

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



ANA CARINE DE MELO SILVA

Zoneamento e avaliação da severidade das estiagens entre os anos de 1961 até 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com base em valores do Índice de Precipitação Padronizado.

Maceió – AL

2023

ANA CARINE DE MELO SILVA

Zoneamento e avaliação da severidade das estiagens entre os anos de 1961 até 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com base em valores de SPI.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Farias
Pereira

Maceió - AL
2023

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

S586z Silva, Ana Carine de Melo.

Zoneamento e avaliação da severidade das estiagens entre os anos de 1961 até 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com base em valores do Índice de Precipitação Padronizado / Ana Carine de Melo Silva. – 2023.
90 f.: il. color.

Orientador: Fabio Farias Pereira.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 80-90.

1. Secas. 2. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 3. índice de
Precipitação Padronizado. I. Título.

CDU: 551.577.38

Folha de Aprovação

ANA CARINE DE MELO SILVA

Zoneamento e avaliação da severidade das estiagens entre os anos de 1961 até 2019 na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com base em valores de SPI.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Documento assinado digitalmente



FABIO FARIAS PEREIRA

Data: 14/09/2023 14:18:49-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabio Farias Pereira (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS DAS NEVES

Data: 20/09/2023 09:13:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marllus Gustavo F. P. das Neves
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Documento assinado digitalmente



RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR

Data: 13/09/2023 13:17:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Junior
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Documento assinado digitalmente



FREDERICO CARLOS MARTINS DE MENEZES FILHO

Data: 13/09/2023 13:34:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Frederico Carlos Martins de Menezes Filho
Universidade Federal de Viçosa – UFV

Dedico à minha mãe Ana Maria (*in memoriam*), e ao meu pai José Carlos (*in memoriam*), às minhas irmãs Ana Carla e Emília Crisielle, e ao meu esposo Gustavo Euclides, por sempre me apoiarem.

AGRADECIMENTOS

Á Deus por todo o amor e misericórdia que tem por mim, por me conceder inúmeras maravilhas, me socorrer nos momentos de angústia e cuidar cautelosamente de cada detalhe da minha vida. A minha mãe, que durante toda a caminhada esteve presente, sendo suporte e incentivadora, me viu ser aceita no Processo de Seleção de ingresso no Programa de Pós-Graduação, acompanhou de perto meu esforço, mas infelizmente não vibrou ao meu lado na finalização dessa conquista, pois atendeu ao chamado de Deus e foi para junto d'Ele.

As minhas irmãs, cunhados, sobrinhos e sobrinhas, por sempre me apoiarem e incentivarem.

Ao meu esposo, por todo o companheirismo, cuidado e auxílio. Por sempre me apoiar e segurar minha mão nos momentos difíceis, por me lembrar todos os dias que no fim tudo sempre dá certo e sempre há uma solução para tudo.

Aos colegas de turma no PPGRHS, em especial às amigas Camila Rodrigues e Maria Clara, pelo companheirismo, auxílio, ensinamentos e pelos momentos de descontração.

Aos professores do PPGRHS, por todo o conhecimento transmitido e inspiração por busca de aprendizado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabio Farias Pereira, pelo auxílio na elaboração desse trabalho, pelos ensinamentos, pelas orientações prestadas, pela dedicação e paciência.

RESUMO

Os eventos de seca, caracterizados em função da sua duração, severidade e área, têm se tornado uma preocupação mundial, ao levar em consideração os recorrentes relatos desse fenômeno em diversos territórios, como no continente Europeu, Asiático, na América Central, América do Sul e entre outros. Em função da recorrência desses eventos, a determinação da severidade das secas necessária para o desenvolvimento de políticas associadas ao controle desse fenômeno. Desta forma, esta pesquisa buscou determinar a severidade das estiagens na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, bem como mapear as áreas de estiagens, e determinar se as áreas com estiagens mais severas estão distribuídas ao longo da Bacia ou se estão concentradas em um único ponto. A Bacia do Rio São Francisco está localizada no Brasil e abrange a maior parte do semiárido Nordeste. Para a determinação da severidade das secas foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), a fim de classificar as secas em leves, moderadas, severas e extremas. Foram utilizados os dados de precipitação das estações pluviométricas, do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para a realização do cálculo do índice de estiagem, foi utilizado um software de linguagem de programação. Os resultados desta pesquisa mostraram que embora a região do Alto São Francisco possua valores elevados de precipitação acumulada, ela se destaca quanto ao SPI3, secas de curto prazo, de forma contrária no Baixo São Francisco, que mostrou menores incidências de secas de curto prazo. De modo que as secas de longa duração, relacionadas ao SPI 12 e SPI24 foram observadas no Submédio e Médio São Francisco. Através da Análise de Cluster foi verificada a existência de similaridade entres postos pluviométricos alocados dentro de regiões distintas da bacia quando observadas nos parâmetros das variáveis da seca.

Palavras-chave: Índice de Precipitação Padronizado. Bacia do São Francisco. Secas.

ABSTRACT

Drought events, characterized according to their duration, severity and area, have become a global concern, when taking into account the recurring reports of this phenomenon in different territories, such as the European continent, Asia, Central America, America of the South and among others. Due to the recurrence of these events, determining the severity of droughts is necessary for the development of policies associated with controlling this phenomenon. In this way, this research sought to determine the severity of droughts in the São Francisco River Basin, as well as to map the drought areas, and determine whether the areas with the most severe droughts are distributed throughout the Basin or whether they are concentrated in one single point. The São Francisco River Basin is located in Brazil and covers most of the semi-arid Northeast. To determine the severity of droughts, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used, in order to classify droughts as mild, moderate, severe and extreme. Precipitation data from rain gauge stations from the National Institute of Meteorology (INMET) database were used. To calculate the drought index, programming language software was used. The results of this research showed that although the Upper São Francisco region has high values of accumulated precipitation, it stands out in terms of SPI3, short-term droughts, in contrast to the Lower São Francisco, which showed lower incidences of short-term droughts. Therefore, long-term droughts related to SPI 12 and SPI24 were observed in the Sub-Middle and Middle São Francisco. Through Cluster Analysis, the existence of similarity between rainfall stations allocated within different regions of the basin was verified when observed in the parameters of the drought variables.

Keywords: Standardized Precipitation Index. São Francisco Basin. Droughts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Polígono das Secas	27
Figura 2 – Bacia do Rio São Francisco.....	30
Figura 3- Divisões da Bacia do Rio São Francisco.....	31
Figura 4 - Precipitação Acumulada.....	35
Figura 5 - Esquema do delineamento da pesquisa.....	37
Figura 6 - Mapa SPI3: 1961 -1970.....	41
Figura 7 - Mapa SPI3: 1971 - 1980.....	42
Figura 8 - Mapa SPI3: 1981 - 1990.....	43
Figura 9 - Mapa SPI3: 1991 - 2000.....	44
Figura 10 - Mapa SPI3: 2001 - 2010.....	45
Figura 11 - Mapa SPI3: 2011 - 2019.....	46
Figura 12 - Mapa SPI12: 1961 - 1970.....	48
Figura 13 - Mapa SPI12: 1971 - 1980.....	49
Figura 14 - Mapa SPI 12: 1981 - 1990.....	50
Figura 15 - Mapa SPI12: 1991 - 2000.....	51
Figura 16 - Mapa SPI12: 2001 - 2010.....	52
Figura 17 - Mapa SPI12: 2011 - 2019.....	53
Figura 18 - Mapa SPI24: 1961 - 1970.....	54
Figura 19 - Mapa SPI24: 1971 - 1980.....	55
Figura 20 - Mapa SPI24: 1981 - 1990.....	56
Figura 21 - Mapa SPI24: 1991 - 2000.....	57
Figura 22 - Mapa SPI24: 2001 - 2010.....	57
Figura 23 - Mapa SPI24: 2011 - 2019.....	58
Figura 24 - Dendrogramas Frequência.....	75
Figura 25 - Dendrogramas Duração	76
Figura 26 - Dendrogramas Severidade.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Precipitação Acumulada entre décadas	36
Gráfico 2 - Frequência SPI3	61
Gráfico 3 - Duração SPI3	63
Gráfico 4 - Frequência SPI12	66
Gráfico 5 - Duração SPI12	68
Gráfico 6 - Frequência SPI24	71
Gráfico 7 - Duração SPI24	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da Seca baseada no SPI.....	23
Tabela 2 - Estações Pluviométricas Utilizadas.....	33
Tabela 3 - Precipitação acumulada por décadas.....	34
Tabela 4 - Severidade SPI3	64
Tabela 5 - Severidade SPI12	69
Tabela 6 - Severidade SPI24	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Índices de Seca.....	20
---------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMDI - Índice de Seca de Bhalme and Mooly
CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CMI - Índice de Umidade da Cultura
CSDI - Índice de Seca Específico de Safra
CZI - Índice China-Z
CWD - Dias Úmidos Consecutivos
DI - Deciles
EDI - Índice Efetivo de Seca
GPM - Global Precipitation Measurement
GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment
INMET - Instituto Nacional De Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NRI - Índice Nacional de Precipitação
PDSI - Índice de Severidade de Seca de Palmer
RAI - Índice de Anomalia de Precipitação
RDI - Índice de Seca de Reconhecimento
SMDI - Índice de Umidade do Solo e Seca
SMOS - Soil Moisture Ocean Salinity
SPEI - Índice de Precipitação Padronizada e Evapotranspiração
SWSI - Índice de Abastecimento de Água de Superfície
SPI - Índice de Precipitação Padronizado
TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission
TWS - Campos de Armazenamento de Água Terrestre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Utilização do sensoriamento remoto nos estudos de estiagens	18
3.2 O fenômeno da seca	19
3.2.1 Indicadores de seca	20
3.2.1.1 Índice de Precipitação Padronizado - SPI.....	20
3.2.1.2 Índice de Precipitação Padronizado e Evapotranspiração - SPEI.....	24
3.2.1.3 Índice de Recuperação de Seca – RDI.....	24
3.2.1.4 Índice de Severidade da Seca de Palmer – PDSI.....	24
3.2.1.5 Índice de Anomalia de Precipitação - RAI	25
3.2.1.6 Deciles - DI.....	25
3.3 Estudos de estiagens na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	26
4 METODOLOGIA	30
4.1 Área de Estudo.....	30
4.2 Descrição dos dados.....	32
4.3 Procedimentos	36
4.3.1 Índice de Precipitação Padronizado (SPI)	36
4.3.2 Sequência da pesquisa	37
4.4 Análises do estudo.....	37
4.4.1 Análises de Padrões Regionais de SPI	38
4.4.2 Análise de Padrões Pontuais de SPI.....	38
4.4.2.1 Duração, frequência e severidade.....	38
4.4.2.2 Análise de Cluster	39
5 RESULTADOS	40
5.1 Análises de Padrões Regionais de SPI – Mapas de estiagem.....	40
5.1.1 Mapas – SPI3	40
5.1.2 Mapas – SPI12	47
5.1.3 Mapas – SPI24	54
4.5 Análises de Padrões Pontuais de SPI - Duração, Severidade e Frequência	60

4.5.1 Duração, Severidade e Frequência – SPI3	60
4.5.1.1 Frequência SPI3.....	60
4.5.1.2 Duração SPI3	62
4.5.1.3 Severidade SPI3.....	64
4.5.2 Frequência, Duração e Severidade – SPI12	65
4.5.2.1 Frequência SPI12.....	65
4.5.2.2 Duração SPI12	67
4.5.2.3 Severidade SPI 12.....	69
5.2.3 Frequência, Duração e Severidade – SPI24	70
5.2.3.1 Frequência SPI24.....	70
5.2.3.2 Duração SPI24	72
5.2.3.3 Severidade SPI24.....	74
5.3 Análise de Cluster	75
5.3.1 Dendrogramas - SPI3/SPI12/SPI24	75
6 CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Os recorrentes fenômenos da seca estão entre os desastres naturais mais prejudiciais do mundo, pois os mesmos causam danos à plantações, ecossistemas naturais e suprimento de água (ZHAO, T.; DAI, 2015). Estas estiagens são uma característica climática de nível global (CAMPOS, 2015).

A natureza desse fenômeno varia de forma espacial e temporal, e reflete em intrínsecas características climáticas, meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas (GE; APURV; CAI, 2016). Sabe-se que as secas são caracterizadas em função da sua duração, severidade e extensão geográfica (AWAN; BAE, 2016).

Como exemplo de regiões com frequentes eventos de secas, inicialmente se tem o continente asiático, que experimentou um total de 153 eventos de seca entre os anos de 1900 a 2014, e possui a Ásia Oriental sob séria ameaça de estiagens (AWAN; BAE, 2016).

Na América Central, as estiagens também se fazem presentes. As frequentes ocorrências de secas nessa região resultam em problemas econômicos e sociais (QUESADA-MONTANO *et al.*, 2019). A região América do Sul, em suas duas últimas décadas, tem sido marcada pelos eventos de seca. Esta região foi afetada pelas secas na Bolívia em 2016, na Amazônia em 2005, 2010 e 2016, no sudeste do Brasil em 2014-2015 e no Nordeste brasileiro entre os anos de 2010 a 2016 (MARENGO ORSINI *et al.*, 2018).

As bacias hidrográficas têm sido amplamente atingidas pelos eventos de seca. A exemplo, têm-se a bacia hidrográfica do Merguellil, localizada em Kairouan, na Tunísia, uma bacia semiárida mediterrânea típica, que sofre de escassez regular de água agravada pelas atuais secas (ABOUABDILLAH *et al.*, 2014).

Outra Bacia Hidrográfica afetada pelas estiagens, é a do Rio São Francisco, predominantemente semiárida, na porção localizada no nordeste brasileiro. A mesma atende a 70% da população inserida em seu território e é responsável por cerca de 13% da demanda por energia elétrica brasileira. Esses exemplos de função e representatividade mostram que as condições de seca na bacia são catastróficas para a demanda de água. Os eventos de seca também causam impactos de curto e longo prazo, como pastagem escassa para animais, e esgotamento de água nos reservatórios, respectivamente (PAREDES TREJO *et al.*, 2016).

Inseridos nesse contexto, tem-se os índices de estiagem, que são utilizados em estudos sobre secas (DAS *et al.*, 2016). Através dos índices é possível analisar os impactos e a severidade da seca (ZHAO, . *et al.*, 2018).

É proposta uma série de índices para a análise desse fenômeno, como o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), o Índice Efetivo de Seca (EDI), o Índice de Seca de Reconhecimento (RDI), e o Índice China-Z (CZI) (MOHAMMADI.; ABASI; BAZRAFESHAN, 2017). Dentre estes índices, o SPI, desenvolvido por Mckee *et al.* (1993), é comumente utilizado para avaliar a severidade das estiagens, com a utilização dos dados de precipitação.

Estudos já foram desenvolvidos com a utilização do SPI. Uma pesquisa desenvolvida na África do Sul projetou através do SPI os impactos potenciais do aquecimento global nas secas da região, com foco em quatro bacias hidrográficas, a Orange, Limpopo, Zambezi e Bacias do rio Okavango (ABIODUN, 2019).

No sudeste asiático, mais precisamente na península da Malásia, um estudo foi desenvolvido na Bacia do Rio Langat, para avaliar a gravidade, duração e extensão do evento de seca, através do índice de estiagem SPI (FENG *et al.*, 2016).

No leste da China, a Bacia do Rio Huai (HRB) é uma importante área de produção industrial e de grãos que enfrenta secas com frequência, com tendências de alterações nas características hidrológicas e meteorológicas, advindas das mudanças climáticas, assim através da utilização do índice SPI, um estudo buscou avaliar e comparar as situações de seca no passado e nos períodos futuros, com cenários de trajetória de concentração representativa na Bacia (LIN *et al.*, 2020).

Na América do Sul, mais especificamente no Nordeste Brasileiro o SPI também tem sido aplicado. Uma avaliação da periodicidade das estiagens e a classificação da intensidade das classes da seca, foi realizada na bacia do Rio São Francisco (SANTOS, E. A. B, *et al.*, 2019). Outra pesquisa buscou realizar a caracterização espaço-temporal das condições de seca na mesma (SANTOS . *et al.*, 2019).

De maneira similar, um estudo de monitoramento das variabilidades espaciais e temporais de seca foi realizado apenas no Alto da Bacia do rio São Francisco, com a aplicação do índice SPI e dados de precipitação de missões espaciais (SANTOS *et al.*, 2017).

Entretanto, embora se tenha estudos com a aplicação do SPI, na comunidade científica ainda há uma lacuna quanto a utilização do SPI para verificar a variabilidade espacial das áreas vulneráveis aos eventos de estiagem com base nas mudanças dos valores do índice.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como foco avaliar a ação do fenômeno da seca na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e indicar a severidade das estiagens ocorridas em toda extensão territorial da Bacia entre os anos de 1961 até 2019.

2.2 Objetivos Específicos

- Calcular o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para as escalas temporais de 3, 12 e 24 meses.
- Indicar áreas de estiagens dentro da Bacia que alocam valores baixos, médios e altos do SPI.
- Indicar se as áreas com estiagens estão distribuídas ao longo da Bacia ou concentradas em uma única região.
- Indicar a similaridade das estações pluviométricas quanto ao quesito variáveis da seca (frequência, duração e severidade).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Utilização do sensoriamento remoto nos estudos de estiagens

O sensoriamento remoto é uma das ferramentas utilizadas no monitoramento da dinâmica do solo. Através da captação e do registro de energia emitida e refletida pela superfície da terra, o sensoriamento remoto possibilita a geração de imagens e de dados de formatos variados (OLIVERIA *et al.*, 2021; LIU, 2015).

Os sistemas de sensoriamento remoto disponibilizam informações que auxiliam na redução dos impactos gerados pelas estiagens. Dentre estas informações, têm-se as missões espaciais direcionadas para o monitoramento de variáveis hidrológicas e meteorológicas, missões estas como: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Global Precipitation Measurement (GPM), Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) e entre outras (ROZANTE *et al.*, 2010; AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015; GONDIM *et al.*, 2017).

Desta forma, o sensoriamento remoto fornece produtos de imagens e dados capazes de avaliar secas locais e globais (NICHOL; ABBAS, 2015). Um ponto a se destacar é a utilização de técnicas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas de estiagens. O uso destas técnicas fornece resultados que descrevem a extensão espaço-temporal das estiagens. Estes mapas de risco quantificam a situação da seca, a taxa e o risco que corroboram com o problema (AL-BAKRI *et al.*, 2016).

Inserido nesse contexto, como ferramenta de tratamento das informações obtidas através do sensoriamento remoto, tem-se o geoprocessamento, que é interpretado como um conjunto de técnicas e métodos computacionais e teóricos responsáveis pelo tratamento e processamento dos dados georreferenciados (CARRARA; ZAIDAN; PAULA, 2018; LIEPKAN MARANHÃO; SANT 'ANA, 2016).

O geoprocessamento possui ferramentas como interpolação espacial, modelagem cartográfica, análise de mapas raster e estatísticas climatológicas. Estas ferramentas climatológicas ajudam a expandir os dados climáticos (BOHN *et al.*, 2021).

3.2 O fenômeno da seca

As secas não possuem uma definição absoluta, por se tratar de um fenômeno complexo. Porém, ainda assim alguns autores classificam a seca como um fenômeno hidrológico, meteorológico, agrícola e socioeconômico (FOROOTAN *et al.*, 2019 ; FRAGOSO; CARRAÇA; ALCOFORADO, 2018; LOON, VAN, 2015; MISHRA; SINGH, 2010).

