenso na região da cabeceira do rio e diminuindo gradativamente em direção ao BSF adquirindo, desta forma, valores de SPI negativos ou próximos a zero na maior parte desta região. Contudo, na região oeste do MSF, o valor do SPI se mantém entre 0,5 a 0,3, transitando entre categorias de chuva leve e normal.

Na Figura 24 é possível notar uma evolução seguindo os mesmos padrões da Figura 23, na qual a foz está com valores de SPI ainda mais abaixo da média e se torna gradativamente maior em direção ao ASF. Entretanto, o maior valor positivo passa de 0,6, no período de janeiro a junho, para 0,45 de julho a dezembro, tornando as áreas em amarelo um pouco menos intensa do que no primeiro semestre dos anos. Além disso, é importante ressaltar que, segundo Gershunov e Barnett, quando a ODP e o DA estão evidenciados com os mesmos sinais, ou seja, na mesma fase, quer seja positiva ou negativa, há uma intensificação nas anomalias climáticas que, por sua vez, afetam diretamente no regime pluviométricos de determinadas regiões.

Quando a ODP e o DA estão ambos em suas fases negativas (Figura 25 e Figura 26), é possível notar o contrário do que foi analisado anteriormente nas fases positivas da ODP e DA. No período de janeiro a junho, conforme a Figura 25, nota-se que houveram mais áreas com o SPI muito próximo ou abaixo de zero, já que a escala variou entre -0,3 a 1,7, enquanto que no período de julho a dezembro há mais áreas com SPI positivo com a escala variando de -0,7 a 0,9. Houveram somente áreas com SPI positivo, no período de janeiro a junho, próximo à divisa entre a região do MSF e ASF, sendo a maior parte na região do MSF e na região noroeste da bacia do SMSF.

No segundo semestre dos anos de 1964 e 1965 (Figura 26) intensificou-se e expandiu a área de SPI positivo na região do MSF, próximo à divisa com o ASF, fazendo com que majoritariamente agora tenha mais áreas em amarelo do que em vermelha, ou seja, mais áreas com SPI positivo do que negativo, continuando negativo somente na região noroeste do MSF e com SPI próximo ou menor que zero na região sul do SMSF, perto da sub-bacia do BSF.

Quando em suas fases opostas, sendo ODP positiva e DA negativo, (Figura 27 e Figura 28), no primeiro semestre dos anos (Figura 27), o maior valor de SPI positivo se encontra na área norte da sub-bacia do SMSF, chegando na escala até 0,75 e diminuindo o valor quando em direção à outra região do rio São Francisco. De acordo com Gershunov e Barnett, quando os fenômenos da ODP e o DA se encontram em fases opostas ocorre uma diminuição

nos índices de precipitação. A variação da escala corresponde aos valores de -0,35 até 0,75 e pode-se notar que houveram mais áreas com SPI negativo do que positivo, corroborando com o autor acima citado, fases opostas há diminuição de chuvas.

Comportando-se de forma completamente diferente em relação ao primeiro semestre dos anos trabalhados, o segundo semestre (Figura 28) adquiriu mais áreas contendo SPI positivo, sendo elas na região do ASF, próximo à divisa com o MSF, no noroeste do MSF e manteve a concentração de SPI positivo na área norte da sub-bacia do SMSF visto no primeiro semestre dos anos. Contudo, diminui um pouco a intensidade de secas e chuvas devido diminuição da variação da escala agora variando de -0,3 até 0,65.

Durante fenômeno de ODP e DA em suas fases opostas sendo, agora, ODP negativa e DA positivo (Figura 29 e Figura 30) pode-se notar que no período de janeiro a junho houve um comportamento semelhante ao comportamento da Figura 27 o qual deve-se à concentração de SPI positivo na região próxima à divisa do SMSF com BSF e diminuição gradativa do valor de SPI quando em direção às outras áreas do Rio São Francisco e um pequeno aumento no SPI em algumas áreas em meio à diminuição do SPI. Com a escala variando de -0,2 a 0,6, a Figura 29 mostra que a região do SMSF e BSF estão mais propícias às ocorrências de chuvas, devido ao foco de SPI positivo, entretanto, quantidades pluviométricas dentro da normalidade para região.

Já no período de julho a dezembro (Figura 30), aumentou a área de SPI positivo na região do SMSF, MSF e ASF, havendo um pouco de diminuição na sub-bacia do BSF, possivelmente associada à mudança sazonal, uma vez que a região está na transição de um período mais chuvoso para um período com menos precipitação. Entretanto a amplitude da escala foi menor do que no período de janeiro a junho, variando de -0,35 a 0,35.

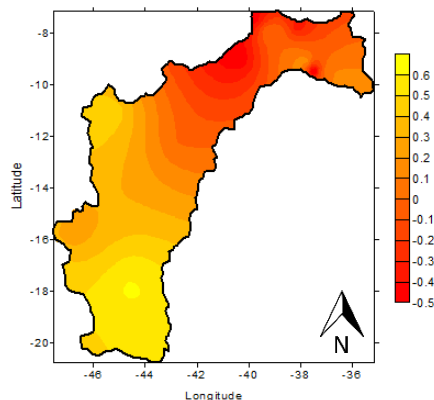


Figura 23: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases positivas, de janeiro a junho. Fonte: Autor.

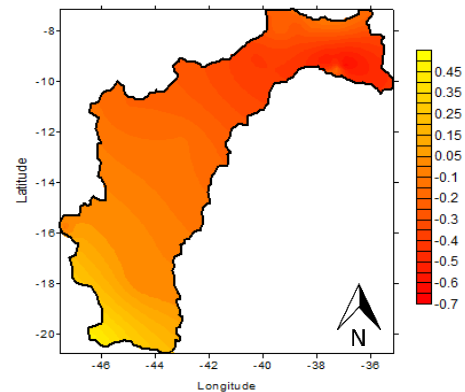


Figura 24: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases positivas, de julho a dezembro. Fonte: Autor.

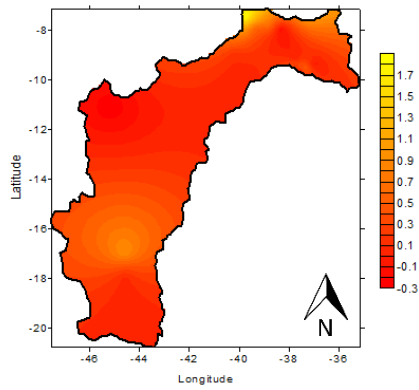


Figura 25: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases negativas, de janeiro a junho. Fonte: Autor.

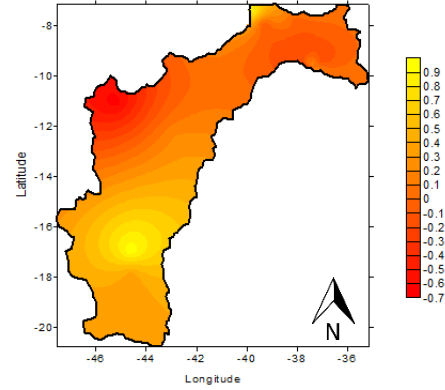


Figura 26: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases negativas, de julho a dezembro. Fonte: Autor.

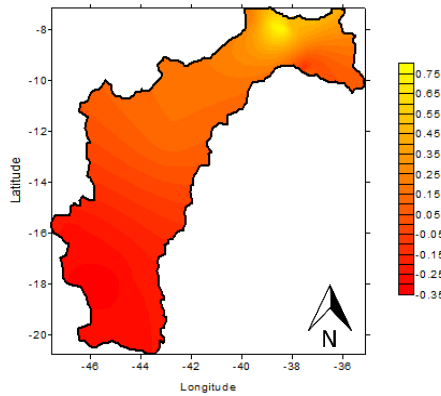


Figura 27: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP positiva e DA negativo), de janeiro a junho. Fonte: Autor.

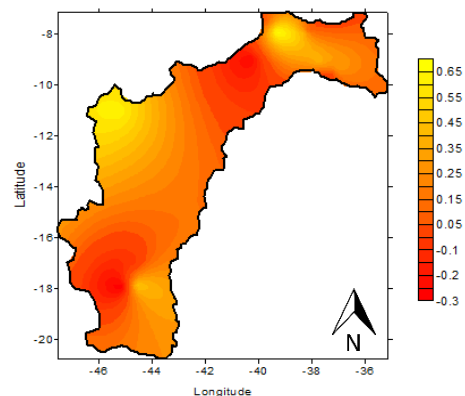


Figura 28: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP positiva e DA negativo), de julho a dezembro. Fonte: Autor.

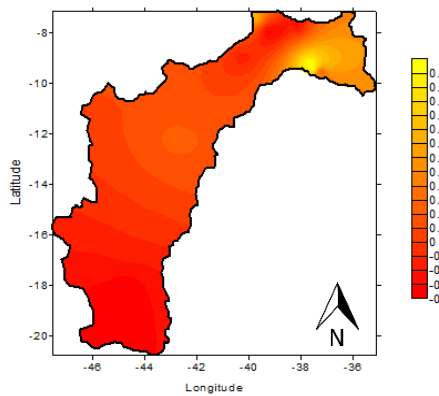


Figura 29: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP negativa e DA positivo) de janeiro a junho. Fonte: Autor.

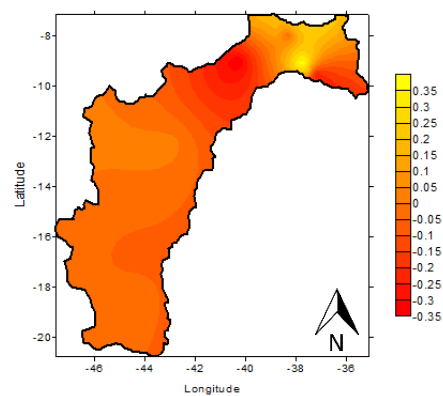


Figura 30: SPI na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco em anos de ODP e DA em suas fases opostas (ODP negativa e DA positivo) de julho a dezembro. Fonte: Autor.