As secas agrícolas são caracterizadas como um período de redução da umidade do solo e de consequências nas colheitas, pois a umidade do solo se torna falha para atender aos requisitos de crescimento das plantas e da produção agrícola (SUN *et al.*, 2019; RAHMATI *et al.*, 2020).

As secas socioeconômicas são os tipos de secas de menores índices de investigações. A seca socioeconômica é entendida como uma condição em que o abastecimento de água não é satisfatório em relação a demanda de água, de tal modo que impacta negativamente a sociedade, a economia e o meio ambiente (HUANG, S.; HUANG, Q.; LENG; *et al.*, 2016; ZSELECZKY, 2014).

As secas meteorológicas são definidas como déficits de precipitações, ou seja, baixas precipitações por um espaço de tempo, enquanto que, as secas hidrológicas caracterizam-se como a deficiência de armazenamento de água e precipitações simultaneamente, capazes de reduzir o fluxo dos rios, níveis de reservatórios ou de águas subterrâneas, e acarretam na diminuição do abastecimento de água (FOROOTAN *et al.*, 2019; IPCC, 2013; RAHMATI *et al.*, 2020).

Destaca-se que a seca meteorológica é considerada como pioneira em relação aos demais três tipos de secas. Pois a seca hidrológica tem uma tendência a ser iniciada pelo acúmulo da seca meteorológica, e uma vez que a seca hidrológica acontece, a escassez de abastecimento de água agrícola e a seca socioeconômica também são iniciadas (GUO *et al.*, 2020).

As secas ainda podem ser entendidas como um intervalo de tempo seco e duradouro o suficiente para provocar um desequilíbrio hidrológico (IPCC, 2013). Estas secas são estimuladas pela falta de precipitação, e possuem uma relação intrínseca com o aumento da evapotranspiração potencial em função da variação do clima (WAN *et al.*, 2018; RUDD; KAY, 2019).

3.2.1 Indicadores de seca

Os períodos úmidos e secos são causados em decorrência da variação no espaço e no tempo da precipitação, e avaliados pelos indicadores de seca (SURIBABU; NEELAKANTAN, 2018). Os indicadores de seca variam em seu cálculo e em seu foco para os distintos tipos de secas, sejam elas meteorológicas, hidrológicas, agrícolas ou socioeconômicas. Estes índices definem parâmetros da seca, como a intensidade, duração, severidade e extensão espacial (ASKARIMARNANI; KIEM; TWOMEY, 2021; MISHRA; SINGH, 2010). O Quadro 1 apresenta resumidamente alguns índices de seca.

Quadro 1 - Índices de Seca

Índice	Desenvolvedores	Ano
PDSI – Índice de Severidade da Seca de Palmer	Palmer	1965
SPI – Índice Padronizado de Precipitação	Mckee et al.	1993
RAI - Índice de Anomalia de Precipitação	Van Rooy	1965
CSDI - Índice de Seca Específico de Safra	Meyer e Hubbard	1995
DI - Deciles	Gibbs e Maher	1967
CMI - Índice de Umidade da Cultura	Palmer	1968
SMDI - Índice de Umidade do Solo e Seca	Hollinger et al.	1993
RDI - Índice de Recuperação de Seca	Weghorst,	1996
BMDI - Índice de Seca de Bhalme and Mooly	Bhalme e Mooley	1980
SWSI - Índice de Abastecimento de Água de Superfície	Shafer e Dezman,	1982
NRI - Índice Nacional de Precipitação	Gommes e Petrassi,	1994
SPEI - Índice de Precipitação Padronizado e Evapotranspiração	Vicente-Serrano et al.	2010

Fonte: Autor, 2023.

Nos tópicos seguintes serão abordados brevemente alguns usuais índices de seca.

3.2.1.1 Índice de Precipitação Padronizado - SPI

O Índice de Precipitação Padronizado foi proposto por Mckee et al. (1993) e é uma ferramenta utilizada operacionalmente como um sistema nacional ou regional de monitoramento das secas (MAHFOUZ *et al.*, 2016). Esta ferramenta monitora a seca por meio da utilização de dados de precipitação. O índice SPI permite o monitoramento de

períodos úmidos e secos. O mesmo é calculado para avaliar o comportamento da água em reservatórios, fluxos de rios, na umidade dos solos e em águas subterrâneas (MCKEE *et al.*, 1993). Este índice é baseado na definição de que a precipitação é estatisticamente uma distribuição assimétrica, e não uma distribuição normal (YAN *et al.*, 2017).

Mckee *et al.* (1993), representaram a distribuição assimétrica através da utilização da distribuição Gama e realizaram o cálculo da frequência cumulativa a partir da função de densidade de probabilidade da distribuição Gama. Os autores normalizaram a probabilidade cumulativa pela função inversa da distribuição normal padrão (YAN *et al.*, 2017). O SPI, para uma variável aleatória normalmente distribuída, é o número de desvios-padrão pelos quais o valor observado encontra-se acima ou abaixo da média de longo prazo (IONITA; SCHOLZ; CHELCEA, 2016).

O cálculo do SPI inicialmente consiste em ajustar a função densidade de probabilidade Gama à distribuição de frequência da precipitação. A função de densidade de probabilidade Gama é dada pela Equação , 1 a seguir (SOUSA *et al.*, 2016).

$$g(x) = \frac{1}{B^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (eq. 1)$$

Em que, $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma, $\beta > 0$ é o parâmetro de escala e $x > 0$ é a quantidade de chuva. Em relação a função Gama (Γ), a mesma é obtida através da Equação 2.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (eq. 2)$$

Os parâmetros α e β , referentes a função densidade de probabilidade Gama, são estimados para cada escala de tempo de interesse, e são estimados através das soluções de Máxima Verossimilhança (Equações 3 e 4).

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (eq. 4)$$

Em relação ao valor de A, o mesmo é obtido por meio da Equação 5. O valor de n é referente ao número de observações da amostra, \bar{x} é o valor médio dos dados de precipitação, e x_i é o tamanho da amostra.

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (eq. 5)$$

A função acumulada de probabilidade Gama é dada pela Equação 6.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{a})} \int_0^x t^{\hat{a}-1} e^{-t} dt \quad (eq. 6)$$

A função Gama, representada por $\Gamma(\alpha)$, não é definida para $x = 0$, porém como a amostra dos dados de precipitação pode conter zeros, a probabilidade acumulada passa a ser obtida através da Equação 7.

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (eq. 7)$$

Sendo q, a probabilidade de ocorrer um zero, a condição de $q = m/n$ é para quando m for um número de zeros em uma série de n dados. A relação entre a distribuição de probabilidade Gama e a Normal pode ser visualizada através das Equações 8 e 9.

$$z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (eq. 8), \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5.$$

$$z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (eq. 9), \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1.$$

Sendo, $C_0 = 2,515$; $C_1 = 0,803$; $C_2 = 0,010$; $d_1 = 1,433$; $d_2 = 0,198$ e $d_3 = 0,001$. Os parâmetros são obtidos através das Equações 10 e 11.

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad (eq. 10), \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)} \quad (\text{eq. 11}), \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1$$

O cálculo do índice se inicia pelo ajuste das séries totais mensais de precipitação à função de densidade de probabilidade Gama e passa para estimativa da probabilidade acumulada total mensal. O valor do SPI é a função Normal inversa Gaussiana aplicada a essa probabilidade (SOUSA *et al.*, 2016). O fenômeno seca ocorre no período em que o SPI é continuamente negativo, quando passa a ser positivo, o evento de seca é cessado (MCKEE *et. al* 1993). A Tabela 1 a seguir exibe a classificação da seca com base nos valores de SPI.

Tabela 1 - Classificação da Seca baseada no SPI.

Valores de SPI	Classificação da Seca
0 a -0,99	Seca leve
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
$\leq - 2,00$	Seca extrema

Fonte: Adaptado de Mckee (1993).

Outro fator importante na análise do SPI é a escala temporal, pois os tipos de secas estão associados diretamente às escalas temporais do SPI. Estas escalas são a de 3, 6, 9, 12 e 24 meses. O SPI-3 reflete as condições de água no solo em um prazo curto e médio, e fornece a estimativa da precipitação sazonal. O SPI-6 faz relação às anomalias das vazões de rios e reservas de água. O SPI-9 indica os padrões de precipitação, ao levar em consideração que as secas podem chegar a demorar um ano ou mais para ocorrerem. O SPI-12 e SPI-24 se associam à escassez de água em forma de vazão, e aos níveis de água dos lençóis subterrâneos (VALTER *et al.*, 2012).

O SPI se destaca entre os demais índices por utilizar apenas dados de precipitação e por realizar o monitoramento das secas em variadas escalas de tempo. Este índice também é adequado para monitorar e avaliar a seca sob condições climáticas locais, bem como para monitorar precipitações excessivas (AMRIT; MISHRA; PANDEY, 2018; YAN *et al.*, 2017; FARO *et al.*, 2019).

3.2.1.2 Índice de Precipitação Padronizado e Evapotranspiração - SPEI

O Índice de Precipitação Padronizado e Evapotranspiração é baseado nos valores de precipitação e evapotranspiração, e descreve o grau de desvios das condições secas e úmidas, de modo a padronizar a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração (GAO, *et al.*, 2017; ZHANG; YU; NIU, 2018; SOH *et al.*, 2018).

Os valores positivos do SPEI demonstram condições que são mais úmidas em relação a média, enquanto que os valores negativos indicam as condições mais secas do que a média. No SPEI, a seca se torna impactante quando o valor do SPEI é menor ou igual a -1,0 (ZHANG; YU; NIU, 2018).

O SPEI se destaca devido a sua capacidade de incluir os efeitos da variabilidade da temperatura e evapotranspiração no monitoramento das secas no quesito gravidade, duração, início e fim, bem como medida ampla da água disponível, ou seja, do balanço hídrico climático (MASUPHA; MOELETSI, 2017; ZHANG; WANG; CHEN, 2017).

3.2.1.3 Índice de Recuperação de Seca – RDI

O RDI utilizado na identificação e avaliação da seca, e possui como variáveis a precipitação e a evapotranspiração, e é utilizado para condições de instabilidade climática (ZAREI; MOGHIMI; MAHMOUDI, 2016; ABUBAKAR; NEWETE; SCHOLE, 2020).

Este índice e o SPI se assemelham, mas o RDI possui como diferença o fato de ter sido calculado com base na distribuição Gama para ajustar os registros acumulados entre precipitação e evapotranspiração, além de ser capaz de acomodar os meses sem precipitação (ABUBAKAR; NEWETE; SCHOLE, 2020).

3.2.1.4 Índice de Severidade da Seca de Palmer – PDSI

O PDSI é utilizado para medir as condições de umidade em função de uma precipitação anterior e da umidade do solo, considerando o impacto da precipitação e temperatura

na umidade do solo (CHOI *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2018). Os valores positivos obtidos para este índice apontam condições mais úmidas, enquanto que, os valores negativos indicam condições mais secas (TUFANER; ÖZBEYAZ, 2020; CHOI *et al.*, 2016).

O PDSI é mais apropriado para descrever o solo e as mudanças de fluxos de umidade (CHOI *et al.*, 2016). Na metodologia do PDSI, o solo é dividido em duas camadas, uma superfície Ss, e outra sub-superfície Su, de tal modo que a quantidade de água no mês precedente de cada seção, interfere no cálculo do mês seguinte. O valor da camada Ss é equivalente a 25% da capacidade de água disponível no solo, enquanto que a camada Su representa os demais 75%. A camada Su começa a perder água, apenas quando toda a água da camada Ss é perdida (ROSSATO *et al.*, 2017; TUFANER; ÖZBEYAZ, 2020).

3.2.1.5 Índice de Anomalia de Precipitação - RAI

O RAI é utilizado para classificar tanto a severidade positiva, quanto a negativa das anomalias de chuva. O RAI possui como variável apenas os dados de precipitação, e torna viável a comparação entre os desvios de precipitação (COSTA; RODRIGUES, 2017; GROSS; CASSOL, 2015).

O RAI é uma ferramenta adequada para acompanhar a precipitação pluvial interanual, com a finalidade de determinar as mudanças nos regimes de chuva, bem como uma ferramenta de monitoramento, em função da facilidade de acesso aos dados de precipitação mensais em tempo real (GROSS; CASSOL, 2015).

3.2.1.6 Deciles - DI

O Deciles baseia-se nos valores de precipitação, e estes valores mensais, sazonais ou anuais de longo prazo das estações em análise são organizados em ordem crescente ou decrescente, de modo a formar a sua distribuição de frequência acumulativa, e é aplicado a qualquer escala de tempo desejada (MAHMOUDI; RIGI; MIRI KAMAK, 2019; ABBASIAN; NAJAFI; ABRISHAMCHI, 2021).

O Deciles divide a precipitação em decis, ou seja, dez partes. O primeiro intervalo de decil representa os valores de precipitação que não são excedidos pelos 10% mais baixos dos valores observados de precipitação, o segundo decil mostra a quantidade de precipitação que é inferior a 20%, e o quinto decil ou também chamado de mediana é a quantidade de precipitação que não ultrapassa 50% das precipitações. (ABBASIAN; NAJAFI;

ABRISHAMCHI, 2021; ANDAWAYANTI; DARA LUFIRA; DYAH AWALITA, 2020).

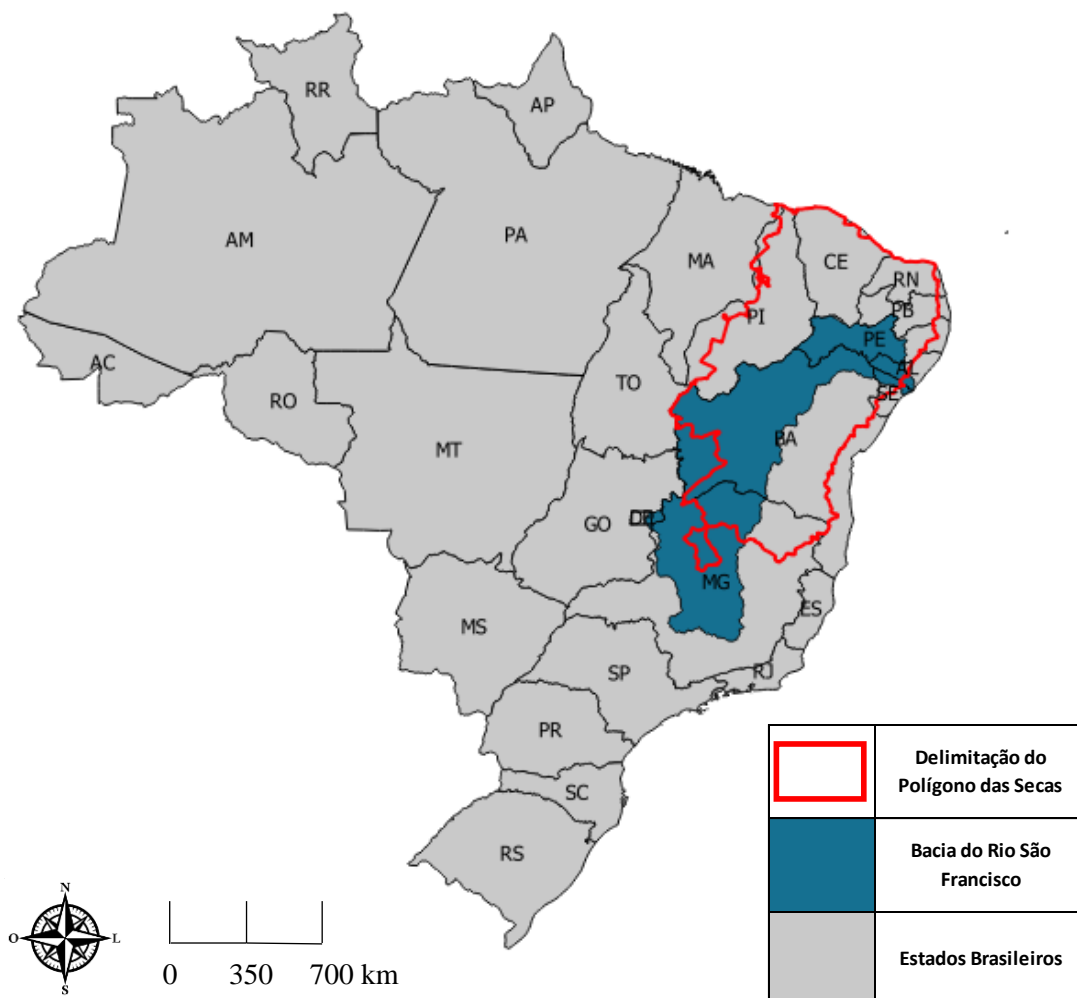
3.3 Estudos de estiagens na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco drena regiões com precipitações superiores a 1500 mm anualmente em suas zonas úmidas/subúmidas, e valores inferiores a 350 mm por ano nas regiões semiáridas e áridas do Nordeste (SUN *et al.*, 2019; TREJO *et al.*, 2016).

Em torno de 58% da bacia se encontram na área denominada de polígono das secas (Figura 1). Segundo o CBHSF, o polígono das secas está localizado em parte do território da Bacia do Rio do São Francisco. Esse polígono é reconhecido pela legislação como sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens, com várias zonas geográficas e diferentes índices de aridez. Ele se situa majoritariamente na região Nordeste, mas se estende até o norte de Minas Gerais (PAREDES TREJO *et al.*, 2016).

A escassez de água nessa região tem como principais causas os extensos terrenos cristalinos, a oscilação anual da Zona de Convergência Intertropical e os eventos cíclicos de ENOS (SUN, T. *et al.*, 2016). O ENOS é um fenômeno climático de representativa escala que altera os padrões climáticos, possuindo duas fases, El Niño e La Niña, que são respectivamente o aquecimento e resfriamento das águas do Oceano Pacífico Equatorial. Este fenômeno em conjunto com a intensificação ou enfraquecimento dos ventos alísios, altera os padrões de chuva e temperatura em diversos locais do globo. Além disto, esta mudança de comportamento no balanço térmico e hídrico da atmosfera pode causar eventos extremos de precipitação (LIMA, 2022).

Figura 1 - Polígono das Secas



Fonte: Autor, 2023.

A bacia apresenta diversos estudos, em decorrência da situação das estiagens e de sua representatividade em termos de potencial hidrelétrico e de abastecimento de água. A bacia possui um potencial hidrelétrico em operação de aproximadamente 10.78 GW, equivalente a cerca de 10% em relação ao total nacional, e é responsável pelo abastecimento de água de 12 milhões de brasileiros (SIPOT/EMPRAPA, 2018).

Um estudo foi realizado por Bezerra *et al.* (2019), com o objetivo de caracterizar mudanças nos padrões da precipitação da bacia do Rio São Francisco. Para isto, foram calculados 11 índices de precipitação definidos pelo conjunto formado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), Comissão de Climatologia (CCI), equipe de especialistas de Detecção e Índices de Mudanças Climáticas (ETCCDMI), e Previsibilidade e Variabilidade Climática (CLIVAR) (BEZERRA *et al.*, 2019).

Outro estudo, realizado por Santos *et al.* (2017), buscou monitorar a variabilidade espaço-temporal da seca apenas na região da bacia denominada Alto São Francisco. Nesta análise, os autores usaram dados de missões espaciais, mais especificamente o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) (RIBEIRO *et al.*, 2019; SANTOS. *et al.*, 2017).

Uma pesquisa realizada por Santos *et al.* (2019), avaliou as condições de seca e de chuva nas sub-regiões da bacia do Rio São Francisco, através do SPI e das cadeias de Markov, com a utilização de dados de estações pluviométricas obtidos junto a Agência Nacional de águas (ANA), durante os anos de 1970 até 2015 (SANTOS *et al.* 2019).

Trejo *et al.* (2016) buscaram descrever a ligação entre os padrões de circulação oceano-atmosférica e as secas durante os meses de estações chuvosas nas sub-bacias do Rio São Francisco, ao verificarem através de evidências observacionais uma relação de causa e consequência entre os eventos de seca e os padrões oceânico-atmosféricos de grande escala. Os autores utilizaram o conjunto de dados mensais de precipitação em grade do Global Precipitation Climatology Center de 1948 a 2010, e o Índice Padronizado de Precipitação (TREJO *et al.*, 2016).

Sun *et al.* (2016) avaliaram e quantificaram a seca no curso da Bacia do Rio São Francisco , através da utilização dos Campos de Armazenamento de Água Terrestre (TWS) invertidos das medições da missão Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), abordando sobre as consequências da seca no abastecimento de água, racionamento de energia e perdas agrícolas, e redução das precipitações na região da bacia desde 2011 (SUN, T. *et al.*, 2016).

Devido ao comportamento conhecido como persistência de longo prazo das séries de tempo hidrológico, que implicam em secas ou inundações consecutivas, Araújo e Celeste (2018) avaliaram em seis hidrelétricas localizadas na Bacia, a persistência de longo prazo em registro de vazões, através da análise de alcance reescalado com base no método de Hurst. No estudo, os autores aprimoraram o método de Hurst pelo uso de um estratégia baseada em testes de hipóteses estatísticas (ARAÚJO; CELESTE, 2019).

Santos *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa com o objetivo de analisar as tendências de precipitação na região da bacia denominada de Alto São Francisco. Analisaram as tendências de precipitação de dias secos consecutivos (CDD), e dias úmidos consecutivos (CWD). Para a realização das análises, os autores usaram dados diários de precipitação

do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Realizaram uma análise espaço-temporal sobre toda área, que abrange 169 séries temporais contínuas, com a aplicação dos testes não paramétricos de Mann Kendall e Sen, para 13 níveis de confiança (SANTOS *et al.*, 2018).

Um estudo realizado por Koch *et al.* (2015) buscou analisar cenários de mudanças nos padrões do clima, do uso da terra e redução agrícola, bem como seus efeitos na demanda e disponibilidade de água na bacia do Rio São Francisco. Para atingirem os objetivos, utilizaram uma versão regionalizada do modelo agroeconômico global de uso da terra e da água. Realizaram as análises em dois cenários, um cenário que considera um mundo regionalizado com desenvolvimento econômico lento, alto crescimento populacional e pouca consistência dos problemas ambientais (A2), e outro cenário que considera um mundo globalizado com baixo crescimento populacional, alto crescimento do produto interno bruto (PIB) e sustentabilidade ambiental (B1). Também foi utilizado um modelo eco hidrológico regional para analisar os efeitos desses cenários na demanda e disponibilidade de água (Koch *et al.*, 2015).

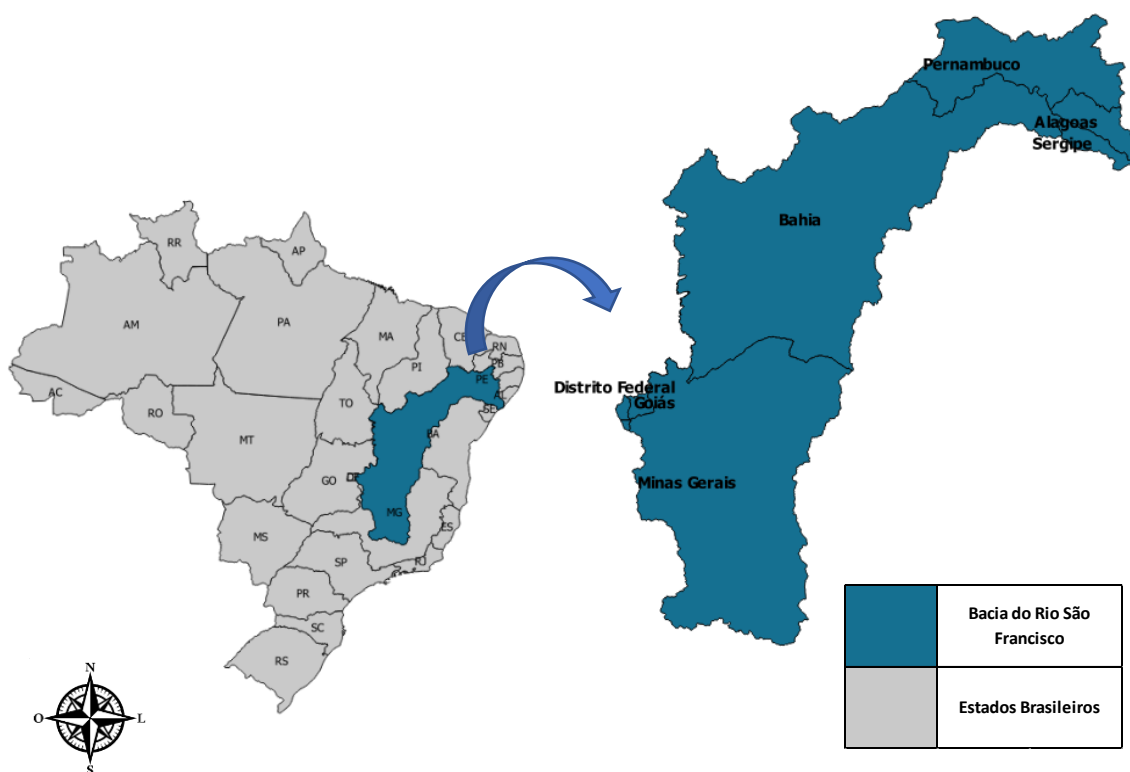
Desta forma, em decorrência da necessidade de inclusão na comunidade científica de trabalhos que estudam o mapeamento de zonas de estiagens com mudanças em SPI dentro das Bacias hidrográficas por meio de análises regionais, e da indicação da severidade da concentração e expansão das áreas atingidas por este fenômeno através de análises locais, por meio de agrupamentos, o presente trabalho tenciona a esta contribuição.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

A Bacia do Rio São Francisco possui uma área de drenagem de 639.219 km², o equivalente a 7,5% do país, com uma vazão média de 2.850 m³/s (CBHSF, 2021) e abrange a maior parte do semiárido nordestino (Figura 2).

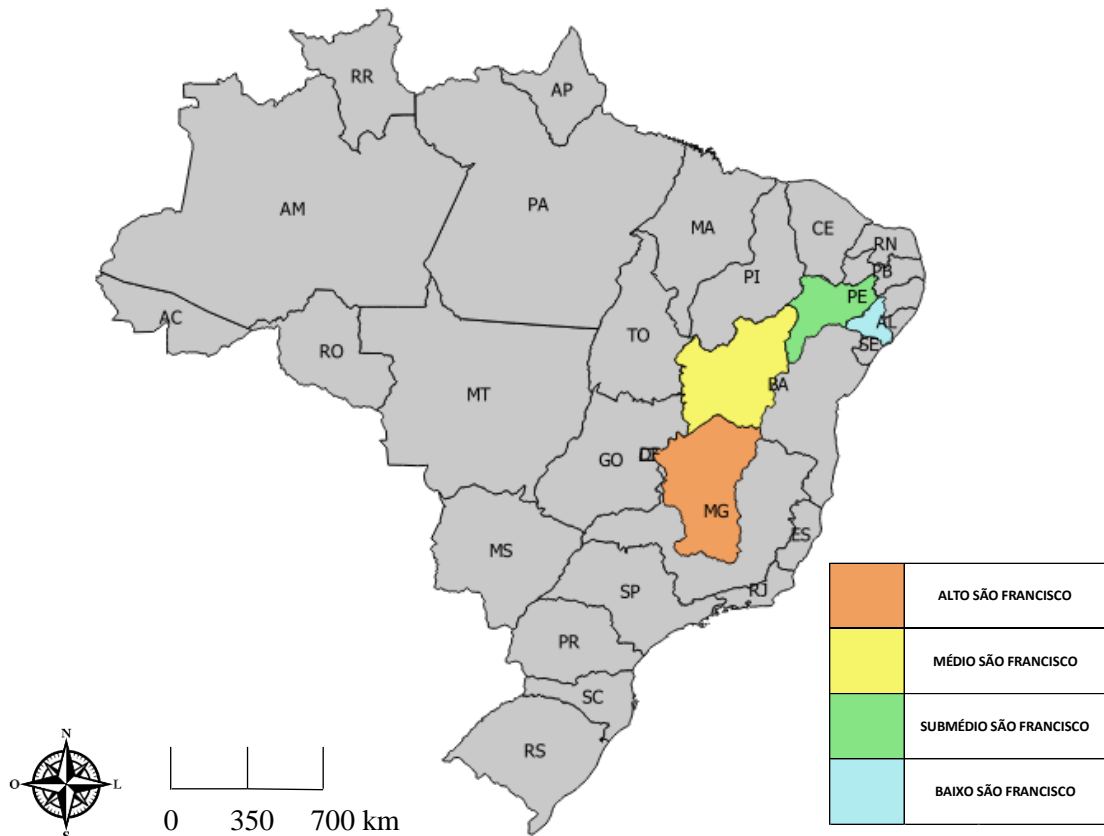
Figura 2 – Bacia do Rio São Francisco.



Fonte: Autor, 2023.

A Bacia possui um total de sete unidades de federação, Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e o Distrito Federal (0,2%), e ainda acomoda um total de 505 municípios, cerca de 9% do total de municípios do país. Esta Bacia possui 4 divisões em função das suas regiões. Possui as regiões do Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Figura 3).

Figura 3- Divisões da Bacia do Rio São Francisco



Fonte: Autor, 2023.

A Bacia do Rio São Francisco possui uma variedade de climas entre úmido e árido com temperatura média anual com variação entre 18 e 27 °C. Enquanto que apresenta uma pluviosidade média anual de 1036 mm, com valores mais altos nas nascentes do rio, da ordem de 1400 mm, e com valores mais baixos entre Sento Sé e Paulo Afonso, na Bahia, com um valor de 350 mm. O trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% da precipitação anual, enquanto o mais seco é de junho a agosto. E a sua evapotranspiração média é de 896 mm/ano, apresentando valores elevados entre 1400 mm (sul) a 840 mm (norte) (CBHSF, 2021).

4.2 Descrição dos dados

Foram utilizados os dados de precipitação das estações pluviométricas do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O período de dados utilizados foi entre os anos de 1961 até 2019, em função da escolha de períodos chuvosos interdecadais, períodos de chuva que chegam a perdurar por mais de uma década, verificando assim a constância e justificativa de fenômenos associados a estes períodos. No presente trabalho foram utilizadas 17 estações pluviométricas. Estas possuem até 20% de falhas, ou seja, de um total de aproximadamente 21.170 dias de dados contidos entre os anos de 1961 até 2019. Apresentam cerca de 80% de dias com dados de precipitação, o que equivale a uma totalidade próxima de 16.936 dias de dados. Possuem no mínimo 47 anos de dados de precipitação, de uma totalidade de 58 anos.

A porcentagem de até 20% de falhas, fundamenta-se na necessidade de uma distribuição espacial representativa. Em decorrência dos dados obtidos para este estudo, com uma redução deste parâmetro de falhas, a quantidade de postos pluviométricos adequados para utilização decresce e afeta a representatividade espacial da Bacia. Assim, os 20% mostram-se eficaz para garantir esta representatividade.

Deve-se destacar que estas 17 estações foram extraídas de uma totalidade de 39. Após a filtragem de acordo com os critérios supracitados, 22 estações foram descartadas por não atenderem aos requisitos, ou seja, por fornecerem um percentual de dados inferior a 80 %.

No quesito distribuição espacial dos postos pluviométricos, ressalta-se que, dos 17 postos, 8 (47,06%) estão localizados na região do alto São Francisco, 4 (23,53%) no Médio, 4 (23,53%) no Submédio e 1 (5,88%) no Baixo São Francisco.

A Tabela 2 apresenta as estações que foram utilizadas, a mesma exibe as coordenadas das estações e o percentual de dados fornecidos de cada posto pluviométrico.

Tabela 2 - Estações Pluviométricas Utilizadas

Ordem	Estações	Coordenadas		Porcentagem de dados fornecidos (%)
		Lat.	Long.	
1°	83587	-19,93	-43,93	94%
2°	83236	-12,15	-45	93%
3°	83581	-19,88	-44,41	91%
4°	82886	-8,51	-39,33	90%
5°	83536	-18,75	-44,45	90%
6°	82979	-9,63	-42,1	88%
7°	83184	-11,21	-41,21	88%
8°	83076	-11,01	-44,51	86%
9°	83097	-10,21	-36,84	86%
10°	83586	-19,46	-44,25	84%
11°	82986	-9,36	-38,21	84%
12°	82983	-9,38	-40,48	83%
13°	83483	-17,35	-44,91	81%
14°	83386	-15,45	-44	81%
15°	83481	-17,73	-46,17	81%
16°	83437	-16,68	-43,84	81%
17°	83288	-13,26	-43,41	80%

Fonte: Autor, 2023.

Por sua vez, a Tabela 3 exibe os valores de precipitação acumulada por décadas de cada posto pluviométrico que será utilizado.

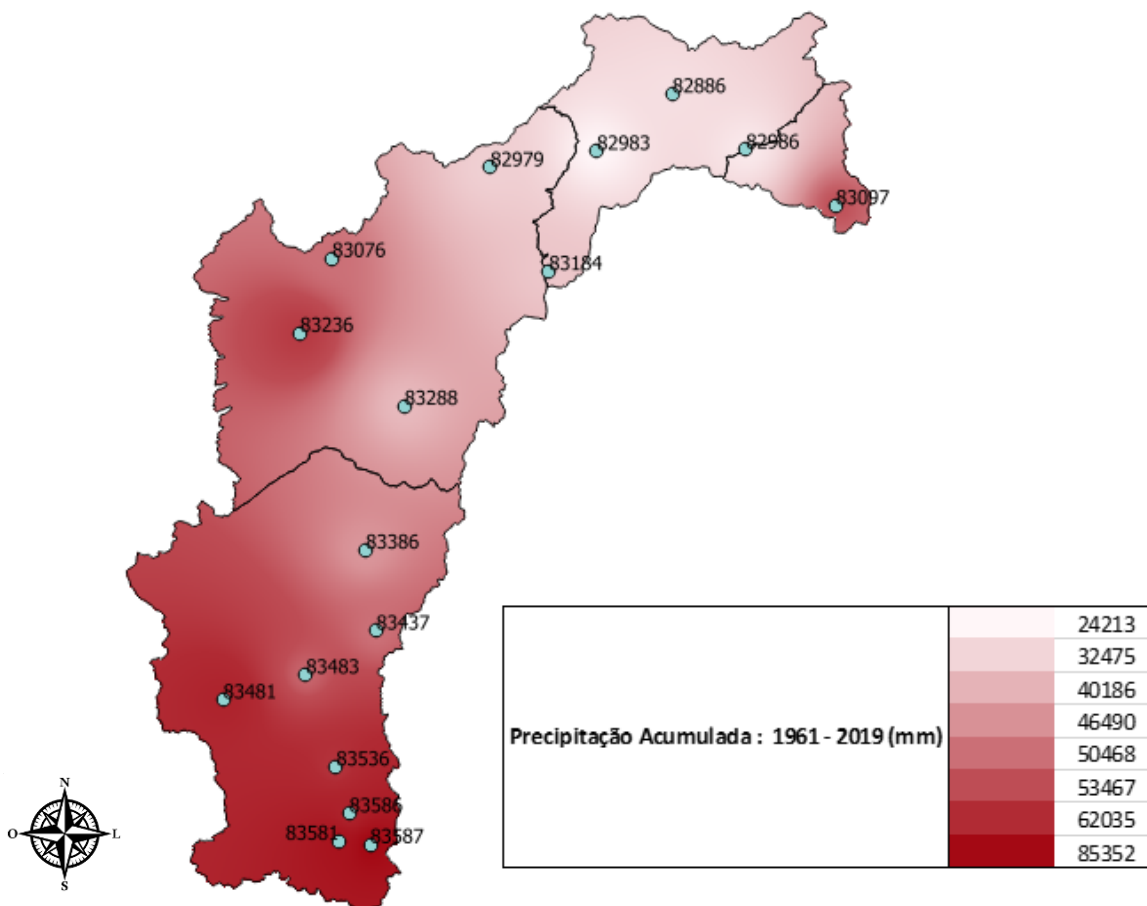
Tabela 3 - Precipitação acumulada por décadas

Décadas	Precipitação acumulada por décadas (mm)																
	Estações																
	83587	83236	83581	82986	83536	82979	83184	83076	83097	83586	82986	82983	83483	83386	83481	83437	83288
61 -> 70	14368.4	10180.4	14704.9	5563.2	9451	7062.3	6138.2	8900.6	11148	13324.3	5563.2	1818.4	7688.9	5300.3	11937.2	5149.9	1397.4
71 -> 80	14955.8	10170	14247.9	4879.7	8716.3	3626.5	5006.3	6384.9	6328.2	13398.6	4879.7	6057	4464	5302.4	9192.9	7869.8	7381.4
81 -> 90	12147.1	11022.6	13853.7	5215.3	9413.9	6312.9	6834.6	8252.7	8944.7	7681.1	5215.3	4095.7	10337.3	8471.6	12378.4	8765.3	7895.3
91 -> 00	15900.1	10216.6	13937.3	4870.5	11281	6706.6	6576.7	10314	9303.9	12733.3	4870.5	4783	10666.2	9216.8	11861.8	10593.5	8547.1
01-> 10	16833.9	8707.8	12744.4	5469.3	11665.7	5996.6	6285.2	8440.2	10162.6	13680	5469.3	4787.5	10815.2	9571.4	14351.5	10838	7840.3
11 -> 19	12276.2	7747.5	9185.2	1414.7	9018	3841.2	4784.4	8014.5	7249	6213.9	1414.7	2478.6	7139.9	7484.1	7333.7	6966.8	5376.8

Fonte: Autor, 2023.

Através da Figura 4 é possível visualizar a acumulação de precipitação na extensão territorial da Bacia entre os anos de 1961 até 2019.