3.6 Probabilidade e Período de retorno

Através da Figura 31, é possível observar a porcentagem de probabilidade de ocorrência de períodos de secas em toda Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Nota-se que as regiões mais propícias a enfrentarem um longo período de estiagem, estão concentradas principalmente nas regiões noroeste da área do MSF e no sudeste do SMSF, sendo no SMSF a maior probabilidade numérica de ocorrência de secas e, além disso, também é apresentado uma considerável probabilidade de seca na divisa do MSF com o SMSF. Atingindo aproximadamente 13% de probabilidade de seca, a região de noroeste do MSF tem esse valor diminuído gradativamente quando em direção às outras sub-bacias adjacentes. Ao chegar na divisa do MSF com SMSF a chance de ocorrência de períodos secos passa a ser de aproximadamente 9%, aumentando, posteriormente, ao chegar na região sudeste do SMSF, atingindo valores próximos a 20%.

Conforme observado na Figura 32, a maior parte do Rio São Francisco tem como período de retorno de secas variando entre 0 a, aproximadamente, 60 anos. Nas regiões sudoeste, tanto do ASF quanto do MSF, são observados valores maiores para o período de retorno de longas estiagens, sendo no ASF a região onde o evento demora mais anos para retornar.

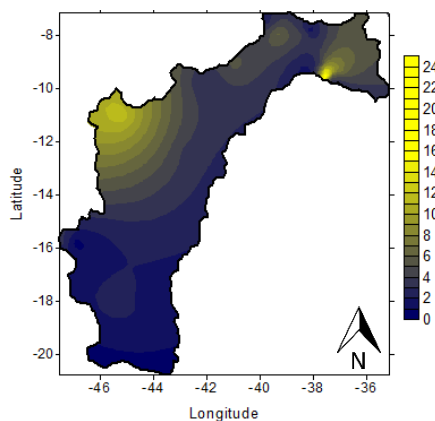


Figura 31: Probabilidade de ocorrência de secas (%). Fonte: Autor

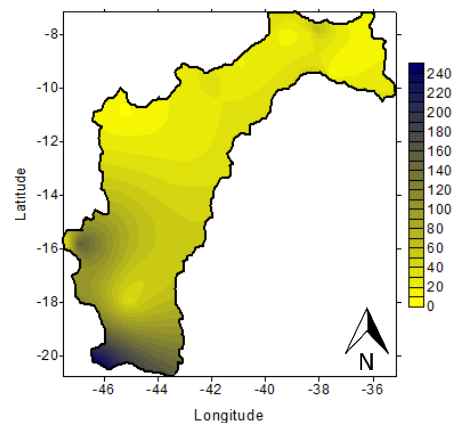


Figura 32: Período de retorno de secas (em anos). Fonte: Autor.

Para o cenário onde as probabilidades são agora de chuva, conforme a Figura 33, primeiramente, pode-se notar que as maiores porcentagens se encontram na região do MSF, chegando a aproximadamente em 70%, próximo com a divisa com a região do SMSF. Esse valor vai diminuindo gradativamente quando em direção ao centro da própria região do MSF, entretanto aumenta novamente em seu centro, e diminuindo rapidamente quando em direção ao

SMSF, atingindo cerca de 40% em ambas regiões. Um outro ponto propício para maiores ocorrências de chuvas é na divisa do MSF com o ASF, obtendo o equivalente a cerca de 60% de probabilidade. Ademais, toda a região oeste do ASF, juntamente com a região sudoeste do MSF, ambas estão sujeitas a menores probabilidades de ocorrência de precipitação e da mesma forma se encontram toda sub-bacia do BSF e a parte norte do SMSF.

Ao analisar a Figura 34, é possível notar uma breve semelhança com a Figura 33, mostrando que são inversamente proporcionais e exibindo que onde existe maior probabilidade de ocorrer precipitações, existe menor número de anos necessários para que a chuva retorne e onde existe uma menor probabilidade de ocorrência de chuva, demanda-se um período de anos maior para que a precipitação possa retornar.

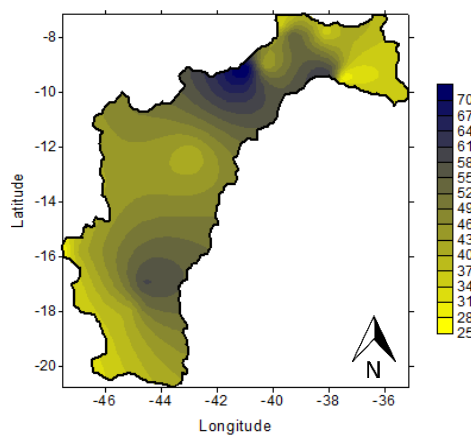


Figura 33: Probabilidade de ocorrência de chuvas (%). Fonte: Autor.

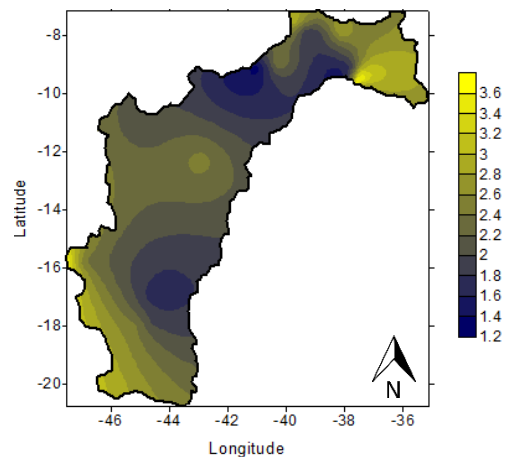


Figura 34: Período de retorno de chuvas (em anos). Fonte: Autor.

Os efeitos de fenômenos climáticos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) são menos intensos no Sudeste do Brasil se comparados aos das regiões Sul e Nordeste do Brasil (Minuzzi *et al.*, 2006), cooperando para uma menor probabilidade de ocorrência de chuva na região do SMSF e BSF. Ainda assim, comparando ambas as figuras (Figura 35 e Figura 36) é notório que, enquanto o fenômeno ENOS está em evidência, a probabilidade de ocorrência de secas (Figura 35), em todas as regiões do rio São Francisco, se torna evidentemente muito menor do que a probabilidade de ocorrência de cheias (Figura 36), embasando que em anos de ENOS é mais comum haver períodos de cheias do que períodos secos já que, como é salientado na Figura 35, os índices de probabilidades são muito baixos.

É visto que, conforme mostrado na Figura 36, os pontos onde a probabilidade de chuva é maior se encontram ao sul do MSF, próximo à divisa com o ASF e ao norte da região do MSF, juntamente com a parte noroeste do SMSF, chegando próximo de valor de 42% de probabilidade de ocorrência de cheia em anos de El Niño.

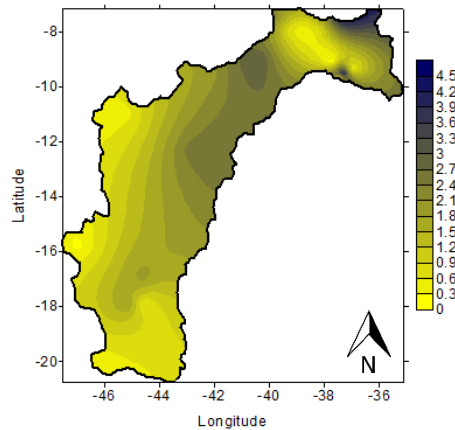


Figura 35: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de El Niño (%). Fonte: Autor.

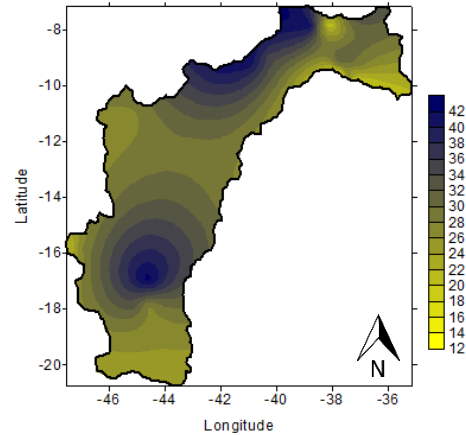


Figura 36: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de El Niño (%). Fonte: Autor.

Para embasar ainda mais o que foi visto na Figura 35, a Figura 37 mostra que os anos para o período de retorno de eventos secos enquanto o fenômeno El Niño está em evidência, são extremamente altos, chegando ao máximo de 1.200 anos, uma vez que a probabilidade de ocorrência de seca em anos de El Niño é relativamente muito baixa quando comparada com a probabilidade de ocorrência de eventos chuvosos.

A mesma sinergia acontece com a Figura 36 e a Figura 38, onde é possível notar que o período de retorno de eventos de chuva é menor, uma vez que as probabilidades de ocorrência desses eventos são maiores, tendo os seus períodos de retorno variando entre 2 e 7,5 anos, com a maioria das regiões do rio São Francisco oscilando em cerca de 2 a 5 anos (Figura 35).

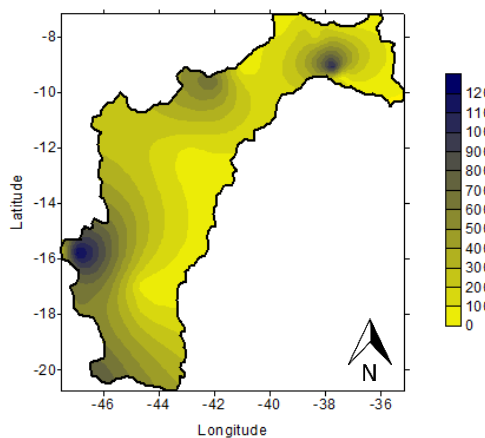


Figura 37: Período de retorno de secas em anos de El Niño (em anos). Fonte: Autor.