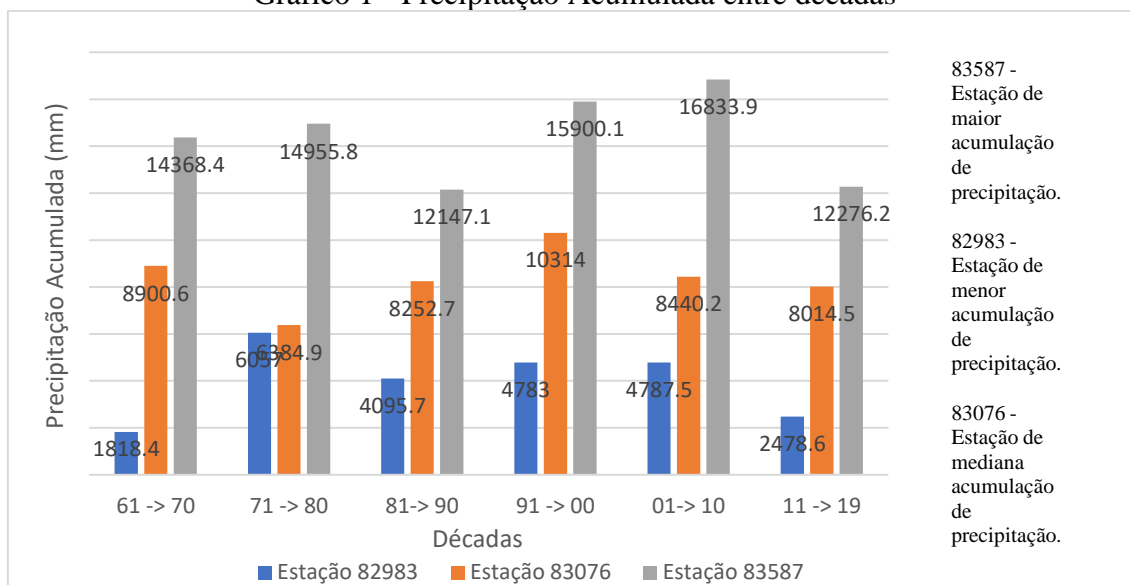
Figura 4 - Precipitação Acumulada



Fonte: Autor, 2023.

Para uma melhor visualização dos dados e determinação dos postos pluviométricos a serem utilizados, o Gráfico 1 apresenta uma comparação entre estes postos, utilizando as precipitações acumuladas em séries interdecadais das estações que tiveram a menor acumulação, maior acumulação e acumulação mediana, entre os 17 selecionados. Foram destacadas 3 estações. A estação 83587 apresentou os maiores valores de precipitação acumulada, estação está localizada na região da bacia denominada de Alto São Francisco, em Belo Horizonte - MG. A estação 82983, localizada no Submédio do São Francisco em Petrolina – PE, apresentou os menores valores. Por fim, a estação 83076 indicou valores medianos, esta estação está localizada na cidade de Santa Rita de Cássia-BA, na região do Médio São Francisco.

Gráfico 1 - Precipitação Acumulada entre décadas



Fonte: Autor, 2023.

4.3 Procedimentos

4.3.1 Índice de Precipitação Padronizado (SPI)

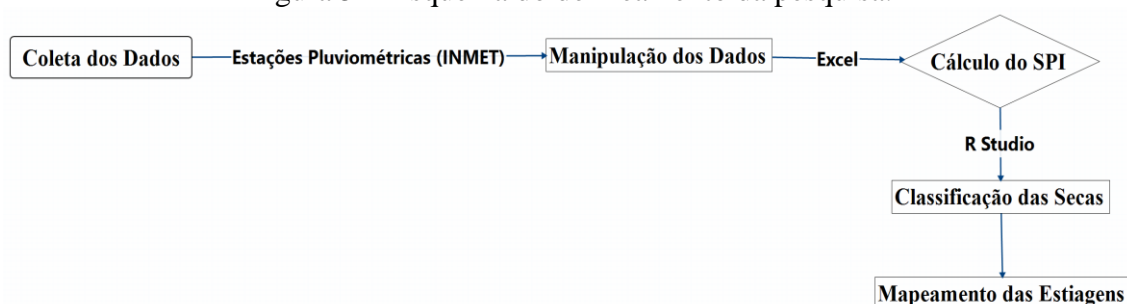
O cálculo do SPI, inicia-se com o ajuste do registro histórico de precipitação à função de densidade de probabilidade da distribuição Gama. Desta forma, inicialmente obteve-se um período de referência de precipitação, período este do ano de 1961 até 2019.

Posteriormente, foi determinada a probabilidade cumulativa destes dados, ou seja, foi construída uma curva cumulativa e a esta curva foi ajustada à função de probabilidade Gamma. Devido à ocorrência de dias sem precipitação durante o período de referência utilizado, com valores de precipitação iguais a zero, esta curva requer uma padronização, sendo necessário assim ajustar essa probabilidade Gamma à distribuição Normal. Após este processo de normalização da curva será possível calcular o SPI para qualquer valor de precipitação.

4.3.2 Sequência da pesquisa

A Figura 5, de forma esquemática, exhibe a sequência seguida na presente pesquisa.

Figura 5 - Esquema do delineamento da pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

4.4 Análises do estudo

O SPI rastreia a seca em diferentes escalas de tempo (1, 3, 6, 12 e 24 meses) e é flexível em relação ao período escolhido (SUN, 2015). Com o uso dos dados de precipitação das estações pluviométricas, os valores de SPI3, SPI12 e SPI24 foram calculados para a bacia do Rio São Francisco. Inicialmente criou-se um script para ser lido no software de linguagem de programação, na interface do RStudio, software em uso no atual trabalho. Script este com os ajustes necessários dos dados e à distribuição de probabilidade, bem como biblioteca correta para o cálculo do índice de precipitação. A biblioteca utilizada padronizou as variáveis segundo a função Gama e as transformou em variáveis Gaussianas com média zero e desvio padrão um. Após a leitura deste script os valores mensais de SPI entre os anos de 1961 a 2019 foram obtidos, de forma numérica e gráfica para melhores interpretações.

Para a realização de uma análise interdecadal como proposta no trabalho, se fez necessário realizar os ajustes aos valores de SPI obtido. Através do acúmulo por década desses valores de SPI, foi possível realizar a classificação da seca em leve, moderada e severa, bem como calcular a severidade, frequência e duração da seca de forma interdecadal.

Com os resultados do SPI, os mapas de estiagem foram gerados através do software QGIS para análises espaciais do comportamento da seca ao longo das décadas na bacia

hidrográfica em estudo. O método de interpolação utilizado, foi o Inverso da Distância Ponderada (IDW) que consiste em realizar a estimativa da variável ao longo do espaço dos n postos mais próximos, o que é uma função do inverso de uma potência da distância. De forma resumida, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (GARDIMAN JUNIOR et al., 2012).

4.4.1 Análises de Padrões Regionais de SPI

Os valores do SPI de 3 meses são utilizados como um índice sazonal para representar a seca de curto prazo e para verificar a sensibilidade da umidade do solo, bem como o estresse hídrico e quebra de safras agrícolas (ADARSH, 2018; ADNAN, 2021). Os autores Matheus e Antônio (2020) afirmam que a escala de 12 meses é usualmente utilizada para análises de secas meteorológicas e hidrológicas. Assim, a utilização desse intervalo de tempo evita as variações interanuais e possibilita a identificação dos principais períodos secos (MATHEUS; ANTÔNIO, 2020).

Segundo Guerreiro et. al (2008), os principais períodos secos podem ser identificados a partir da análise do SPI 24. O SPI com escala temporal de 24 meses representa picos. Desta forma, ao se identificar picos nesta escala, o SPI 3 e 12 também devem ser calculados, tendo em vista que estes valores de picos ocorrem após a ligeira diminuição desses valores de SPI (GUERREIRO; LAJINHA; ABREU, 2008).

Desta forma, a partir dos resultados obtidos para o SPI3, 12 e 24 meses os mapas de estiagem são gerados. Os mapas de estiagem são utilizados para fornecer uma visão geral dos respectivos pontos de seca e um panorama das áreas mais atingidas (SPINONI, 2013). Esses mapas são um componente essencial no quesito de gestão do risco da ocorrência de seca, através deles é possível exibir a diferença regional da gravidade do fenômeno da seca (BLAUHUT; GUDMUNDSSON; STAHL, 2015).

4.4.2 Análise de Padrões Pontuais de SPI

4.4.2.1 Duração, frequência e severidade

Quanto às variáveis da seca, sabe-se que a frequência da seca (DF) é o número de eventos por década. A duração da seca é o número de meses de um evento, logo a duração total da seca (TDD) é o número total de meses gastos em eventos de seca por um determinado período. A severidade da seca é a soma, em valores absolutos, de todos os Z-12

que fazem parte do evento de seca, computando essa quantidade como severidade total da seca (TDS), considerando todos os eventos em um determinado período (SPINONI, 2015).

4.4.2.2 Análise de Cluster

Sabe-se que a análise de Cluster é uma técnica estatística usada para classificar elementos em grupos, baseado nas características que estes elementos possuem (OLIVEIRA, 2020). De tal forma que os elementos dentro de um mesmo cluster sejam parecidos, enquanto que esses mesmos cluster sejam distintos entre si. Ou seja, esse tipo de análise maximiza a homogeneidade das variáveis dentro dos grupos e maximiza a heterogeneidade entre os grupos. Esta análise inclui procedimentos estatísticos utilizados para classificar objetos através da observação de semelhanças ou dissemelhanças entre eles (EMBRAPA, 2020).

Na análise de Cluster se tem os dendrogramas, que são diagramas de árvores que exibem os grupos formados através de agrupamentos de variáveis em etapas e níveis de similaridade. O eixo vertical do dendrograma marca o nível de similaridade, ou o nível de distância, e o eixo horizontal marca as variáveis.

Para visualizar o nível de similaridade e distância das características das estações quanto a classificação do SPI, foram criados dendrogramas para estas visualizações. O método utilizado foi o de Ward, a fim de minimizar a variação intragrupos e maximizar a variação entre grupos. O método de Ward é um agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade utilizada para unir agrupamentos é calculada a partir da soma de quadrados entre os agrupamentos feita sobre todas as variáveis. Este método inclina-se a resultar em agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais em função da minimização da variação interna (SEIDEL et al., 2008).

5 RESULTADOS

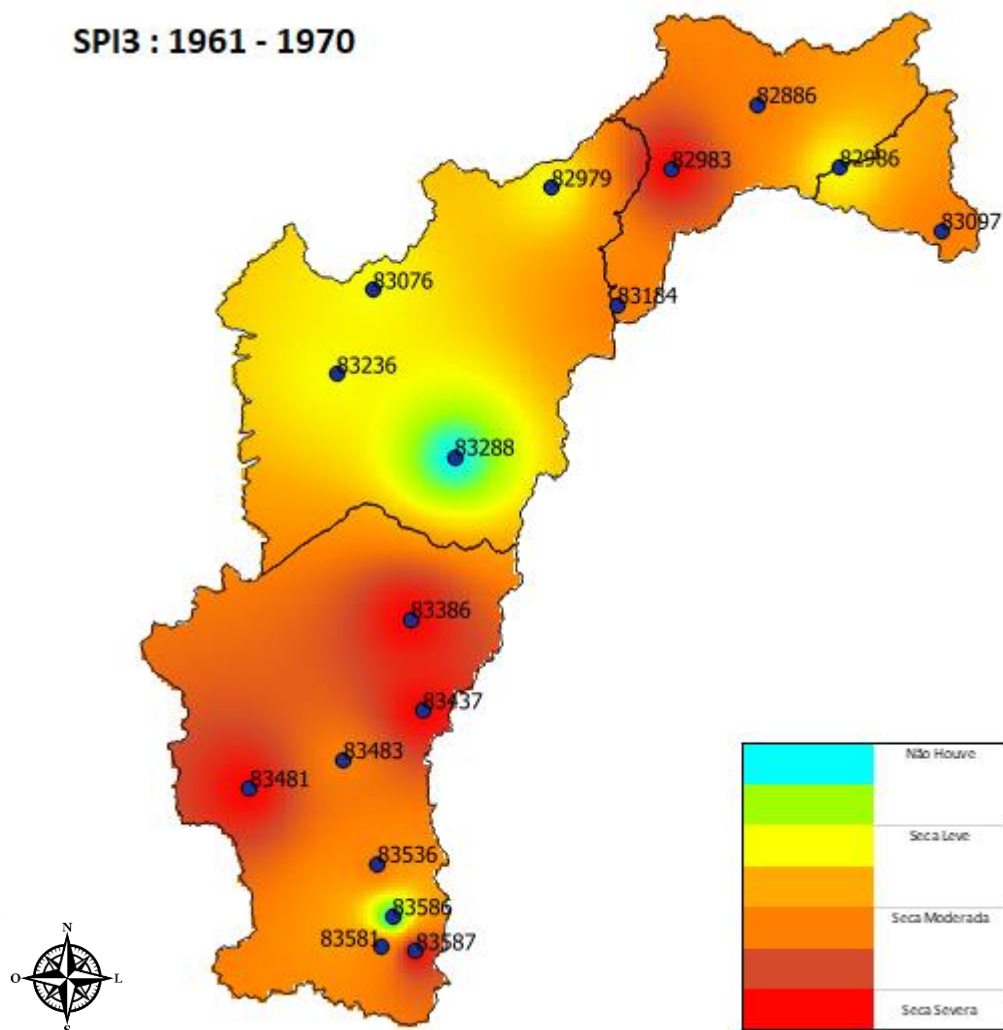
5.1 Análises de Padrões Regionais de SPI – Mapas de estiagem

5.1.1 Mapas – SPI3

Desta forma, como uma análise da variação de precipitação na primeira década em estudo, entre os anos de 1961 a 1970, de uma totalidade de seis décadas foi possível verificar regiões de ocorrência de secas leves, moderadas e severas, bem como regiões que não passaram pelo fenômeno da seca.

De acordo com a Figura 6, na região em torno da estação 83288, localizada na cidade de Bom Jesus da Lapa-BA, é possível verificar uma região sem estresse hídrico se comparada as demais, tendo em vista que em torno desta estação de acordo com o mapa não houve ocorrência de seca. Na região do médio São Francisco é possível verificar a ocorrência de seca leve, sendo as regiões mais agravadas pela seca as regiões do alto e submédio São Francisco, e ocorrência de seca moderada também no baixo São Francisco.

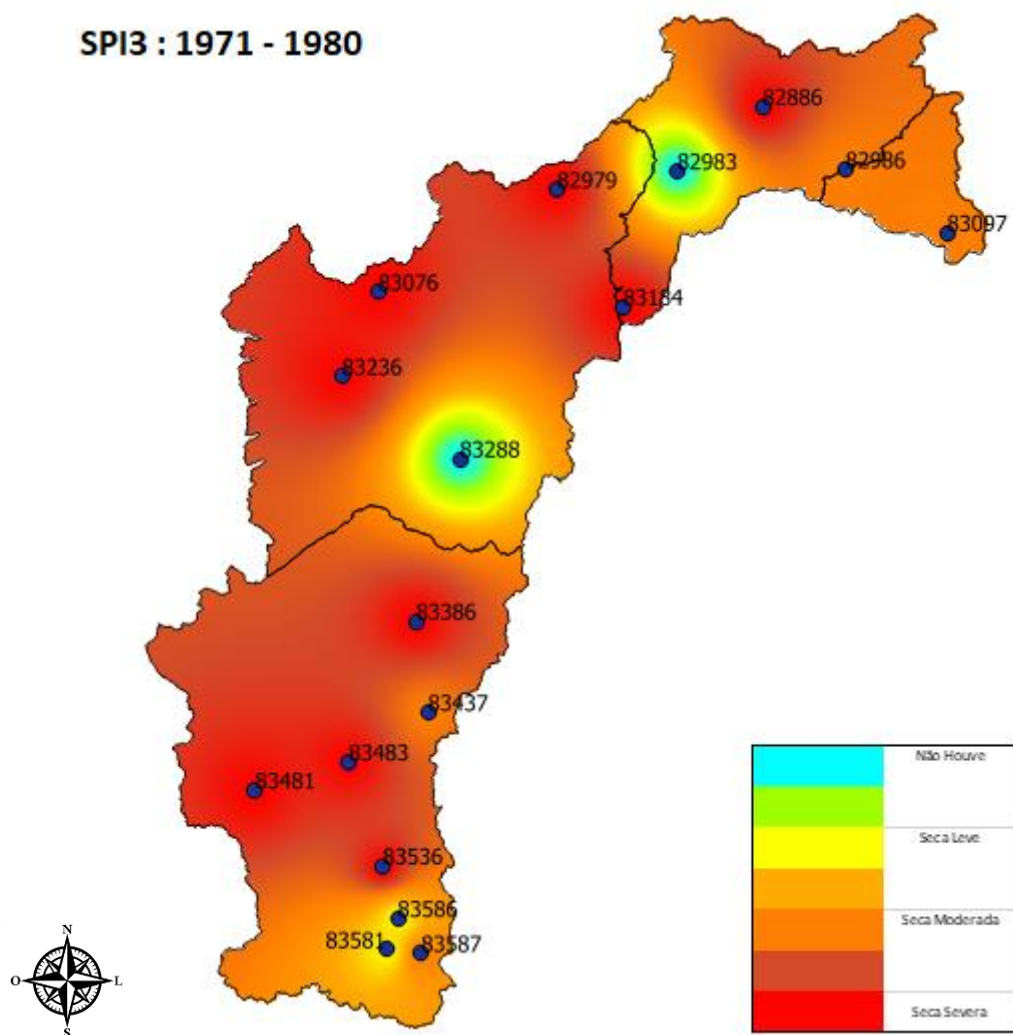
Figura 6 - Mapa SPI3: 1961 -1970



Fonte: Autor, 2023.

Na segunda década (Figura 7), entre os anos de 1971 a 1980 é possível visualizar uma década de maior estresse hídrico na Bacia do Rio São Francisco. É possível visualizar secas de predominância severa na região do alto, submédio e médio, e secas moderadas na região do baixo São Francisco.

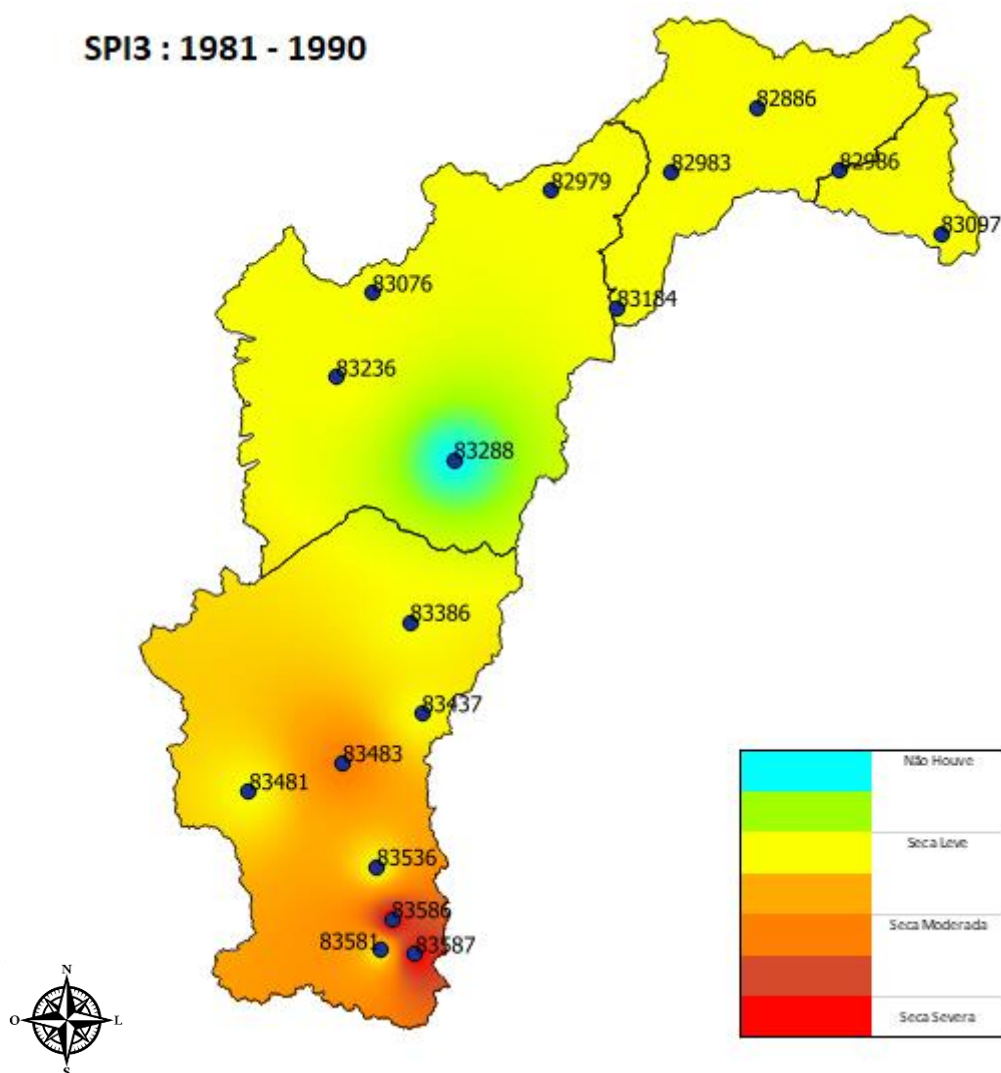
Figura 7 - Mapa SPI3: 1971 - 1980



Fonte: Autor, 2023.