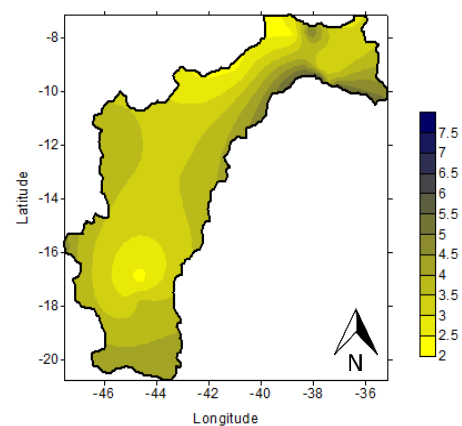


Figura 38: Período de retorno de cheias em anos de El Niño (em anos). Fonte: Autor.

Semelhantemente ao que ocorre com a probabilidade de ocorrências de secas em anos de El Niño (Figura 35), onde se tem uma baixa porcentagem de probabilidade em praticamente todas as regiões da Bacia Hidrográfica, também ocorre uma baixa probabilidade de ocorrência de secas em anos de La Niña. De acordo com Tedeschi (2013) e Tedeschi *et al.* (2016), ocorrem secas leves nos anos de La Niña, na região do Sudeste Brasileiro, contudo, o ASF, inserido no estado de Minas Gerais, obteve porcentagens pequenas de probabilidade de seca, com aproximadamente 1,5%, sendo no MSF as maiores probabilidades de seca e menores probabilidades de cheias durante La Niña. Conforme a Figura 39, a maior porcentagem se encontra ao centro da região do MSF com o índice atingindo aproximadamente 4,5% de probabilidade, diminuindo gradativamente na direção oeste da região e também em direção ao ASF, além disso, também diminui, agora mais rapidamente, quando em direção à região do SMSF.

Já na probabilidade de ocorrência de cheias em anos de La Niña é possível notar um índice de porcentagem maior, entretanto ainda é menor do que o índice de porcentagem de probabilidade de ocorrência de cheias em anos de El Niño (Figura 36), uma vez que a em anos de La Niña (Figura 40) é possível notar que a variação do índice compreende os valores entre 19,5% e 26,5%, enquanto em anos de El Niño (Figura 36) os índices correspondem a uma oscilação de 12% até 42% de probabilidade de ocorrência de cheias.

As regiões mais propícias a receberem um período mais longo de chuvas, conforme a Figura 40 salienta, são o norte e o sudoeste do MSF, juntamente com o norte do ASF, sendo a região norte do MSF a que consegue obter o máximo de probabilidade, chegando a cerca de 26,5% em sua costa.

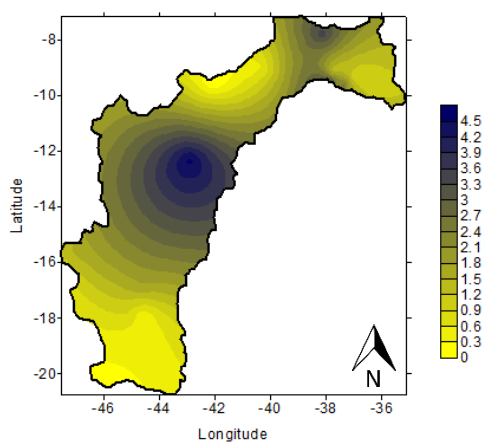


Figura 39: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de La Niña (%). Fonte: Autor.

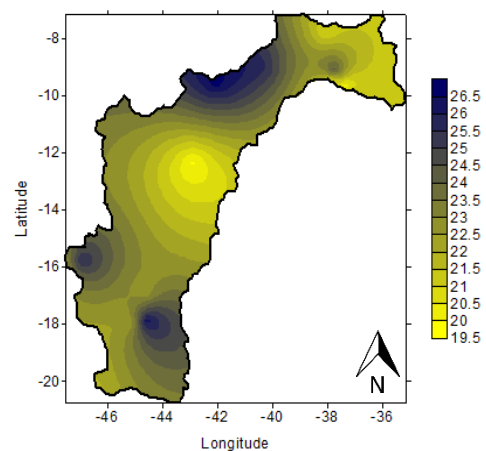


Figura 40: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de La Niña (%). Fonte: Autor.

Com o período de anos necessários ainda maior, em relação às situações anteriores, para que haja o retorno de uma longa estiagem, consolidando um período seco, a Figura 41 mostra que o ponto que demanda uma maior quantidade de tempo para a seca retornar em anos de La Niña é o norte do MSF, atingindo cerca de 4.000 anos, o que possivelmente pode ser explicado devido a interação entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o fenômeno La Niña (Rocha et al. 2020; Ferreira et al. 2009; Da Silva, 2005). As demais regiões, apesar de não demandarem tanto tempo quanto a região norte do MSF, ainda requerem bastante tempo, contudo a região sudeste do MSF apresenta a tonalidade mais amarela do que em relação a todas as outras regiões de toda a Bacia Hidrográfica, ou seja, é a região onde o período de retorno é o menor possível, variando de 0 a 400 anos.

Já na Figura 42, que representa o período de retorno de cheias em anos de La Niña, é possível notar um período de retorno muito menor quando em comparação com a figura anterior, variando agora de 3,7 a 5,5 anos. A região do BSF foi a região que necessita o maior tempo para o retorno da cheia em anos de La Niña, chegando ao número máximo presente na escala, ou seja, aproximadamente 5,5 anos necessários. As regiões que necessitam do menor tempo para o período de retorno, variando de 3,7 a 4,3 anos, são o norte e o sudoeste do MSF, juntamente com o norte do ASF, conforme a Figura 42, semelhante à Figura 40, que mostra a porcentagem da probabilidade de ocorrência de cheias em anos de La Niña.

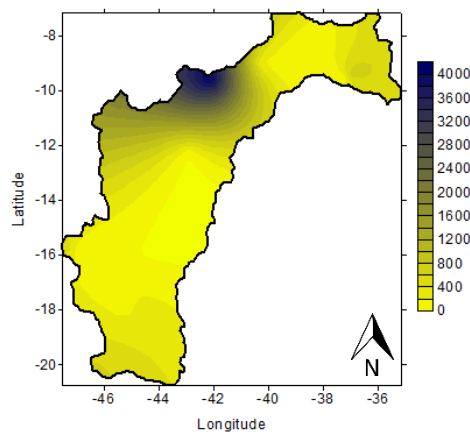


Figura 41: Período de retorno de secas em anos de La Niña (em anos). Fonte: Autor.

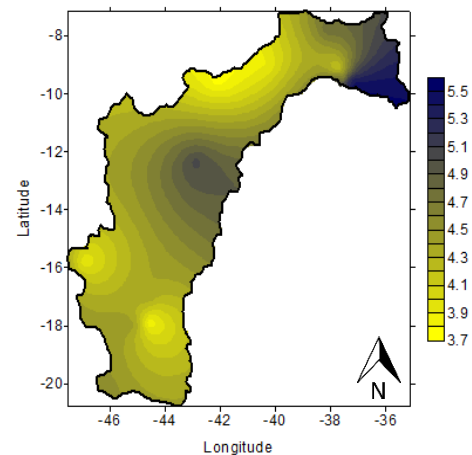


Figura 42: Período de retorno de cheias em anos de La Niña (em anos). Fonte: Autor.

Ambas as figuras (Figura 43 e 44) tratam de situações de onde o Dipolo do Atlântico se encontra negativo. Entretanto, a Figura 43, mostra a distribuição de probabilidade ocorrência de secas, enquanto a Figura 44 exhibe a distribuição da probabilidade de ocorrência de cheias. Conforme a Figura 43, com sua escala variando de 0,2 até 3,6, o ponto mais propício

para que conste um período seco durante dipolo negativo se encontra na divisão entre o MSF e o SMSF, contudo a probabilidade obteve um índice de porcentagem pequeno. Já a região menos propícia para o acontecimento de secas durante dipolo negativo encontra-se no ASF, onde é possível observar o tom mais amarelado do mapa, atingindo o menor índice de porcentagem da escala. Quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias e as águas do Atlântico Tropical Sul estão mais quentes existem aumento nos movimentos ascendentes sobre região do Nordeste Brasileiro, intensificando a formação de nuvens e aumentando os índices pluviométricos (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; ARAGÃO, 1998).

De acordo com a Figura 44, em comparação com a figura anterior, é possível notar que a área com maior índice de probabilidade de ocorrência de seca se expandiu ainda mais em direção ao SMSF com o índice de probabilidade atingindo cerca de 34%, mostrando que é mais comum a ocorrência de cheias na região neste período de dipolo negativo. Enquanto os menores índices se encontram agora na região do SMSF em direção do BSF, com o mínimo de 22%.

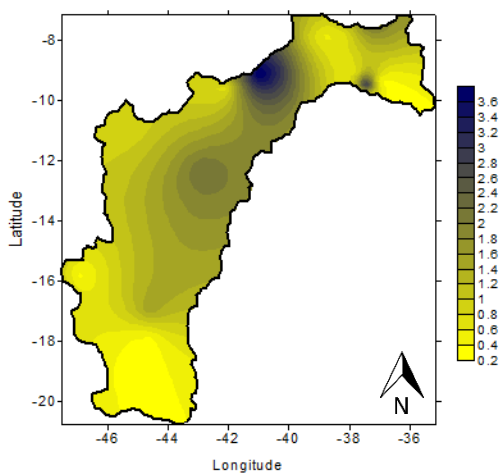


Figura 43: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Dipolo do Atlântico negativo (%). Fonte: Autor.

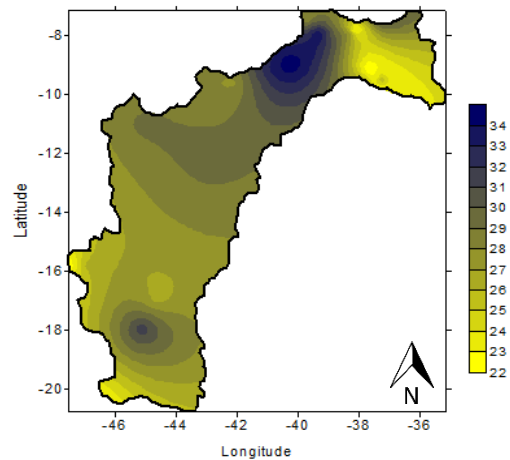


Figura 44: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Dipolo do Atlântico negativo (%). Fonte: Autor.

Conforme visto anteriormente, quando foi exibido que o mais comum era ocorrência de cheias ao invés de ocorrência de secas no cenário de Dipolo do Atlântico negativo, com os mapas de período de retorno é possível fortalecer esta situação pois, de acordo com a Figura 45, nota-se a escala com uma grande amplitude de anos com o mínimo de 0 e o máximo de 1000 anos, mostrando que, na maioria das regiões do Rio São Francisco, a situação

de seca, enquanto o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase negativa, demora mais para retornar.

Diferentemente da figura anterior, a amplitude da escala da Figura 46 agora é extremamente menor, com mínimo de 3 e máximo de 4,7 anos. Além disso, ainda é possível notar que na região oeste do SMSF, junto à divisa com o MSF, encontra-se uma tonalidade mais amarelada, com valores de período de retorno próximos do mínimo da escala, ou seja, nesta área as cheias ocorrem novamente com mais brevidade que no resto da Bacia. Ao mesmo tempo, na região leste do SMSF, em direção ao BSF, notam-se valores mais próximos do máximo da escala, indicando maior tempo necessário para cheia retornar na região.

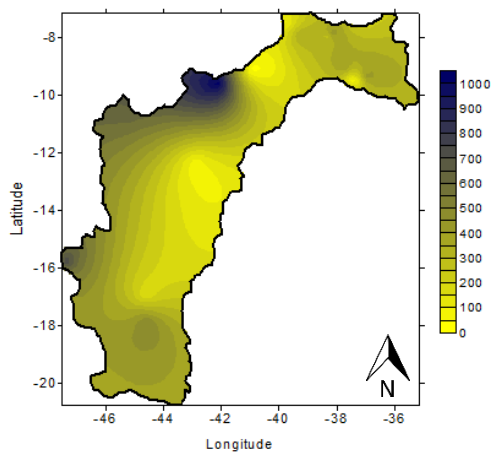


Figura 45: Período de retorno de secas em anos de Dipolo do Atlântico negativo (em anos). Fonte: Autor

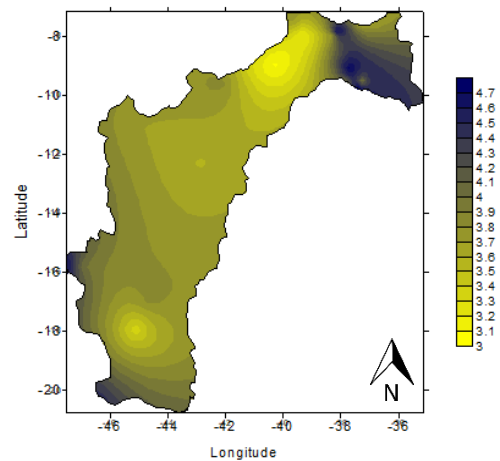


Figura 46: Período de retorno de cheias em anos de Dipolo do Atlântico negativo (em anos). Fonte: Autor.

Quando o Dipolo do Atlântico se encontra agora em sua fase positiva, de acordo com a Figura 47, é visto que os índices de porcentagem ainda são baixos para a situação de probabilidade de ocorrência de secas, com o mínimo da escala em 0,2% e máximo em 3,6%. O Atlântico sul frio, causou baixa probabilidade ocorrência de chuva no SMSF e BSF, corroborando com Andreoli e Kayano (2007) tanto na Figura 48 quanto na Figura 47. Pode-se notar que as áreas mais escuras do mapa estão na região oeste da sub-bacia do MSF, na divisão entre o MSF e SMSF e no fim do SMSF, próximo onde se encontra o início do BSF, sendo esta última região a mais escuras de todas, com relação às regiões anteriores.

Por conseguinte, já na Figura 48, onde é possível ver a probabilidade de ocorrência de cheias quando o Dipolo se encontra em sua fase positiva, é visto apenas um ponto mais destacado com relação a todo o mapa, salientando que a probabilidade de ocorrência de chuva no norte do MSF, já próximo com a divisa com o SMSF, é maior do que nas demais

regiões do Rio São Francisco, apresentando índices de porcentagens com valores de aproximadamente de 50% de probabilidade e, além disso, índice diminui lentamente quando em direção ao sul do MSF e mais rapidamente quando em direção à região do SMSF e BSF.

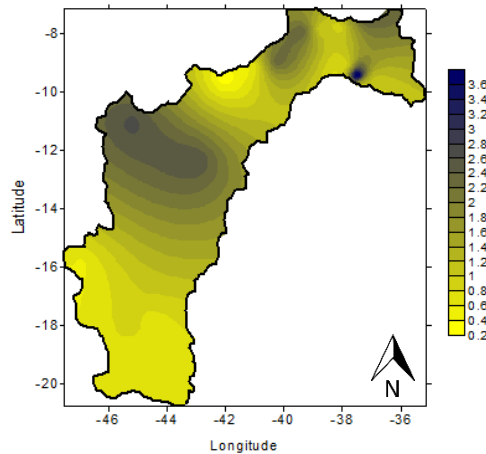


Figura 47: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Dipolo do Atlântico positivo (%). Fonte: Autor.

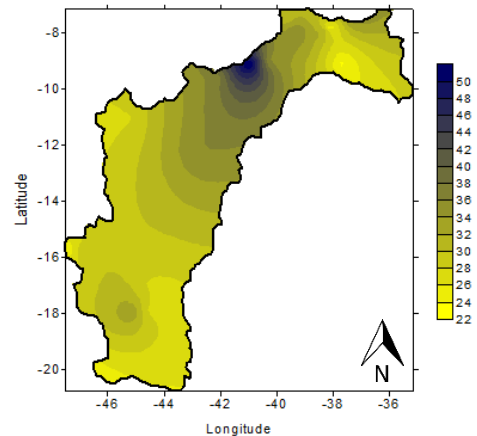


Figura 48: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Dipolo do Atlântico positivo (%). Fonte: Autor.

Semelhantemente como na figura anterior, a Figura 49 também apresenta um ponto escuro mais destacado próximo do centro da região do MSF em relação a toda Bacia do Rio São Francisco, com valor máximo de 5.500 anos para que seja visto o retorno de uma seca na região, quando ocorre Dipolo positivo. Ao se afastar do ponto central do MSF, os valores diminuem, com seu mínimo atingindo menos de 1 ano necessário para a volta da do período seco, sendo visto os tons mais amarelados, ou seja, menor tempo necessário para o retorno da seca, em grande parte da região do SMSF e BSF.

Na Figura 50, com Dipolo positivo e com escala variando de 2,3 anos até 4,5 anos, é possível ver que os maiores valores da escala se encontram na extremidade sul e leste do ASF e na região do SMSF, entrando um pouco na região do BSF. Do norte da região do MSF até a região sul, nota-se valores menores no período de retorno, dando uma tonalidade mais amarelada quando em comparação com as demais regiões do Rio São Francisco.

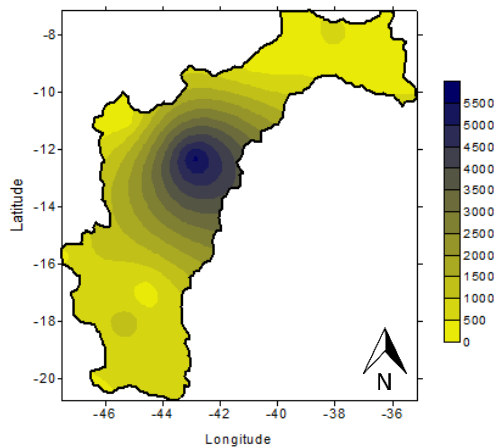


Figura 49: Período de retorno de secas em anos de Dipolo do Atlântico positivo (em anos). Fonte: Autor.

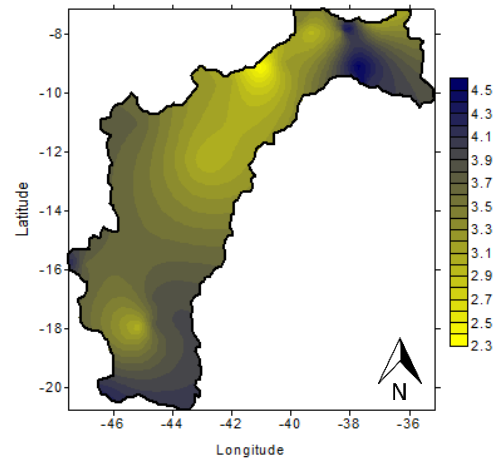


Figura 50: Período de retorno de cheias em anos de Dipolo do Atlântico positivo (em anos). Fonte: Autor.

De acordo com as Figuras 51 e 52, é possível observar o comportamento médio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco enquanto a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) se encontra em sua fase negativa. Com sua escala de probabilidade variando de 0,1% a 2,1%, apesar de ser uma porcentagem relativamente baixa quando comparada a outras, a Figura 53 mostra que as maiores probabilidades de ocorrências de seca em anos de ODP negativa estão principalmente na região noroeste tanto da sub-bacia do MSF quanto da sub-bacia do SMSF, sendo na sub-bacia do MSF uma área maior do que em relação a ao SMSF. Já as menores probabilidade de ocorrência de seca estão na região oeste do ASF juntamente com a região norte do MSF, contudo essa última com a probabilidade um pouco maior do que no ASF.