Entre os anos de 1981 a 1990 (Figura 8), o fenômeno da seca ao longo de toda a bacia foi menos agressivo, com a ocorrência predominantemente de secas leves em todas as regiões, exceto entre as estações 83586 e 83587 que teve a ocorrência de secas moderadas e severas. Estações estas localizadas nas cidades de Santa Luiza-MG e Belo Horizonte-MG, respectivamente, localizadas no Alto São Francisco.

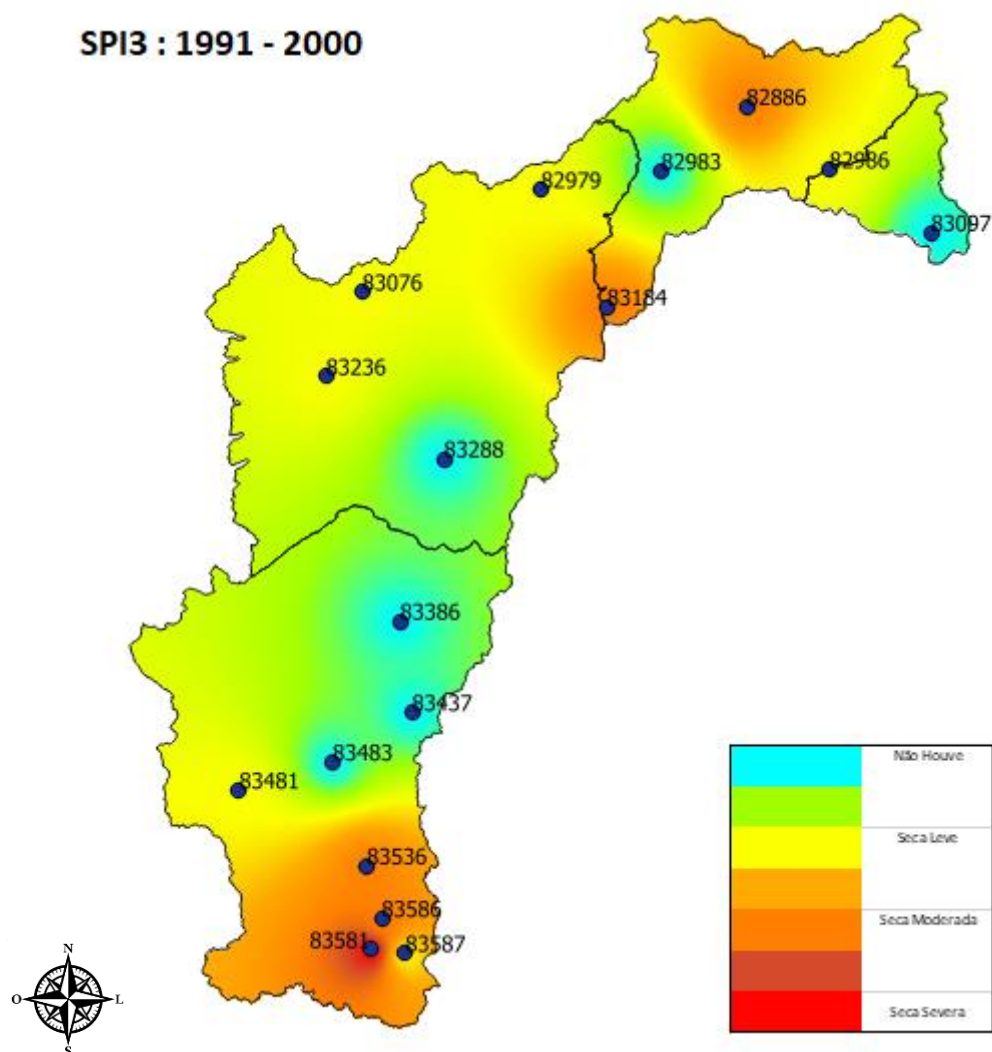
Figura 8 - Mapa SPI3: 1981 - 1990



Fonte: Autor, 2023.

Na quarta década em estudo (Figura 9), entre os anos de 1991 a 2000 é possível verificar uma suavidade do fenômeno da seca nas regiões da bacia, especificamente nas regiões do médio e baixo, e uma parcela do alto. Sendo uma década de menor estresse hídrico se comparada a década anterior. Contudo, ainda com ocorrência de seca moderada na região do alto e submédio São Francisco.

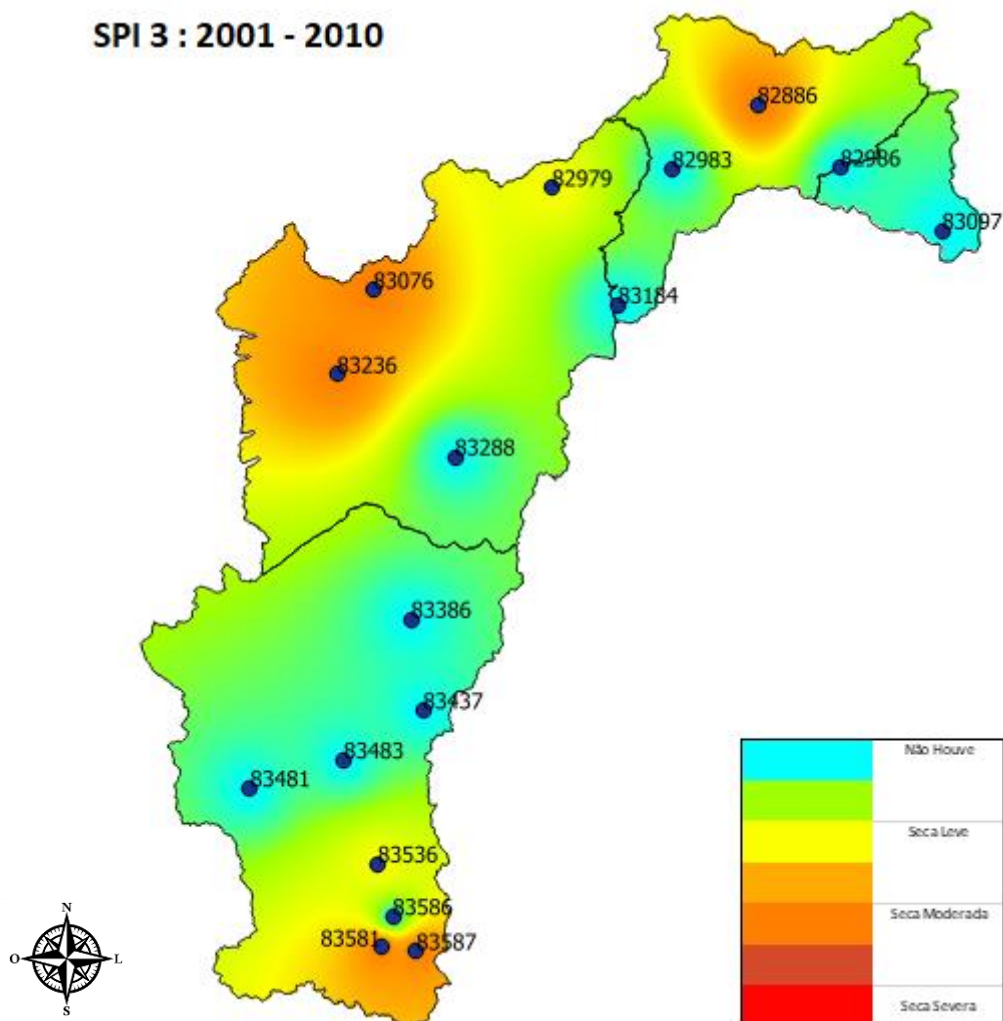
Figura 9 - Mapa SPI3: 1991 - 2000



Fonte: Autor, 2023.

Ao longo da quinta década em estudo (Figura 10), entre os anos de 2001 a 2010 é possível verificar uma década com menores variações na precipitação, sem a ocorrência do fenômeno da seca em boa parte das regiões da bacia. Com ocorrências isoladas de secas leves e moderadas em pontos específicos do submédio, médio e alto São Francisco, mais especificamente nos estados de Pernambuco, Bahia e Minas Gerais.

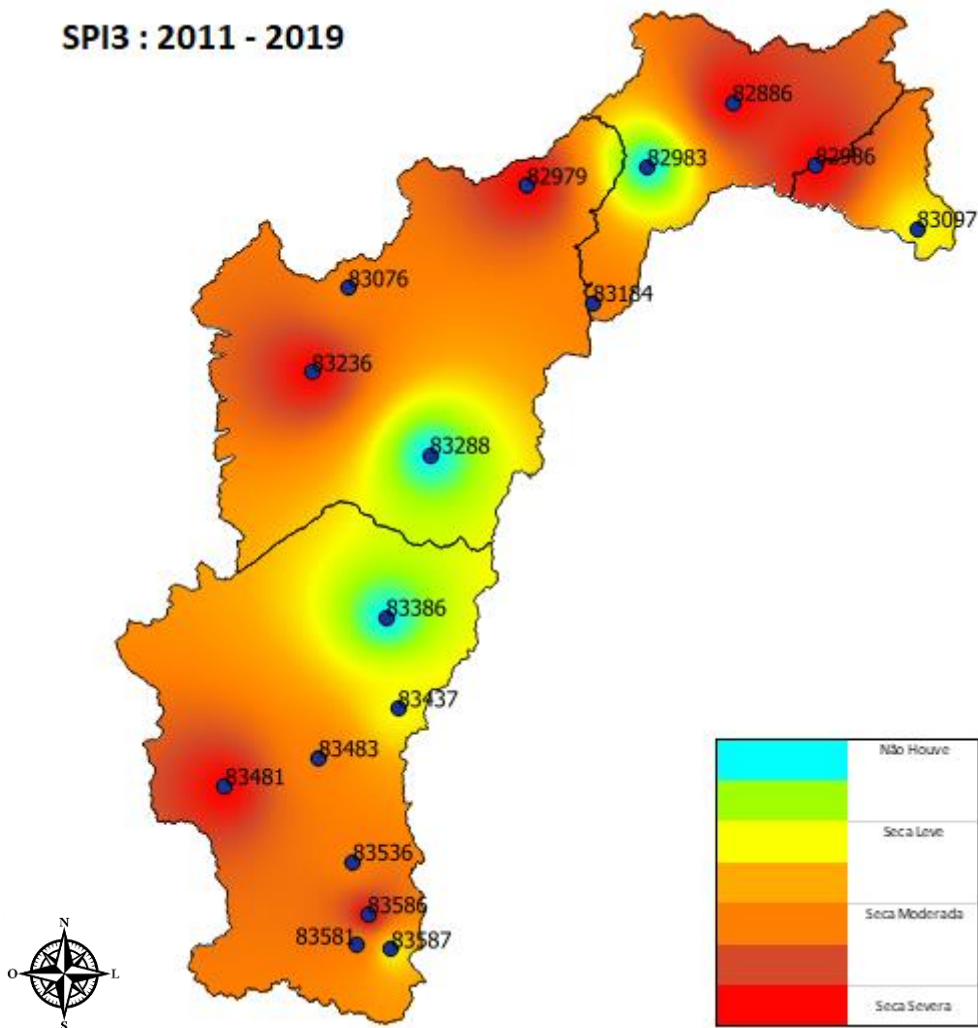
Figura 10 - Mapa SPI3: 2001 - 2010



Fonte: Autor, 2023.

Na última década em análise (Figura 11), entre os anos de 2011 a 2019, visualiza-se uma década de maior estresse hídrico. Tendo em vista a ocorrência predominantemente de secas moderadas e severas, principalmente nas regiões extremas do alto e submédio São Francisco, com a abrangência também deste fenômeno em parte do médio e com secas leves no baixo São Francisco.

Figura 11 - Mapa SPI3: 2011 - 2019



Fonte: Autor, 2023.

Com a análise dos mapas de estiagem referente a um curto prazo, ou seja, 3 meses com o auxílio do SPI3, é possível afirmar grandes estresses hídricos principalmente nas regiões do alto e submédio São Francisco. Foi possível verificar que mesmo nas décadas de suavidade do fenômeno da seca a região do alto ainda, mesmo que em pontos específicos como na região de Minas Gerais o fenômeno da seca se fazia presente. A região do alto São Francisco foi a que teve ocorrência da seca em todas as 6 décadas. Ao longo das décadas estudadas alguns pontos da região do médio São Francisco demonstrava baixas variações de precipitação, tendo em vista que através dos mapas em torno da estação 83288 localizada no estado da Bahia permanecia sem a ocorrência do fenômeno da seca, contudo mesmo sendo uma região com variações inferiores às regiões supracitadas, ainda foi uma região com ocorrência de seca.

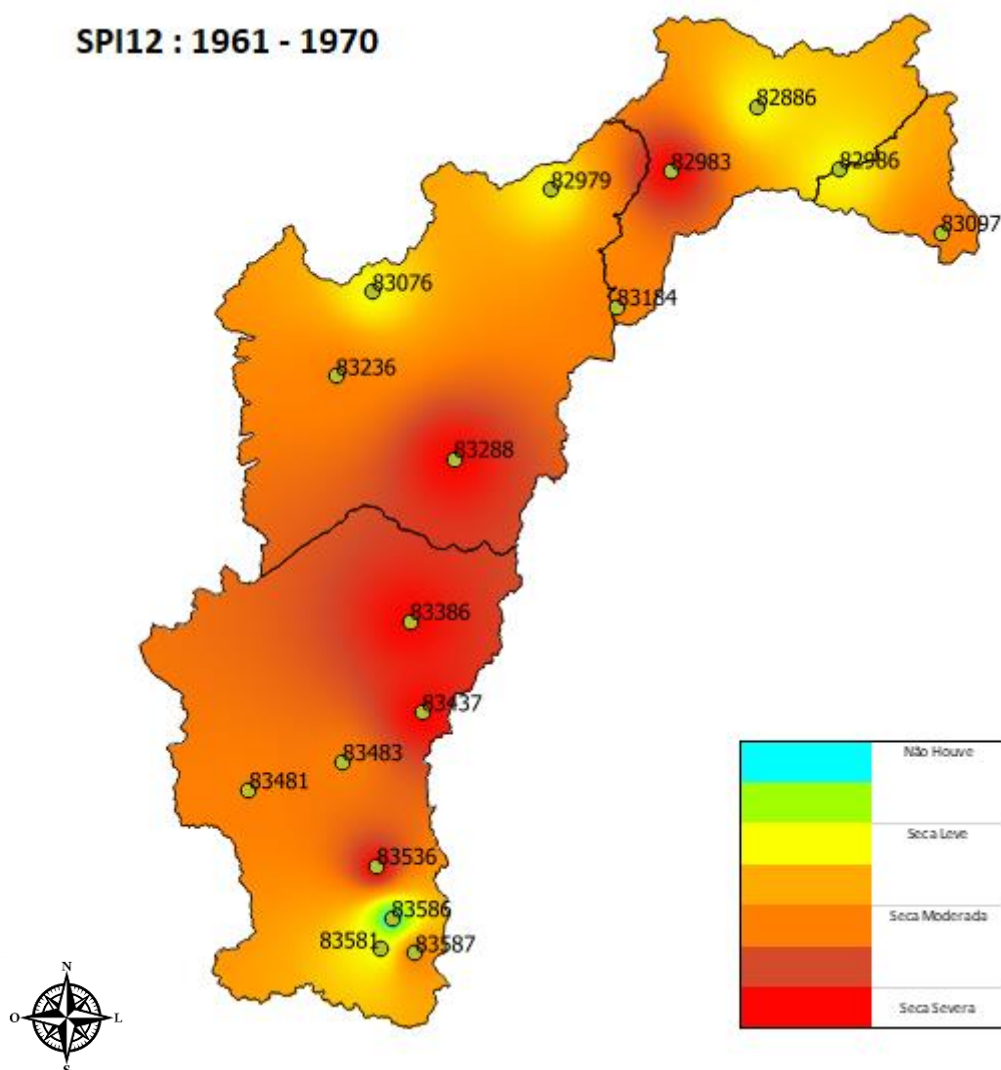
Desta forma, pode-se destacar que de forma ordenada e decrescente as regiões mais atingidas pela seca através da análise do SPI3 foram as regiões do Alto, posteriormente do submédio, médio e por fim a do baixo São Francisco.

Na totalidade da Bacia visualiza-se que as duas primeiras décadas foram marcadas por maiores eventos de seca, pois entre os anos de 1961 até 1980, há uma predominância de secas moderadas e severas. Após estas duas décadas iniciais, é possível verificar um início de suavização desse fenômeno, iniciando com uma predominância de secas leves, e posteriormente com um aumento de áreas sem a ocorrência de seca, mais especificamente na quinta década há essa suavização do fenômeno da seca. Contudo, na última década em análise é possível verificar o retorno do estresse hídrico na bacia, sendo uma década com eventos de secas moderadas e severas.