Com a variação da escala tendo o mínimo de 22% e o máximo de 37%, a Figura 52 apresenta, praticamente, as mesmas áreas que na figura anterior com a diferença de um recuo na área da sub-bacia do SMSF, ficando agora com maior probabilidade na divisa entre o SMSF e MSF. O ASF ainda apresenta uma porcentagem menor na probabilidade de ocorrência de cheia durante ODP negativa. Isso ocorre porque durante a fase negativa da ODP existem mais casos de La Niña e, para a região sudeste do Brasil, significa precipitação abaixo da média. Portanto, é visto uma menor probabilidade de cheias com ODP negativa por conta da forte atuação da La Niña (Da Silva, 2005; Rocha et al., 2020). Entretanto, na divisa do SMSF com o BSF também foi apresentada uma porcentagem semelhante ao ASF.

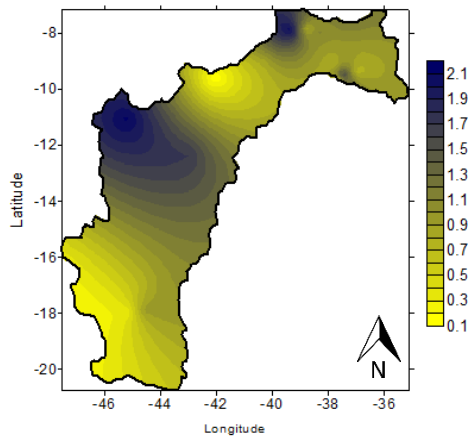


Figura 51: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (%). Fonte: Autor.

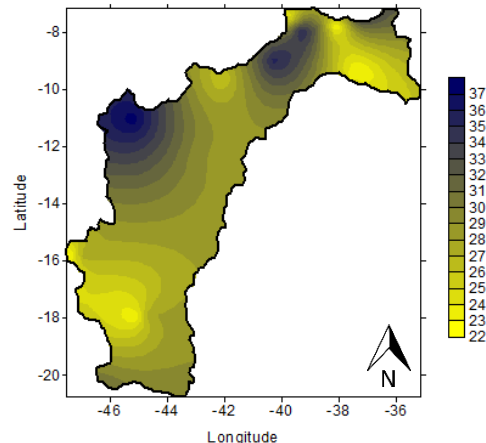


Figura 52: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (%). Fonte: Autor.

A Figura 53, que mostra o período de retorno de secas em anos de ODP negativa, tem o mesmo padrão das figuras anteriores referentes ao período de retorno sob outros fenômenos meteorológicos. A área onde o período de retorno é maior, podendo chegar até 2.200 anos necessários para o retorno da seca, se encontra na parte norte do MSF e mínimo, podendo ser até menor do que 1 ano, se encontra no início do SMSF e oeste do MSF. Apesar de visualmente ser um mapa mais amarelado, ou seja, apresentando os menores valores da escala, a amplitude da escala é muito grande, dessa forma, fazendo também com que a maioria das áreas amareladas requisitem muitos anos para o período de retorno ocorrer.

Diferentemente da figura anterior, ao consultar a Figura 54 pode-se notar a grande diferença de valores na escala, denotando um período de retorno menor para a ocorrência de cheias em toda a Bacia Hidrográfica. Destaca-se em um tom mais escuro, com o máximo de tempo necessário para o retorno do evento sendo de 4 anos e meio, a região leste do SMSF e grande parte do BSF, juntamente com a região oeste na divisa do ASF e MSF, sendo a maior área contida no MSF. As porcentagens mínimas se encontram na região noroeste do MSF e na divisa do MSF com o SMSF atingindo, aproximadamente, 3 anos necessários para a volta da cheia na região.

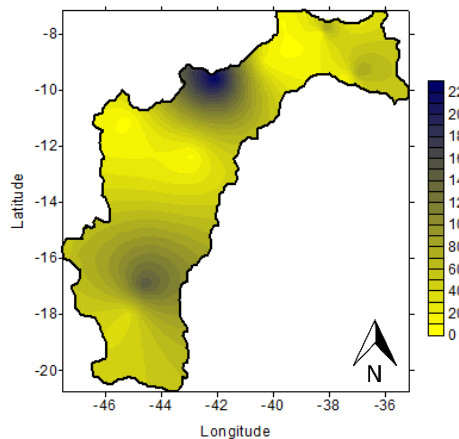


Figura 53: Período de retorno de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (em anos). Fonte: Autor.

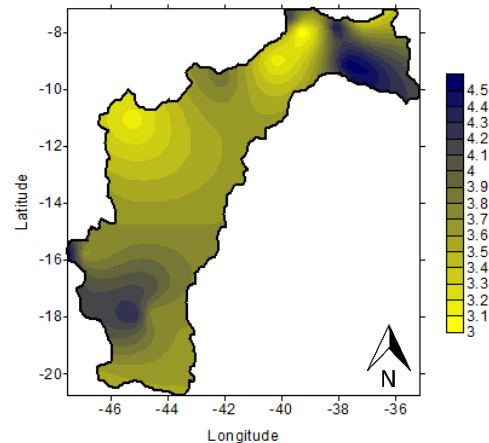


Figura 54: Período de retorno de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico negativa (em anos). Fonte: Autor.

Quando o cenário analisado agora é a ODP em sua fase positiva, pode-se notar na Figura 55, onde é exibida a probabilidade de seca em ODP positiva, que praticamente toda a Bacia Hidrográfica se encontra com um baixo índice de probabilidade, de acordo com sua tonalidade de cor e sua escala, com variação de 0% até 4,5% de probabilidade, seguindo o mesmo padrão das figuras anteriores, ou seja, baixa probabilidade de ocorrência de seca em toda a Bacia Hidrográfica. Como dito anteriormente, em concordância com Minuzzi *et al.* (2006), os efeitos do aquecimento das águas do pacífico são mais intensos na região nordeste, mostrando que a probabilidade de seca é relativamente baixa enquanto a probabilidade de cheia é relativamente alta na região.

Na Figura 56 é perceptível uma das maiores probabilidades vistas, com máximo de 40%, além disso, os valores máximos são notados na região norte do SMSF e na divisa entre o MSF e SMSF, enquanto os valores mínimos estão concentrados na região sul do MSF e em toda a sub-bacia do ASF, sendo no ASF a menor intensidade.

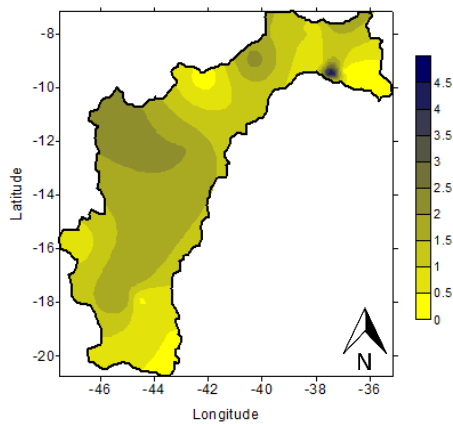


Figura 55: Probabilidade de ocorrência de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (%). Fonte: Autor.

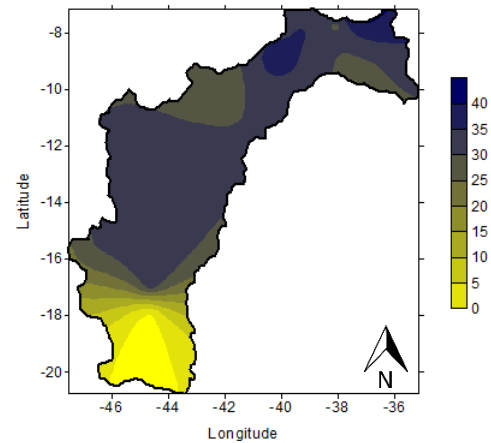


Figura 56: Probabilidade de ocorrência de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (%). Fonte: Autor.

Ainda no cenário onde a ODP apresenta sua fase positiva, na Figura 57 é possível notar que os maiores anos para o retorno da seca se encontra ao norte da sub-bacia do MSF, chegando aproximadamente a 1.300 anos necessários para a volta do evento. As regiões do BSF, norte e oeste do SMSF e próximo à divisa do MSF com o ASF, são as regiões mais propícias que requerem menor período de anos para o evento da seca retornar, contudo, de acordo com a escala de cores, ainda assim requer um bom número de anos.

Já na Figura 58, onde é apresentado o período de retorno de cheias em anos de ODP positiva, existe uma expressiva redução nos anos necessários para que se note a volta do evento de cheia, conforme o padrão das figuras anteriores. Praticamente toda a Bacia apresenta valores variando de 3,9 a 3,3 anos dando uma tonalidade amarelada para o Rio São Francisco. Além disso, semelhantemente com a figura anterior, um dos pontos onde apresenta um maior índice de período de retorno de cheias, conforme a escala, é o norte do MSF, na mesma região que a apresentou o maior índice de período de retorno de secas na figura anterior.

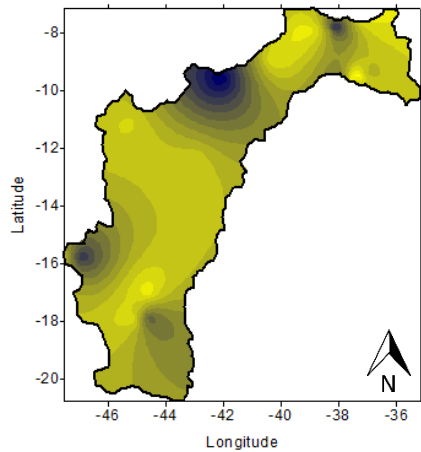


Figura 57: Período de retorno de secas em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (em anos). Fonte: Autor.

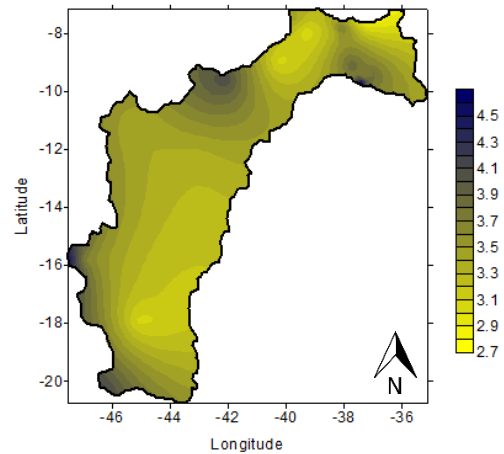


Figura 58: Período de retorno de cheias em anos de Oscilação Decadal do Pacífico positiva (em anos). Fonte: Autor.

3.7 Quartil

O MSF apresentou os extremos mais intensos, diante da sua barra de erro (Figura 59), tanto SPI de secas quanto de chuvas foram os maiores, tanto negativo, quanto positivo. O BSF apresentou o menor erro, induzindo que suas secas e chuvas são as menos intensas na Bacia. Aproximadamente 75% dos dados (terceiro quartil) do ASF, MSF e SMSF são de SPI positivos e maiores que zero.

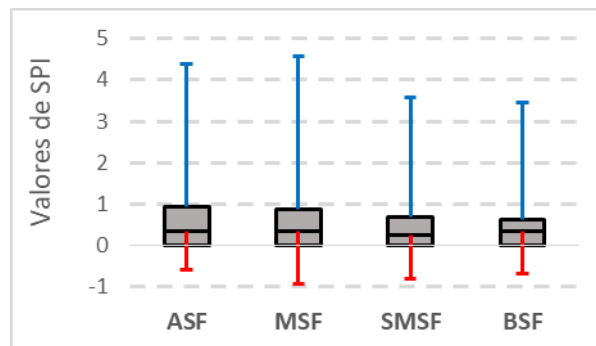


Figura 59: Box plot de valores de SPI para as sub-bacias do rio São Francisco. Fonte: Autor.

De modo geral, de acordo com a Figura 60, o MSF foi a única região que apresentou 75% da caixa disposta para os valores de precipitação maiores, ou seja, maior percentual da amostra e os outros 25% para os menores valores e, ao comparar a região do ASF e o BSF, é possível notar que ambos apresentaram uma distribuição semelhante, sendo o ASF

a região que apresentou os maiores valores de precipitação em relação às demais, com máximos valores de precipitação atingindo cerca de 120 mm, e o BSF os menores valores indo aproximadamente de 42 mm a 60 mm de precipitação, no entanto, o BSF apresentou uma boa variação para valores positivos, de acordo com sua barra de erro superior chegando a 100 mm de precipitação e quase nenhuma variação para valores menores, como visto na barra de erro inferior, ficando quase tangente à caixa inferior apresentada em azul.

O SMSF apresentou grandes variações tanto na barra de erro inferior, quanto na barra de erro superior, com barra de erro chegando ao valor máximo de precipitação como do MSF com aproximadamente 110 mm para o MSF e SMSF, e mínimo de 20 mm para o SMSF, sendo a mínima precipitação dentre as demais regiões. Quando as águas do atlântico tropical norte estão mais frias e as águas do atlântico tropical sul estão mais quentes, ou seja, fase negativa do Dipolo do Atlântico, existem aumento nos movimentos ascendentes sobre a região setentrional, central e sertão do Nordeste, intensificando a formação de nuvens e aumentando os totais pluviométricos (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA 1981; ARAGÃO, 1998), explicando os valores maiores de precipitação nas regiões do BSF, MSF e SMSF.

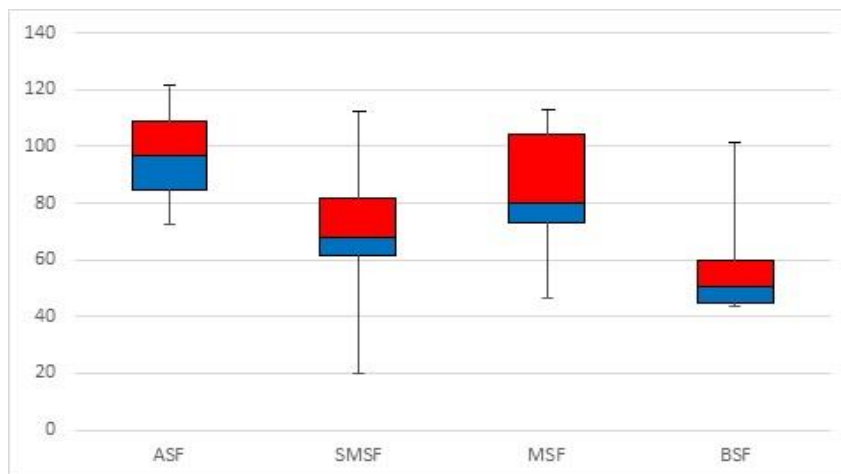


Figura 60: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase negativa. Fonte: Autor.

Quando o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase positiva, conforme a Figura 61, diferentemente da figura anterior, onde a situação analisada era quando o Dipolo Negativo estava evidente, é possível notar que o ASF apresenta quase 100% da caixa disposta para valores positivos, juntamente com uma considerável barra de erro superior, atingindo aproximadamente 150 mm de precipitação, enquanto sua barra de erro inferior quase não sofreu nenhuma variação, com o mínimo em 100 mm de precipitação. Essa distribuição é explicada devido ao deslocamento latitudinal da ZCIT para o Hemisfério Norte do planeta Terra enquanto

o Dipolo do Atlântico está positivo, causando, desta forma, mais precipitação na região do ASF (Da Silva, 2005).

A semelhança anteriormente encontrada no ASF e BSF ocorre agora nas caixas do SMSF e BSF, com quase 50% entre as caixas de valores maiores e menores, sendo no SMSF um pouco mais disposta para valores maiores de precipitação e no BSF para valores menores.

No MSF a maior porção da caixa ficou para os valores de precipitação maiores, com o máximo, de acordo com a barra de erro, atingindo cerca de 130 mm de precipitação e mínimo de 50 mm. Comparando com a figura anterior (Figura 60) é possível notar que a região do ASF novamente obteve em si o maior valor de precipitação em comparação com as outras regiões.

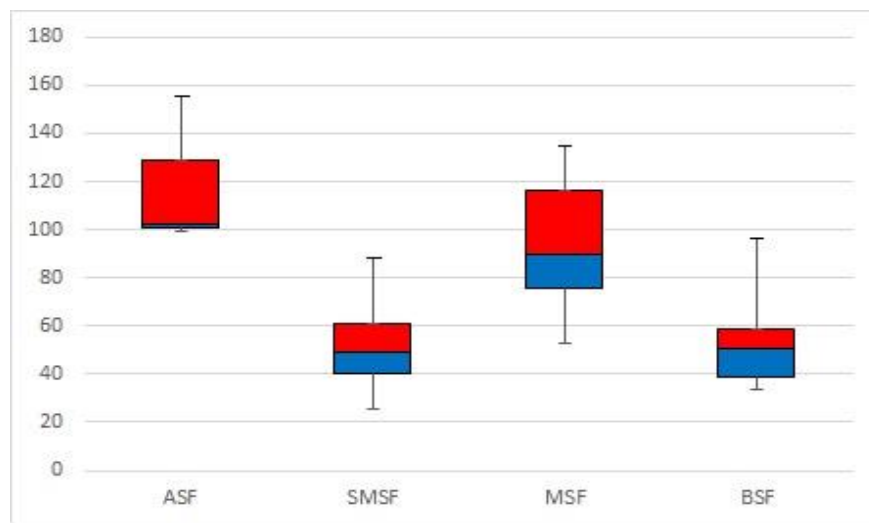


Figura 61: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando o Dipolo do Atlântico se encontra em sua fase positiva. Fonte: Autor.

Analisando o comportamento das sub-bacias agora quando a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra em sua fase negativa (Figura 62), nota-se que o ASF novamente ficou com quase 100% da caixa disposta para os valores de maiores precipitações juntamente com quase nenhuma variação nos menores valores, segundo a barra de erro inferior, com mínimo de aproximadamente 95 mm de precipitação e barra de erro superior um pouco maior, atingindo o máximo valor de precipitação de aproximadamente 115 mm.

Grande parte da caixa do SMSF também está disposta para valores de maior precipitação por causa da quantidade de La Niña que ocorrem enquanto a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra negativa (Da Silva et al., 2007). Além disso, o SMSF apresentou comportamento semelhante ao ASF, obtendo, também, pouca variação de dados em seus menores números de precipitação, atingindo cerca de 50 mm e máximo de 110 mm. Exatamente o contrário é visto na sub-bacia do MSF, com sua caixa com maior parte disposta para os menores valores de precipitação, quase nenhuma variação em sua barra de erro superior e um

pouco mais de variação de dados em sua barra de erro inferior, obtendo mínimo de aproximadamente 50 mm e máximo próximo de 90 mm.

A região do BSF apresentou um grande limite superior, de acordo sua barra de erro superior o valor máximo se encontra entre 100 mm e 110 mm, enquanto o mínimo em sua barra de erro inferior obteve valor também próximo de 50 mm.