5.1.2 Mapas – SPI12

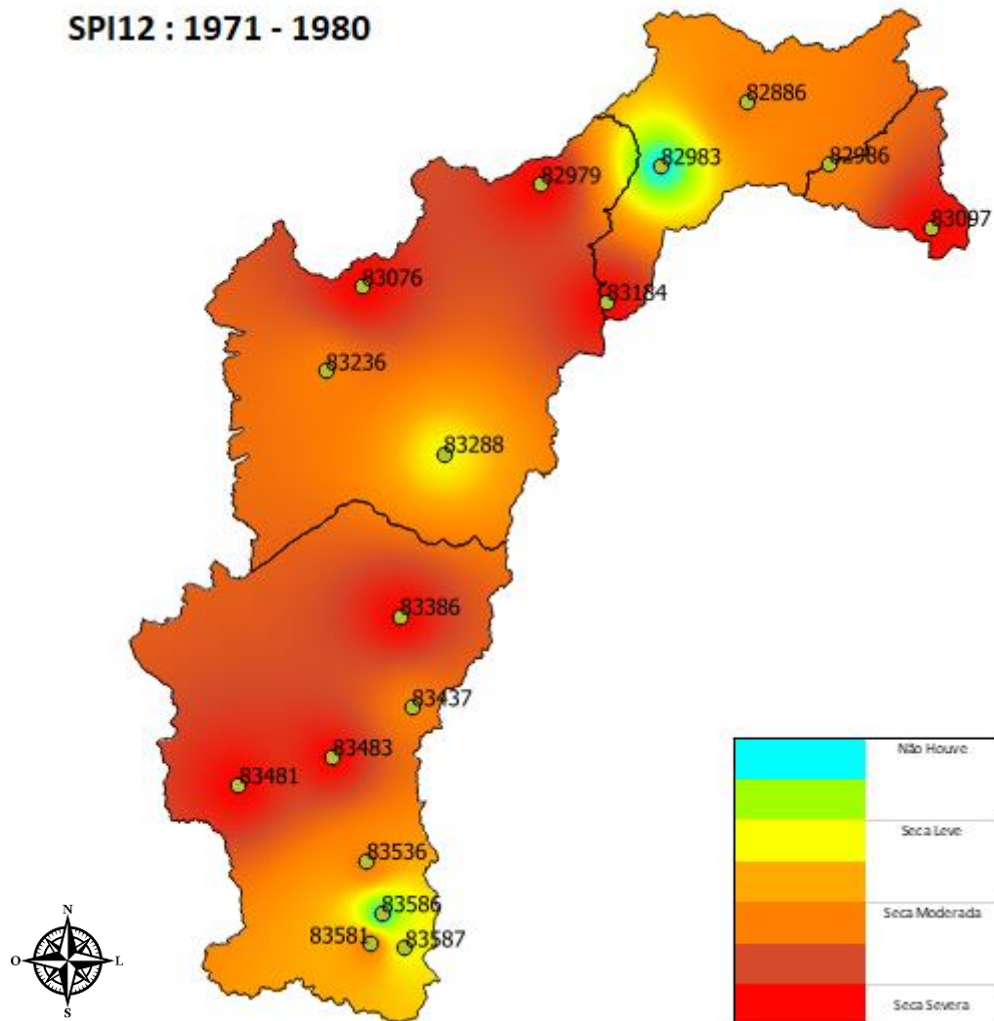
Com uma análise de longo prazo, através do acúmulo de 12 meses, referente ao SPI12 é possível verificar de forma isolada o comportamento da seca ao longo das décadas. Entre os anos de 1961 a 1970 (Figura 12), visualiza-se um estresse hídrico em pontos específicos do alto, médio e submédio São Francisco. Se comparado com o mapa do SPI3 desta mesma década, verifica-se que a seca severa ocorrente nas estações 82983 e 83386 localizadas nas cidades de Petrolina-PE e Varzelândia-MG respectivamente, localizadas no submédio e alto, foram secas que perduraram durante todo o ano, pois já estavam presentes em uma análise de curto prazo e se mantiveram na análise de longo prazo, demonstrando um estresse hídrico duradouro ao longo daquela região. Um ponto de análise interessante é a ocorrência do fenômeno da seca severa na estação 83288, localizada no Médio São Francisco, através da análise do SPI3 não foi possível visualizar este fenômeno, mostrando que a seca ocorrente naquela região se deu em maior prazo, e em outro nível de característica referente a severidade e tipo de seca.

Figura 12 - Mapa SPI12: 1961 - 1970



Na segunda década em estudo (Figura 13), entre os anos de 1971 a 1980 visualiza-se um comportamento semelhante a análise do SPI3. Tendo em vista a ocorrência de secas severas no alto, médio e baixo São Francisco. Inferindo a severidade das secas de longo prazo agravantes no alto e médio São Francisco, bem como a intensificação do fenômeno no baixo.

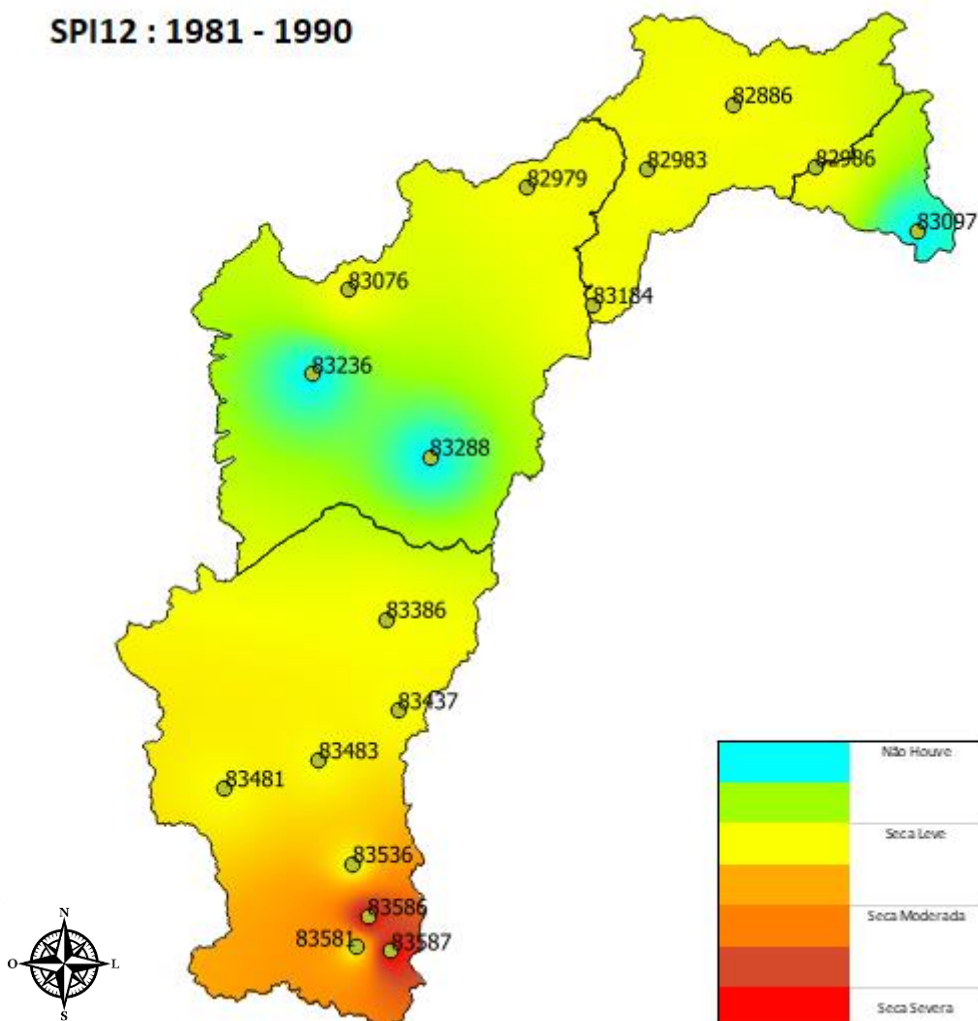
Figura 13 - Mapa SPI12: 1971 - 1980



Fonte: Autor, 2023.

Entre os anos de 1981 a 1990 (Figura 14) verifica-se uma suavização do fenômeno da seca ao longo da extensão territorial da bacia. Um ponto a se destacar é suavização do fenômeno no baixo são Francisco, sem a ocorrência de seca, destacando que a ocorrência da seca leve apontada no SPI3 foi um evento de fato de curto prazo. Contudo, na região do Alto são Francisco verifica-se a incidência das secas moderadas e leves apontadas na mesma região do SPI3, ou seja, de fato um fenômeno de maior preocupação e impacto ocorreu nesta região durante a terceira década em estudo.

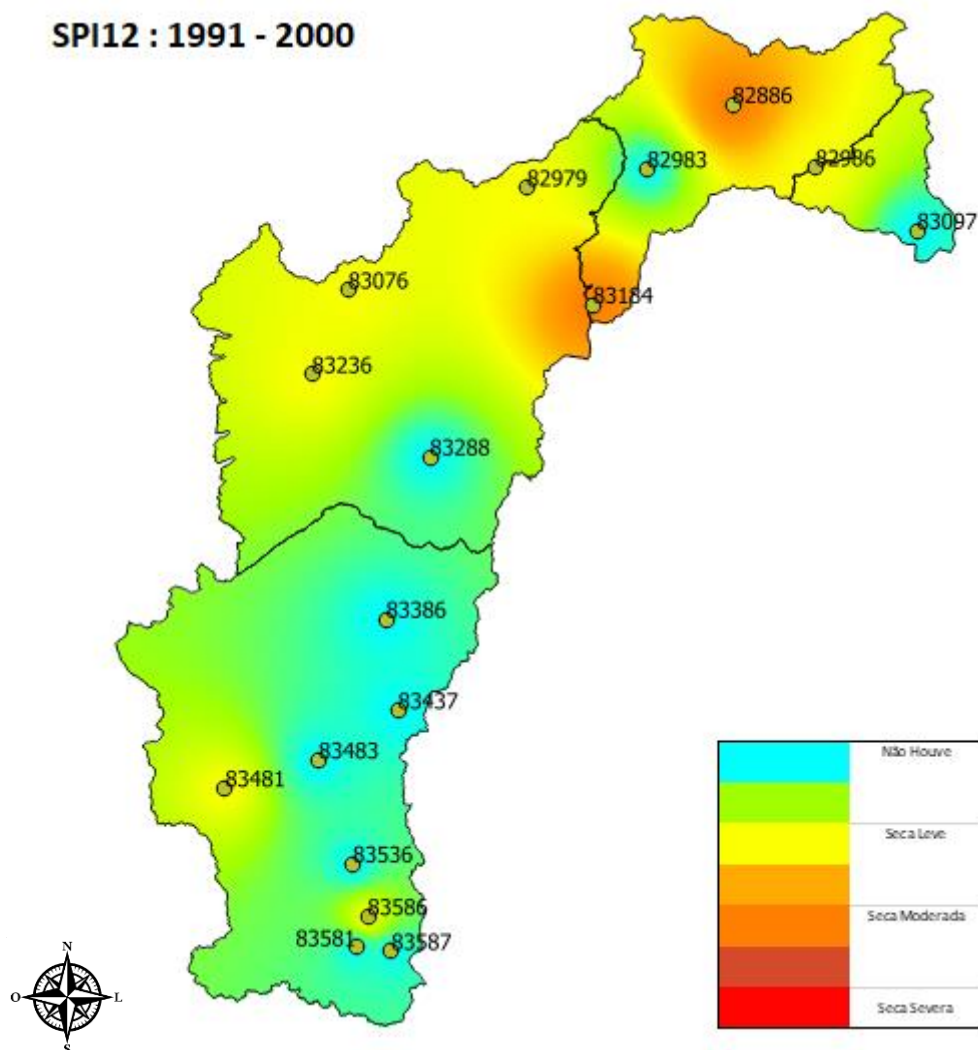
Figura 14 - Mapa SPI 12: 1981 - 1990



Fonte: Autor, 2023.

Durante os anos de 1991 e 2000 (Figura 15) há uma diminuição da incidência do fenômeno da seca nas regiões do alto, médio e baixo São Francisco. Indicando que na análise do SPI3 a seca moderada e severa incidente na região do alto São Francisco foi de curto prazo. Enquanto que a ocorrência de seca leve e moderada na região do submédio São Francisco foi de maior impacto no quesito duração, tendo em vista que em uma análise de maior prazo este fenômeno se fez presente.

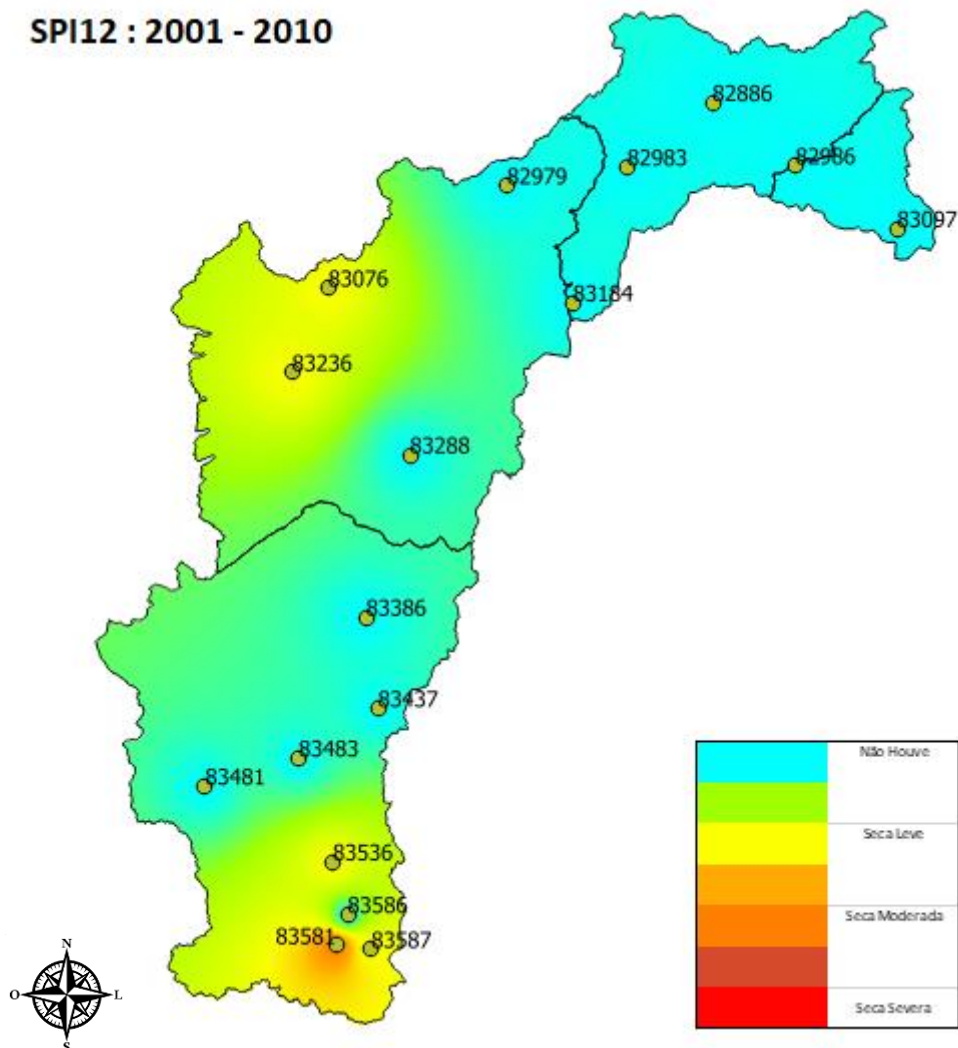
Figura 15 - Mapa SPI12: 1991 - 2000



Fonte: Autor, 2023.

Entre os anos de 2001 a 2010 (Figura 16), visualiza-se uma década de menor ocorrência de seca. Sendo persistente apenas na região do alto e médio São Francisco, a ocorrência desse fenômeno nos estados de Minas Gerais e Bahia.

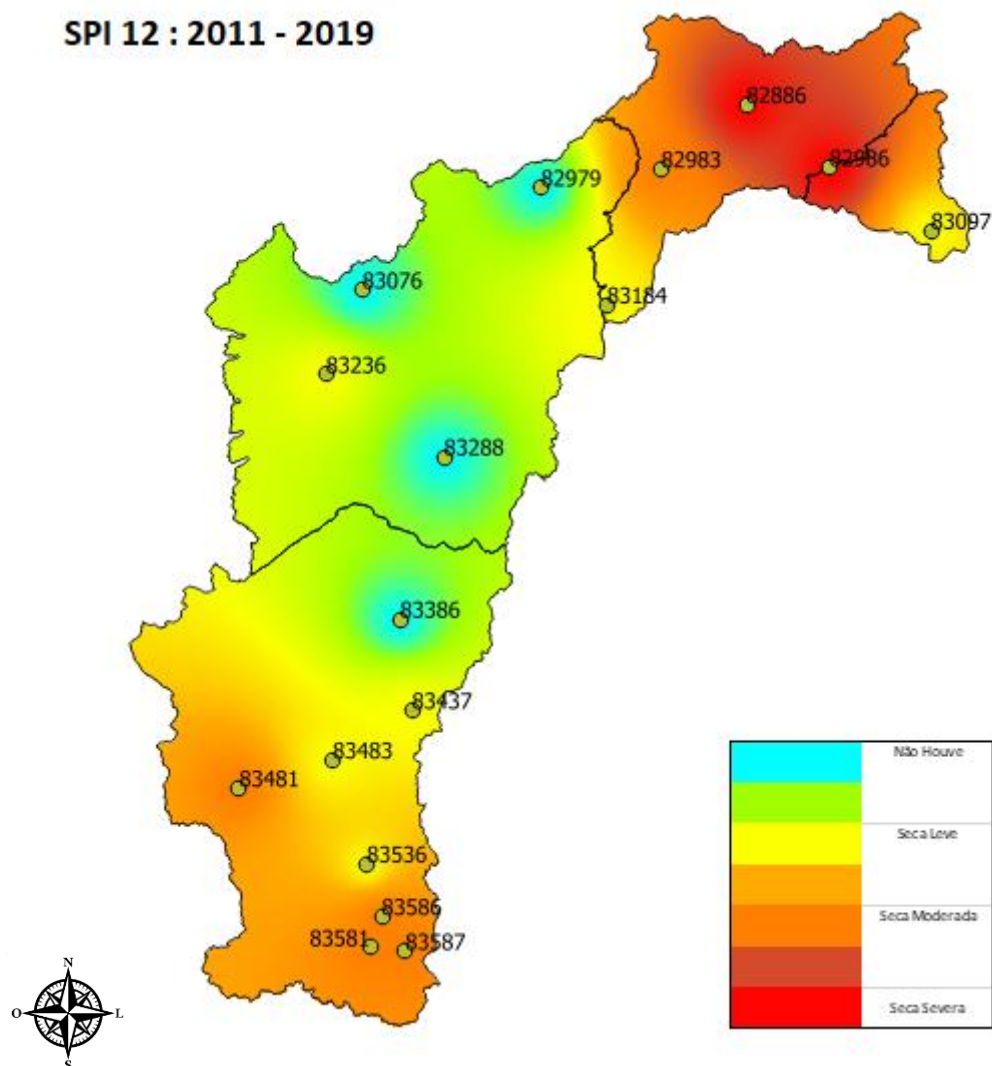
Figura 16 - Mapa SPI12: 2001 - 2010



Fonte: Autor, 2023.

Na última década em análise (Figura 17), é possível verificar o retorno de um estresse hídrico como já mostrado no SPI3. A incidência da seca se tornou maior entre os anos de 2011 a 2019, mais especificamente na região do submédio São Francisco, com a ocorrência de longo prazo da seca leve em torno da estação 82886 na cidade de Cabrobró-Pe. Vale destacar também a ocorrência da seca moderada na região ao alto, no estado de Minas Gerais.

Figura 17 - Mapa SPI12: 2011 - 2019



Fonte: Autor, 2023.