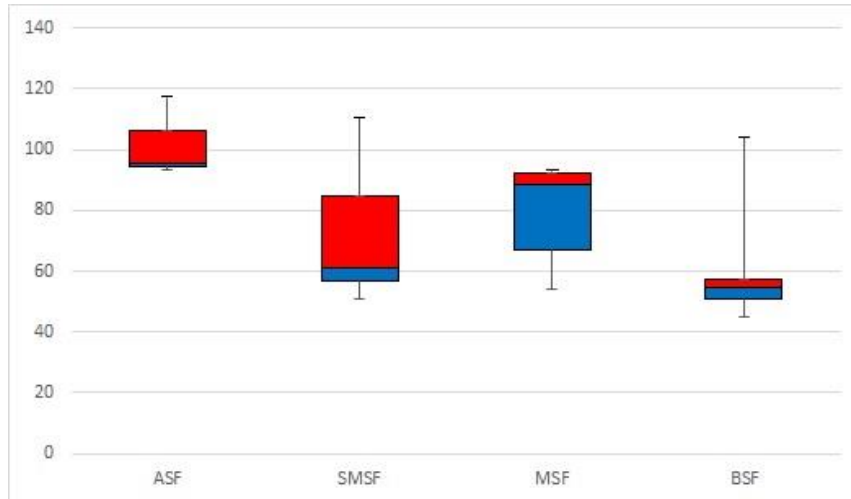


Figura 62: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra em sua fase negativa. Fonte: Autor.

Conforme a Figura 63, a região do SMSF apresentou a maior parcela da sua caixa variando de aproximadamente 55 mm a 70 mm de precipitação, enquanto a menor parcela da sua caixa varia muito pouco, por volta de 50 mm, com máximos alcançando o valor de 110 mm e mínimos cerca de 30 mm, conforme as respectivas barras de erro.

O ASF e MSF obtiveram comportamento semelhantes na divisão de suas caixas, ocorrendo uma divisão de 50% entre os valores de precipitação maiores e menores em ambas as regiões e este fator mostra que a Oscilação Decadal do Pacífico positiva tem mais influência sobre as regiões do ASF e MSF do que em relação as demais regiões, contudo, o ASF obteve uma amplitude maior, com valor máximo chegando próximo de 140 mm e mínimo de aproximadamente 70 mm. Já o MSF obteve máximo de exatos 120 mm e mínimo de aproximados 50 mm. No BSF, diferentemente com o que ocorreu quando se evidenciava a ODP negativa, nota-se agora que há uma maior parcela de sua caixa dedicada a maiores valores, variando de 50 mm a próximo de 60 mm e seus valores menores ficam próximo de 50 mm, enquanto sua barra de erro superior indica máximo de aproximadamente 90 mm e mínimo de 30 mm.

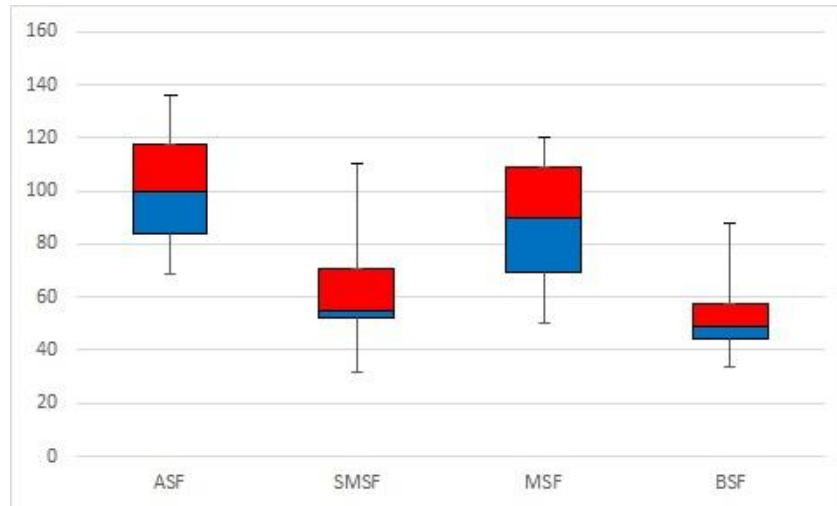


Figura 63: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco quando a Oscilação Decadal do Pacífico se encontra em sua fase positiva. Fonte: Autor.

Segundo a Figura 64 novamente a região do ASF se destaca por conter quase 100% de sua caixa em vermelho e quase nenhuma variação de dados em seus valores mínimos que se encontram próximos de 70 mm, além disso, sua barra de erro superior indica máximo de aproximadamente 110 mm. O SMSF e BSF possuíram distribuições semelhantes para este cenário com a maior parte de suas caixas em vermelho, variando no SMSF de 40 mm a aproximadamente 55 mm e no BSF de 40 mm a 50 mm, no entanto, o SMSF alcançou uma amplitude maior com máximo próximo de 90 mm e mínimo cerca de 10 mm, já o BSF tem mínimo de aproximadamente 25 mm e máximo de 65 mm. Quando o fenômeno El Niño está em evidência ocorrem mais chuvas na região do sudeste brasileiro, acarretando aumento de precipitação nas regiões do ASF e MSF, já que se encontram na região sudeste do Brasil.

O MSF obteve uma distribuição na qual os valores de precipitação menores ocuparam a maior parte de sua caixa juntamente com uma barra de erro inferior alongada, atingindo mínimo de 30 mm e máximo de aproximadamente 110 mm, conforme a barra de erro superior. Como dito anteriormente, durante El Niño existe mais chuvas na região do sudeste do Brasil, é possível que este seja o motivo de as regiões do ASF e MSF apresentarem uma maior quantidade de precipitação (Minuzzi, 2006).

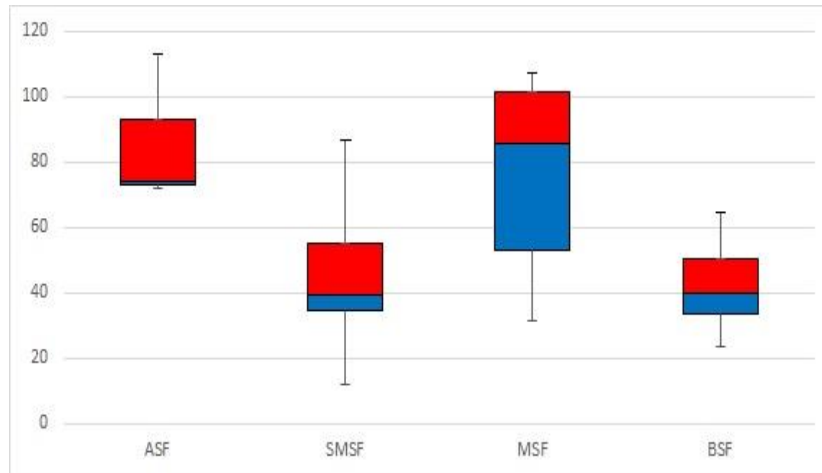


Figura 64: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco em anos de El Niño.
Fonte: Autor.

Como é visto na Figura 65, o ASF ainda apresenta o mesmo padrão, agora com variação de dados ainda menor, tanto para valores maiores, quanto para valores menores de precipitação, com máximo de aproximadamente 130 mm e mínimo de 110 mm. A região do SMSF apresentou uma distribuição dividida em 50% para cada caixa com máximo próximo a 110 mm e mínimo de 50 mm. A presença de La Niña, em termos de precipitação, beneficiou a região do SMSF, contudo deveria também ter influenciado a região do BSF, no entanto o BSF foi a região que apresentou os menores índices de precipitação.

No MSF a divisão de caixa foi um pouco mais disposta para valores menores, variando estes de 70 mm a 90 mm, com mínimo próximo a 60 mm, já os valores maiores ocorrem entre aproximadamente 70 mm e 105 mm. O BSF apresentou uma barra de erro superior maior, chegando no máximo de 80 mm, juntamente com uma maior distribuição para valores maiores, já sua barra de erro inferior conseguiu atingir mínimo de aproximadamente 25 mm, sendo o menor valor de precipitação quando comparada com as demais sub-bacias. Com a ocorrência de La Niña, a ZCAS se torna mais presente, colaborando para aumento de precipitação na região do ASF e MSF e, conforme Ferreira et al (2009), essa interação entre ZCAS e La Niña influencia no aumento de chuvas.

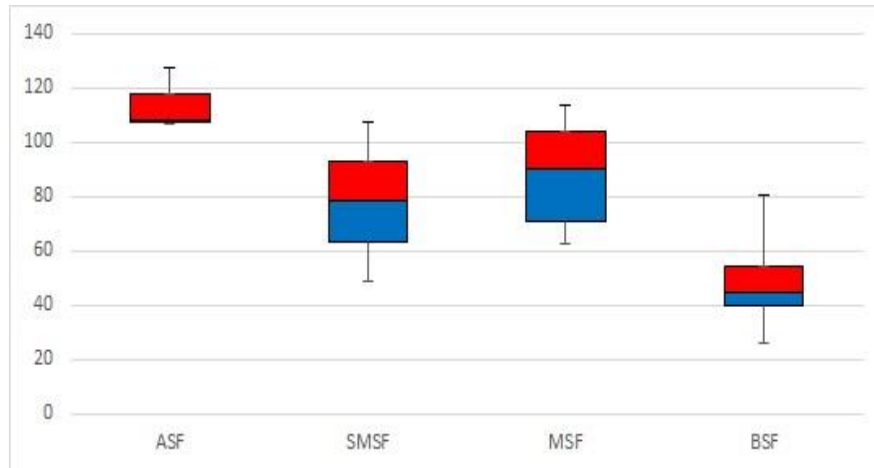


Figura 65: Box Plot das sub-bacias do Rio São Francisco em anos de La Niña.
Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES

Com o objetivo de estudar e reconhecer a importância dos eventos extremos climáticos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, o atual trabalho utilizou-se de ferramentas estatísticas confiáveis para então avaliar quantitativamente os eventos extremos tanto chuvosos como secos. Ocorreram mais episódios de chuva moderada, severa ou extrema em toda a região do Rio São Francisco do que em relação a classes de secas moderada, severa e extrema, conforme o SPI.

Todas as sub-bacias apresentaram algum índice de chuva extrema, entretanto, apenas a região do ASF obteve a presença de seca extrema, mesmo que com porcentagem muito baixa (0,117%), afirmando, desta forma, que é mais comum que se tenha cenários de chuva extrema do que cenários com grandes secas.

Pelo coeficiente de similaridade, foi possível notar comportamentos semelhantes entre a sub-bacia do SMSF com BSF. O SMSF, é inverso ao comportamento do ASF e o BSF, por sua vez, é dissimilar ao ASF, entretanto, tem baixa similaridade com MSF.

Através da Análise de Ondaletas verificou-se que se mostraram presentes as escalas temporais sazonal, semestral, interanual, a do ENOS, ENOS estendido, a do Dipolo do Atlântico, a dos ciclos solares e da OIP. A combinação ou ausência desses fenômenos/sistemas citados acima corroborou para o aumento ou diminuição de eventos climáticos extremos na região, tanto secos quanto chuvosos.

Durante eventos de ENOS e Dipolo, a Bacia se comportou como já foi verificado para valores de precipitação em trabalhos anteriores. Com o Atlântico sul frio, o SPI foi negativo no SMSF e BSF, e de julho a dezembro, SPI's positivos ficaram restritos ao ASF, quando inicia atuação da ZCAS.

Durante anos de El Niño visualizou-se SPI positivos do ASF ao MSF, e SPI negativos em quase totalidade no SMSF e BSF. Já durante atuação de La Niña, o ASF/MSF apresentaram SPI negativos em maior parte das sub-bacias e no SMSF/BSF ocorreram máximos valores de SPI em pequenas áreas do NEB. De julho a dezembro os valores positivos de SPI no ASF, mesmo durante La Niña, pode ser em decorrência da interação da ZCAS com a La Niña.

É importante ressaltar que o proposto por Gershunov e Barnett (1998) foi comprovado, já que durante ocorrência simultânea de ODP e DA, tanto em fases positivas quanto negativas, os índices de SPI apresentaram maior amplitude em suas respectivas escalas,

dessa forma, intensificando os fenômenos quando em mesma fase, e tendo diminuição de chuvas e intensificação de SPI negativos, quando em fases opostas.

No geral, o rio São Francisco, conforme os cálculos de probabilidade, apresentou uma probabilidade maior para mais eventos de precipitação do que eventos de seca em todas as suas regiões. Mesmo levando em consideração todos os fenômenos citados no presente trabalho, como o ENOS/ENOS estendido, Dipolo do Atlântico e Oscilação Decadal do Pacífico, percebeu-se que o índice de probabilidade de ocorrências de chuvas é consideravelmente superior ao índice de probabilidade de ocorrências de secas, bem como o período de retorno para os períodos chuvosos é bem menor do que em comparação com períodos secos. Entretanto, mesmo se tendo uma probabilidade boa para ocorrência e cenários de chuva, não se deve haver descuido quanto à supervisão de eventos secos, pois, mesmo em pequena quantidade a persistência de secas com intensidade leve é de suma importância, visto que os eventos menos intensos de secas podem se desenvolver para mais intensos, mediante a atuação de fenômenos meteorológicos externos contribuindo com possíveis agravamentos nos setores hídrico, e agro econômico, demandando, desta forma, atenção na parte de gestão hídrica.

A técnica dos quartis, em conjunto com os gráficos de box-plot, se mostrou uma ferramenta promissora em relação à estimativa de porcentagem dos máximos e mínimos de chuva, caracterizando períodos chuvosos ou secos de uma determinada região. O MSF indicou, pelo erro indicado no boxplot, que seus eventos são mais extremos que as demais sub-bacias. Quando ambas ferramentas trabalham em conjunto, é possível ter um panorama robusto do quadro estudado, além disso, a junção com o SPI é ainda mais favorável para extrair informações e obter um entendimento ainda maior dos ocorridos climáticos na região estudada, além de proporcionar perspectivas diferentes.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, L. V., et al. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres.**, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- AMORIM, R. C. F. Determinação do Período de Retorno da Precipitação Pluviométrica por meio da Distribuição de Gumbel para a região de Cascavel/PR. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Foz do Iguaçu – PR, 2002.
- ASSAD, E, H. S. PINTO (2008) Aquecimento Global e a Nova Geografia da produção agrícola no Brasil. **EMBRAPACEPAGRI**, São Paulo, Agosto 2008. 82 pp.
- BAETTIG, M., WILD, M., IMBODEN, M. (2007). A climate change index: Where stclimate change may be more proiminent in the 21 century. **Geophys. Res. Letters**, L01705, doi:10.1029/2006GL028159, 2007.
- CAESAR, J., L. ALEXANDER, AND R. VOSE (2006), Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres.**, 111, D05101, doi:10.1029/2005JD006280.
- CAVALCANTE, I. B. S. **Período de retorno de chuvas extremas em Alagoas e suas causas climáticas**. Trabalho de Conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmsféricas (ICAT/UFAL), 2019.
- CAVALCANTI, I. F, A., V. KOUSKY (2004) Drought in Brazil During Summer and Fall 2001 and Associated Atmospheric Circulation Feature, **Climanalise**, 2(1). 110.
- CBHSF. Comitê da bacia hidrográfica do rio são Francisco. A região do Baixo São Francisco, maio de 2013. Acesso em 21/02/2020. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/cbhsf_blog/a-regiao-do-baixo-sao-francisco/.
- CEDEPLAR and FIOCRUZ (2008) **Mudanças Climáticas, Migrações e Saúde: Cenários para o Nordeste Brasileiro, 2000-2050**. Relatório de Pesquisa (Research Report): Belo Horizonte, CEDEPLAR/FICRUZ, Julho de 2008.
- CHRISTENSEN, J.H., et al. (2007a) Regional Climate Projections. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Chapter 11, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- COSTA, M. S. et al. Tendências Observadas em Extremos de Precipitação Sobre a Região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V 8, N 5, 2015.
- COX, P., P. HARRIS, C., HUNTINGFORD, R, BETTS, M. COLLINS, C. JONES, T. JUPP, J. MARENGO, C. NOBRE, (2008) Increase risk of Amazonian Drought due to decreasing aerosol pollution In *Nature* (London), 453, 212-216.

DA SILVA, D. F. Análise de aspectos climatológicos, agroeconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL E PE), março de 2009, 212 p., **Tese de Doutorado em Recursos Naturais**, UFCG, Campina Grande (PB), 2009.

DA SILVA, D. F. **Variabilidade espacial e temporal de componentes dos balanços da água e de energia sobre a Bacia do rio São Francisco com ênfase para a região da ZCAS**. Mestrado em Meteorologia, UFCG, 2005.

DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; SOUSA, F. DE A. S. Uso de ferramentas estatísticas para acompanhamento climático e prevenção de riscos na bacia hidrográfica do rio Mundaú (Brasil). **Revista Territorium** (Portugal), v. 17, p. 17-26, 2010a.

DOS SANTOS, M. S. M. **Análise Hidro-meteorológica de Cheias na Região Norte de Portugal**. Tese de doutorado. Lisboa, 2015.

DUFEK, A. S., AMBRIZZI, T. (2007) Precipitation variability in Sao Paulo State, Brazil.. **Theoretical and Applied Climatology**, 1, 1-12.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quarterly, Journal of the Royal Meteorological Society*, n° 103, v. 435, p.77-92, Jan. 1977.

HAYLOCK M. R., et al. (2006) Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, 19, 1490-1512.

HOGAN, D.J. (2001) Demographic aspects of global environmental change: What is Brazil's contribution? Pp 15-41 in D.J. Hogan e M.T. Tolmasquim (eds.), *Human Dimensions of Global Environmental Change*. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, 2001.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers*. IPCC Geneva, 2007b.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2010. *Clean Development Mechanism, Emission factor for the Brazilian South-Southeast-Midwest interconnected grid*. Acesso em 03-12-2014. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/>.

MACEDO, M. J. H., GUEDES, R. V. S., SOUSA, F. D. A. S., DANTAS, F. R. (2010). Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 5(1), 204-214.

MARENGO, J. A. Future Change of Climate in South America in the Late 21st Century: the CREAS Project. **AGU AS News- letter** - Volume 3. Issue 2 May 2009. p. 5.

MARENGO, J. A., R. JONES, L, ALVES, M. VALVERDE. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**. 2009.

MARENGO, J. A., ALVES, L. M., BESERRA, E. A., LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. In: Tradução. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 385-415.

MARENGO, J. A. BORMA, L. S., RODRIGUEZ, D. A., PINHO, P., SOARES, W. R., ALVES, L. M. Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: vulnerabilities and human adaptation. **American Journal of Climate Change** 2, 87-96. 2013.

TEBALDI, C. K. HAOHOW, J. ARBLASTER, G. MEEHL. Going to Extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. **Climatic Change**, 79: 185-21. 2007.

RUSTICUCCI, M.; BARRUCAND, M. Observed Trends and Changes in Temperature Extremes over Argentina. **Journal of Climate**, 17, 4099-4107. 2004.

ROCHA, L. H. S.; DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; BONFIM, O. E. T., Homogeneidade, eventos extremos e suas causas climáticas: bacia hidrográfica do Rio São Francisco, **Revista Brasileira de Meteorologia**, *in prelo*, 2022.

ROCKWOOD, A. A.; MADDOX, R. A. Mesoscale and synoptic scale interactions leading to intense convection: The case of 7 June 1982. **Weather and Forecasting**, v. 3, n.1, p. 51-68, 1988.

SA, I. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, A. de S.; SILVA, D. F. da. **Caracterização ambiental do Vale do Submédio São Francisco**. 2009. Acesso em 21/02/2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/661912/caracterizacao-ambiental-do-vale-do-submedio-sao-francisco>

SANTOS, S. R. Q.; BRAGA, C. C.; SANSIGOLO, C. A.; SANTOS A. P. P. Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, n.1, p.111-122, 2017.

VINCENT, L.A., et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960- 2000. **Journal of Climate**, 18, 5011-5023. 2005.