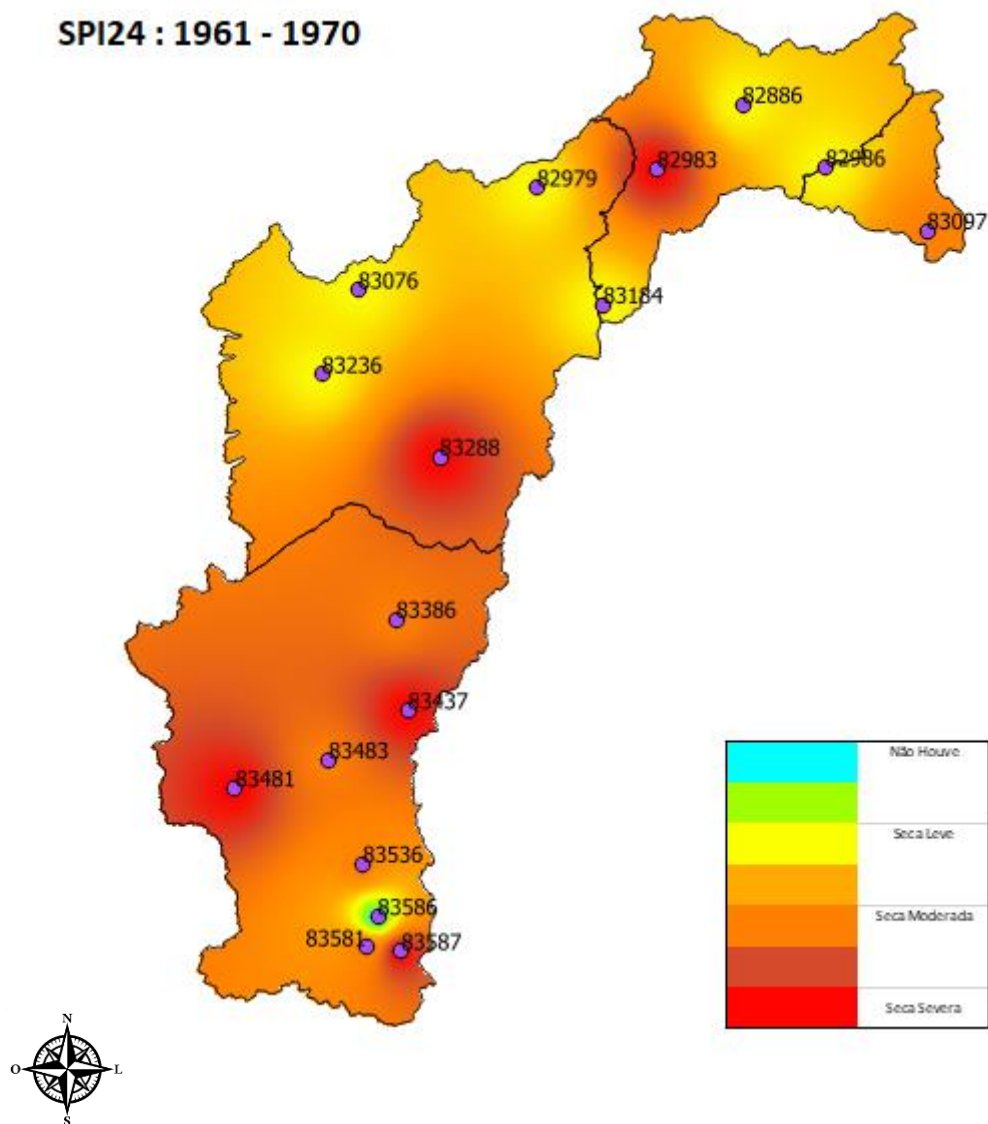
De forma análoga aos mapas de estiagens do SPI3 verifica-se que as duas primeiras décadas foram marcadas por maiores eventos de seca, entre os anos de 1961 a 1980 há uma predominância de secas moderadas e severas em todas as regiões. Verifica-se também uma suavização desse fenômeno nas duas décadas subsequentes, entre os anos de 1981 a 2000, exceto entre as essas décadas, as secas leves e moderadas de longo prazo ocorrentes no alto e submédio são Francisco. A quinta década, entre os anos de 2001 a 2010 mostrou-se com menores eventos de secas se comparada as demais, intensificando apenas as secas leves do alto e médio são Francisco. Na última década em análise, como já mostrado pelo SPI3 verifica-se uma década com maiores variações da precipitação e

eventos de seca, especificamente as secas severas do submédio são Francisco e as moderadas do alto são Francisco.

5.1.3 Mapas – SPI24

De forma análoga ao SPI12, verifica-se que a seca ocorrente nas regiões do submédio, médio e alto são Francisco, especificamente nos Estados de Pernambuco, Bahia e Minas Gerais durante esta primeira década em análise, entre os anos de 1961 a 1970 foi um evento de longa duração (Figura 18).

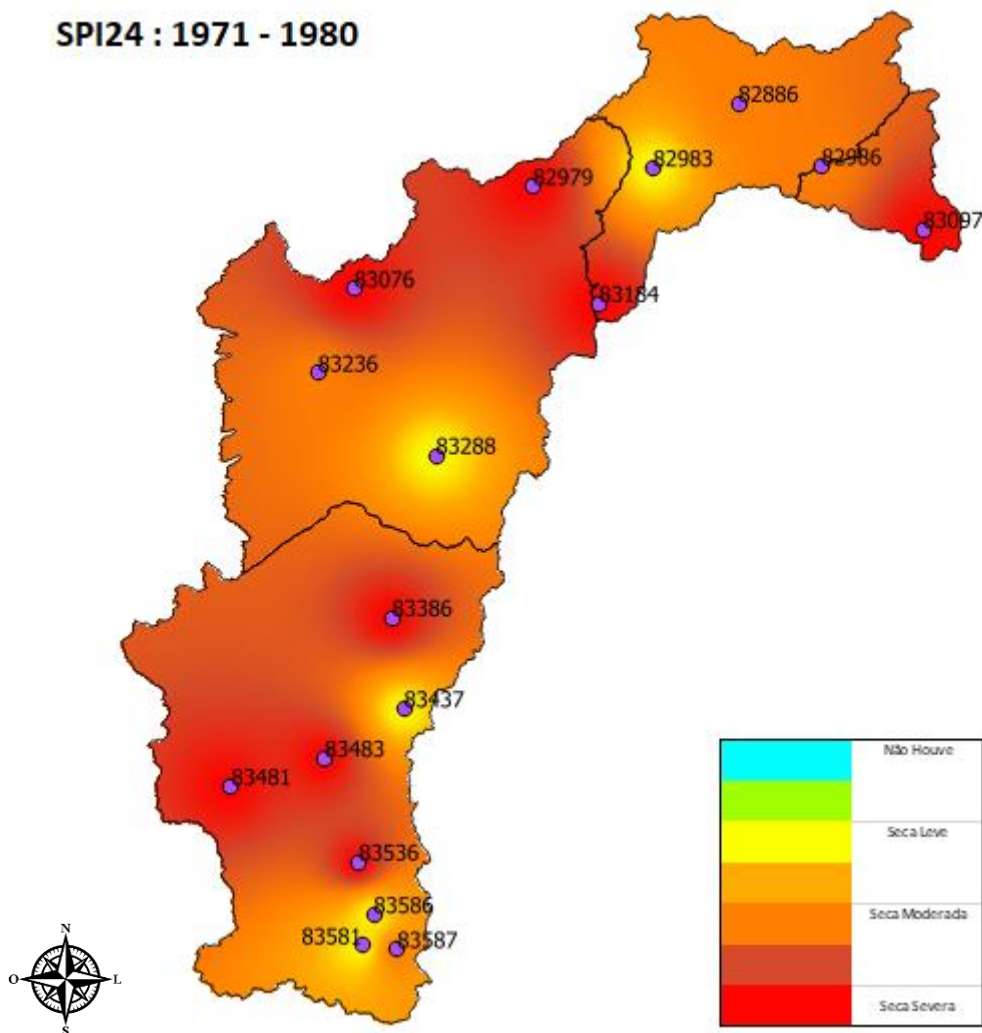
Figura 18 - Mapa SPI24: 1961 - 1970



Fonte: Autor, 2023.

Na análise entre os anos de 1971 a 1980 (Figura 19) verifica-se que as secas severas no baixo, médio e alto são Francisco foram eventos de maior preocupação e com longa duração.

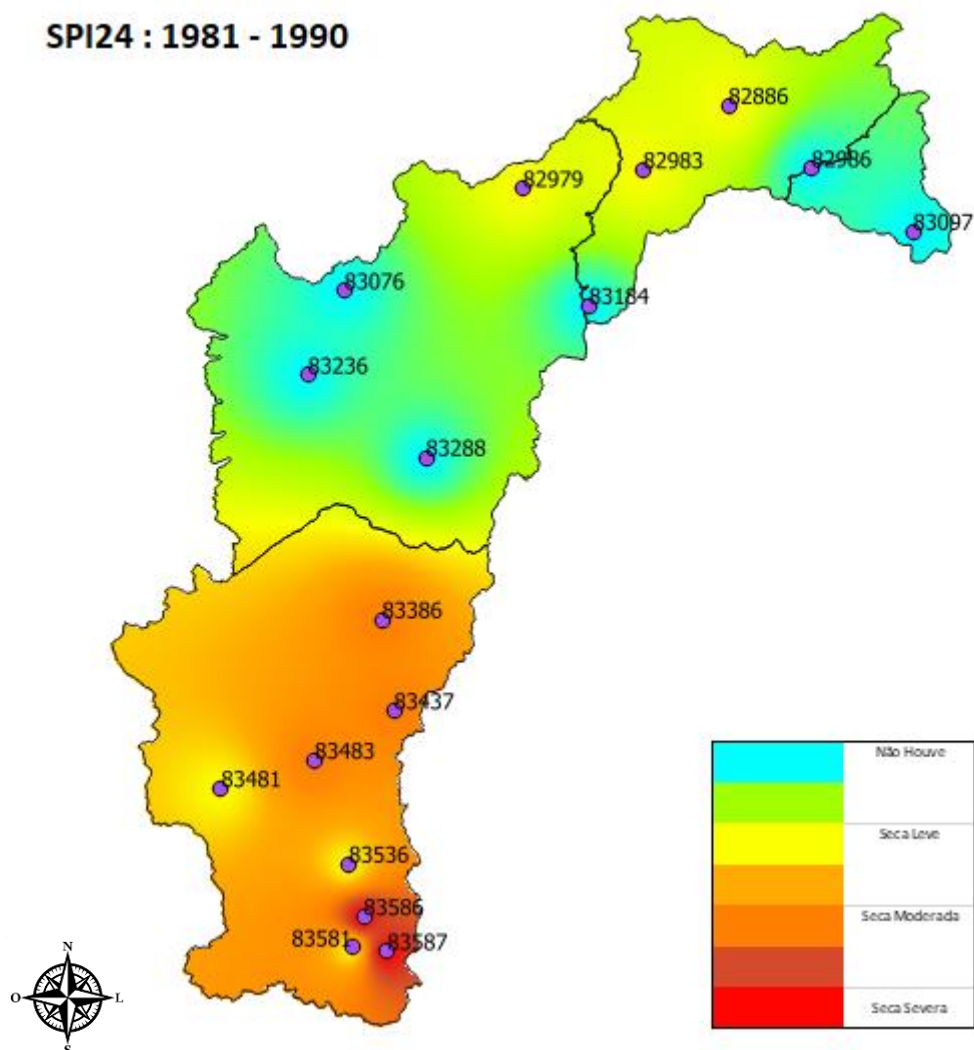
Figura 19 - Mapa SPI24: 1971 - 1980



Fonte: Autor, 2023.

Como visualizado no SPI12 a década correspondente aos anos de 1981 a 1990 (Figura 20), a ocorrência de seca moderada e severa na região do alto São Francisco foi predominante.

Figura 20 - Mapa SPI24: 1981 - 1990

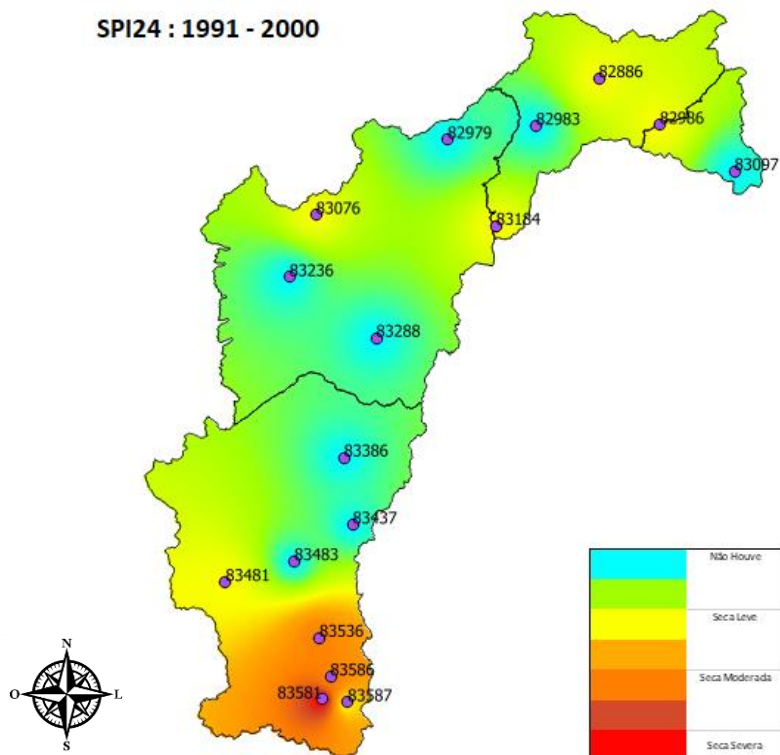


Fonte: Autor, 2023.

As duas décadas equivalentes aos anos de 1991 a 2010 (Figura 21 e Figura 22), mostram a diminuição considerável dos eventos de seca em toda a extensão da bacia. Indicando que foram décadas com menores variações nas precipitações e estresse hídrico.

Figura 21 - Mapa SPI24: 1991 - 2000

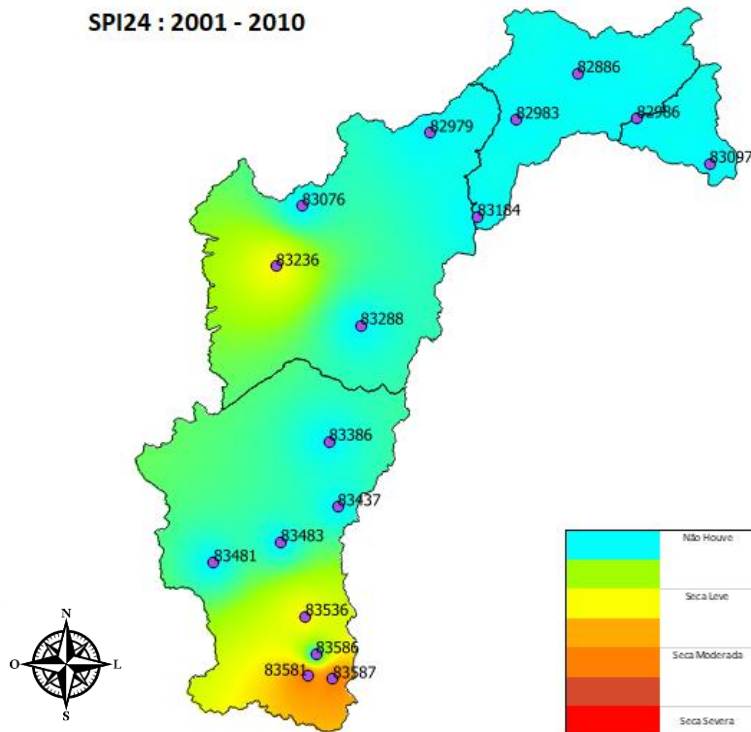
SPI24 : 1991 - 2000



Fonte: Autor, 2023.

Figura 22 - Mapa SPI24: 2001 - 2010

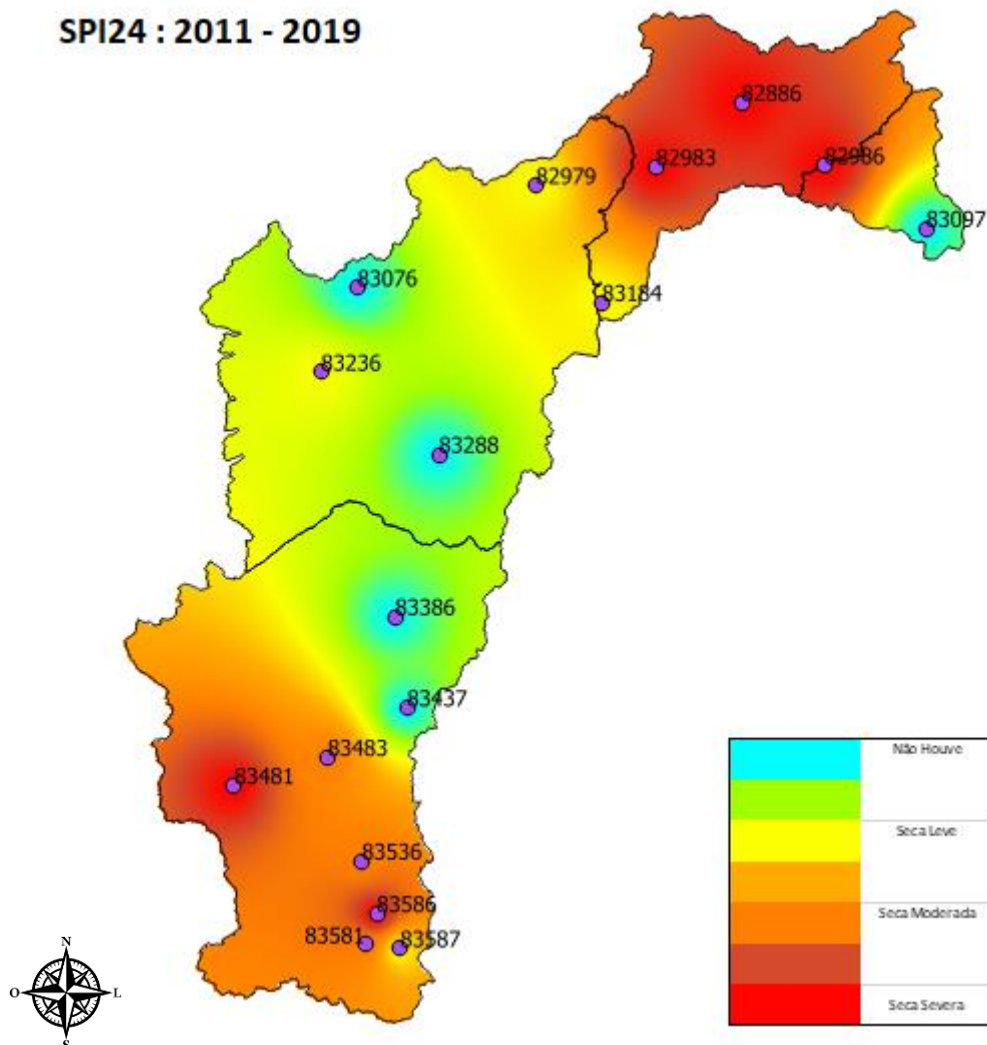
SPI24 : 2001 - 2010



Fonte: Autor, 2023.

No SPI24 referente a última década em análise (Figura 23), entre os anos de 2010 a 2019 a seca ocorrente no submédio São Francisco é enfatizada, especificamente na região dos estados de Pernambuco e Bahia.

Figura 23 - Mapa SPI24: 2011 - 2019



Fonte: Autor, 2023.

Na análise do SPI24 verifica-se indicação das secas de longo prazo de intensidade de moderadas a severas nas regiões do alto, médio e submédio São Francisco na primeira década em análise. De forma semelhante esta análise se repete para a segunda década, com a intensificação da seca nas regiões do baixo, médio e alto São Francisco. Em como a análise que mostra a suavização do fenômeno da seca nas quartas e quintas décadas e um retorno de incidência do fenômeno na sexta década.

Estudos como o de Paredes-Trejo (2021) também mostram a ocorrência do fenômeno da seca nas últimas décadas. Para o autor ao longo da extensão da bacia os eventos de seca têm aumentado, ligados a sistemas climáticos distintos modulados pelas condições EL Niño – Oscilação SUL (ENSO), anomalias da temperatura da superfície do mar (SST) no atlântico tropical, Oscilação Decadal do Pacífico que implicam em complicações nos setores agrícolas e hidrelétrico. Ainda segundo o autor em seu estudo, as secas que ocorreram entre os anos de 1980 a 2015 coincidiram com o fenômeno El-Niño e Anomalias no Atlântico Tropical. (PAREDES-TREJO, 2021).

Gurjão (2012) também destaca em seu trabalho a relação das secas e da variabilidade no volume de chuvas na região semi-árida na Bacia do Rio São Francisco com o El-Niño. Ainda destaca que sistemas atmosféricos de escala sinótica como os vórtices ciclônicos de altos níveis podem alterar substancialmente o impacto deste fenômeno, favorecendo ou inibindo o desenvolvimento de sistemas precipitantes intensos (GURJÃO, 2012).

De acordo com Silva (2005) os fenômenos El-Niño e La Niña interferem sensivelmente no clima da região, proporcionando períodos de secas e períodos úmidos com frequência irregular (SILVA,2005).

Quanto às questões climáticas das regiões da bacia destaca-se que a região do Alto São Francisco tem um clima tropical semi-úmido e temperado em alguns locais, a do médio São Francisco tropical semi-árido com chuvas no verão, a do submédio tipicamente semi-árido, e a do baixo tropical semi-úmido. A pluviosidade na extensão territorial da bacia apresenta média anual de 1.036 mm, sendo os mais altos valores de precipitação da ordem de 1.400 mm, ocorrentes nas nascentes do rio e, os mais baixos, cerca de 350 mm, entre Santo Sé e Paulo Afonso, na Bahia. O trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% da precipitação anual, enquanto o mais seco é de junho a agosto (CBHSF).

4.5 Análises de Padrões Pontuais de SPI - Duração, Severidade e Frequência

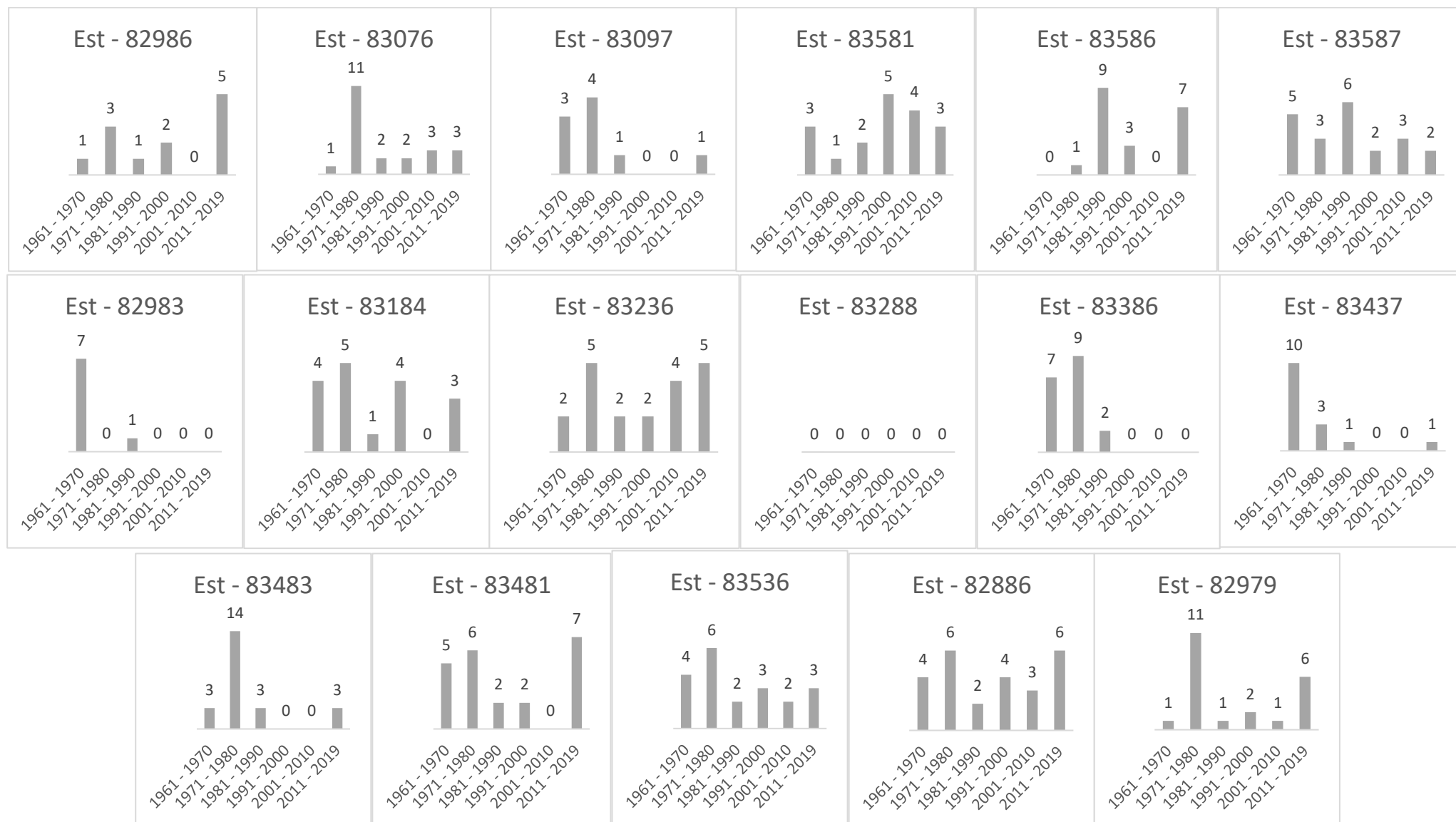
4.5.1 Duração, Severidade e Frequência – SPI3

4.5.1.1 Frequência SPI3

Ao analisar os gráficos de frequência referentes ao SPI3 (Gráfico 2), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de frequência, infere-se que na primeira década, entre os anos de 1961 a 1970 as estações que tiveram maiores números de eventos de seca foram as estações 82983 (Submédio) e 83437 (Alto). Na segunda década, entre os anos de 1971 a 1980 foram as estações 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83386 (Alto), 83483 (Alto), 83536 (Alto), 82886 (Submédio) e 82979 (Médio). Na terceira década, entre os anos de 1981 a 1990 foram as estações 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta década, entre os anos de 1991 a 2000 foi a estação 83581 (Alto). Na quinta década entre os anos de 2001 a 2010 teve incidência considerável na estação 83236 (Médio). Na sexta década, entre os anos de 2011 a 2019 foram as estações 82986 (Submédio), 83586 (Alto), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83481 (Alto), 82886 (Submédio) e 82979 (Médio).

Desta forma, segundo a análise da frequência sabe-se que as décadas com maiores números de eventos de seca foram a segunda e sexta década, de 1971 a 1980 e de 2011 a 2019. Sendo as regiões mais atingidas consideravelmente na segunda década a região do Alto, posteriormente médio, submédio e por fim o baixo. Na sexta década as regiões mais atingidas iniciam-se pelo submédio, posteriormente pelo alto e médio São Francisco.

Gráfico 2 - Frequência SPI3



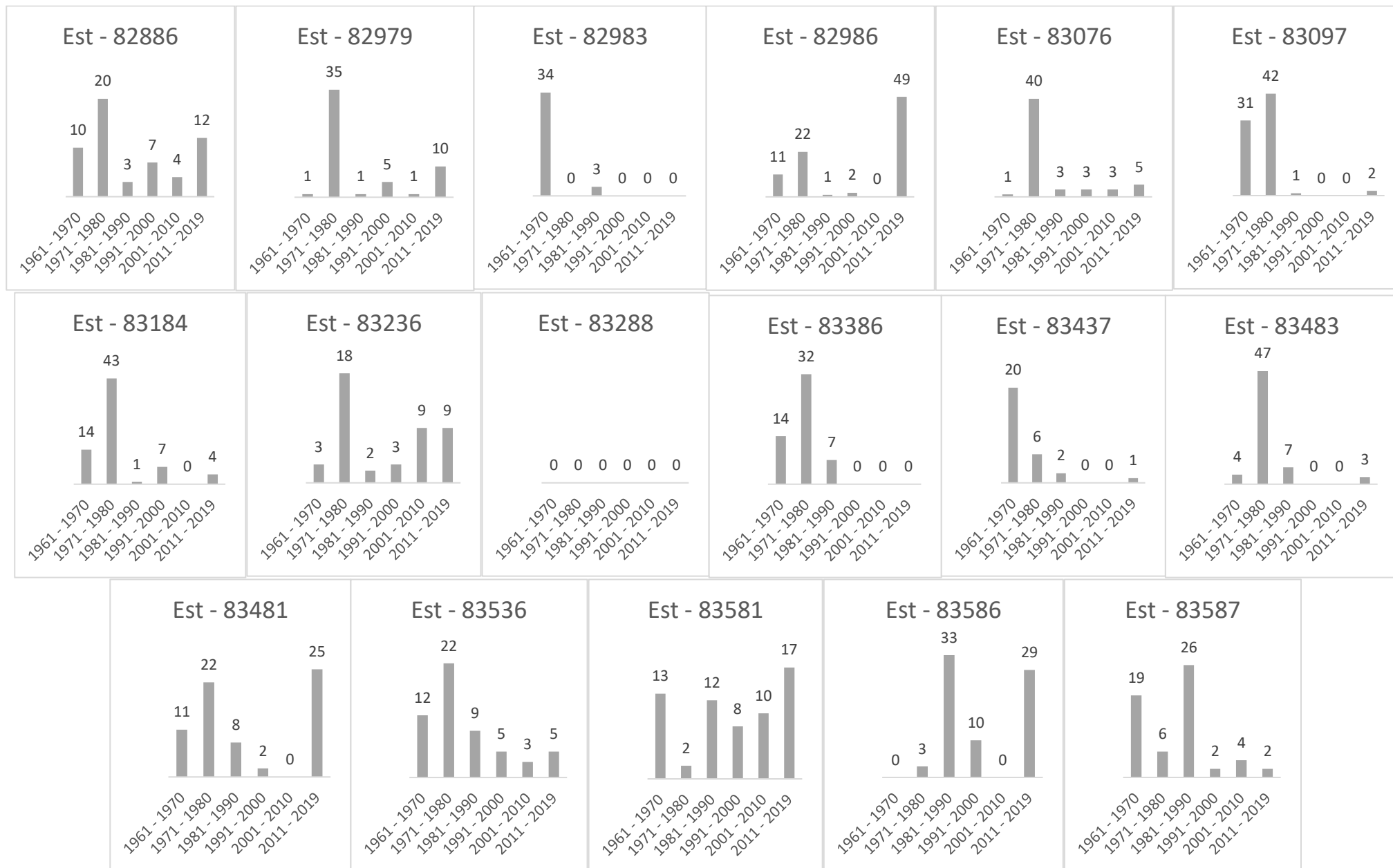
Fonte: Autor, 2023.

4.5.1.2 Duração SPI3

Quanto a variável duração (Gráfico 3), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de duração, infere-se que na primeira década as estações com secas mais duradouras foram as estações 82983 (Submédio), 83097 (Baixo) e 83437 (Alto). Na segunda década foram as estações 82886 (submédio), 82979 (Médio), 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83386 (Alto), 83483 (Alto) e 83536 (Alto). Na terceira década foram as estações 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta década não houve estações de grande representatividade com longas durações se comparado as demais décadas. Na quinta década foram as estações 83236 (Médio) e 83581 (Alto). Na sexta década foram as estações 82986 (Submédio), 83481 (Alto), 83581 (Alto) e 83586 (Alto).

Observa-se que a segunda e sexta década foram períodos com secas mais duradouras, com um número maior de meses de duração da seca. Sendo na segunda década as regiões mais críticas a do Alto, posteriormente Médio, Submédio e por fim o Baixo São Francisco, e em relação a sexta década foram as regiões do Alto e Submédio.

Gráfico 3 - Duração SPI3



4.5.1.3 Severidade SPI3

A severidade da seca é o valor absoluto da área integral entre a linha SPI e o eixo horizontal (SPI=0) do início ao fim do mês da seca. A mesma não pode ser confundida com a intensidade, que normalmente é referida ao menor valor de SPI do evento de seca. A Tabela 4 mostra os valores da severidade da seca obtidos para cada década em análise do SPI3.

Tabela 4 - Severidade SPI3

Décadas	Severidade			
	Estações			
	82886	82979	82983	82986
1961 - 1970	-18.02	-2.06	-38.71	-13.03
1971 - 1980	-40.02	-55.22	0.00	-26.93
1981 - 1990	-5.26	-2.42	-4.21	-2.27
1991 - 2000	-14.69	-8.55	0.00	-4.20
2001 - 2010	-9.30	-2.40	0.00	0.00
2011 - 2019	-25.60	-19.13	0.00	-58.32
	83076	83097	83184	83236
1961 - 1970	-2.44	-39.67	-20.99	-5.51
1971 - 1980	-60.46	-52.98	-62.98	-33.27
1981 - 1990	-6.39	-2.05	-2.27	-5.49
1991 - 2000	-5.89	0.00	-12.20	-5.80
2001 - 2010	-7.23	0.00	0.00	-18.85
2011 - 2019	-9.26	-3.20	-8.23	-18.47
	83288	83386	83437	83483
1961 - 1970	0	-21.89	-28.23	-8.05
1971 - 1980	0	-41.29	-8.76	-63.01
1981 - 1990	0	-8.65	-3.11	-10.37
1991 - 2000	0	0.00	0.00	0.00
2001 - 2010	0	0.00	0.00	0.00
2011 - 2019	0	0.00	-2.15	-6.67
	83481	83536	83581	83586
1961 - 1970	-16.77	-20.55	-20.20	0
1971 - 1980	-32.41	-39.86	-5.22	-4.73
1981 - 1990	-10.86	-14.97	-20.71	-44.47
1991 - 2000	-4.81	-8.29	-12.48	-13.43
2001 - 2010	0.00	-5.55	-18.61	0
2011 - 2019	-36.06	-8.81	-29.56	-37.61
		83587		
1961 - 1970		-34.28		
1971 - 1980		-13.34		
1981 - 1990		-46.97		
1991 - 2000		-5.66		
2001 - 2010		-8.67		
2011 - 2019		-5.12		

Fonte: Autor, 2023.

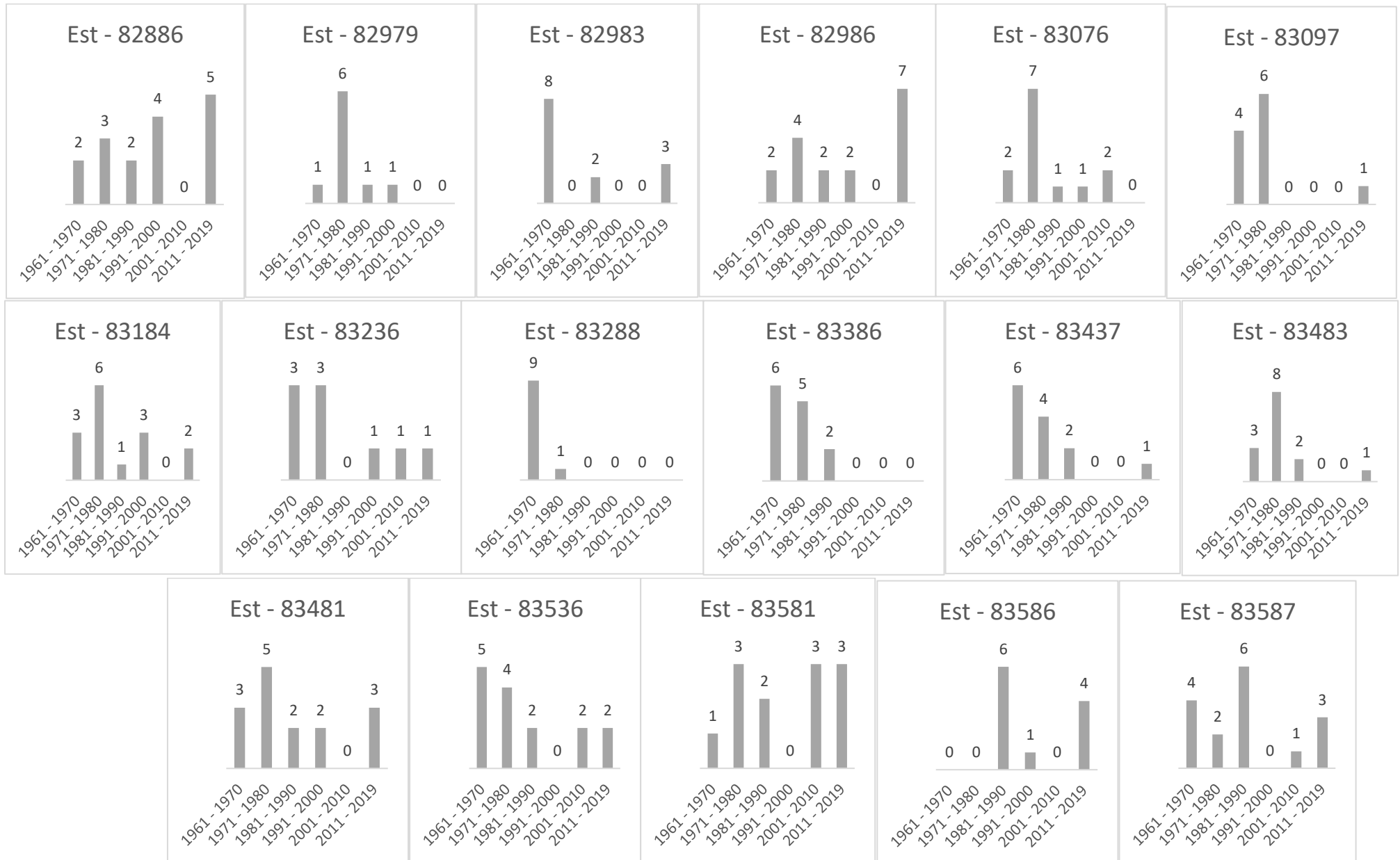
4.5.2 Frequência, Duração e Severidade – SPI12

4.5.2.1 Frequência SPI12

Ao analisar os gráficos referentes ao SPI12 (Gráfico 4), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de frequência, observa-se que na primeira década, entre os anos de 1961 a 1970 as estações que tiveram maiores números de eventos de seca, desta vez secas de longo prazo, foram as estações 82983 (Submédio), 83236 (Médio), 83288 (Médio), 83386 (Alto), 83437 (Alto) e 83536 (Alto). Na segunda década entre os anos de 1971 a 1980 foram as estações 82979 (Médio), 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83483 (Alto), 83481 (Alto) e 83581 (Alto). Na terceira década entre os anos de 1981 a 1990 foram as estações 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta década entre os anos de 1991 a 2000 não houve estações com grande representatividade de eventos se comparado as demais décadas. Na quinta década, entre os anos de 2001 a 2010 foi a estação 83581 (Alto). Na sexta década entre os anos de 2001 a 2019 foram as estações 82886 (Submédio), 82986 (Submédio) e 83581 (Alto).

Portanto referente a análise do SPI12 verifica-se que as décadas com maiores números de eventos de seca de longa duração foram, de forma ordenada, a segunda, primeira e sexta década. A segunda década observa-se como a mais agravante, de forma decrescente, principalmente nas regiões do Médio, Alto, Submédio e baixo São Francisco. Na primeira década foram as regiões do Alto e posteriormente Médio e Submédio. Na última década, as regiões foram a do Submédio e posteriormente a do Alto.

Gráfico 4 - Frequência SPI12



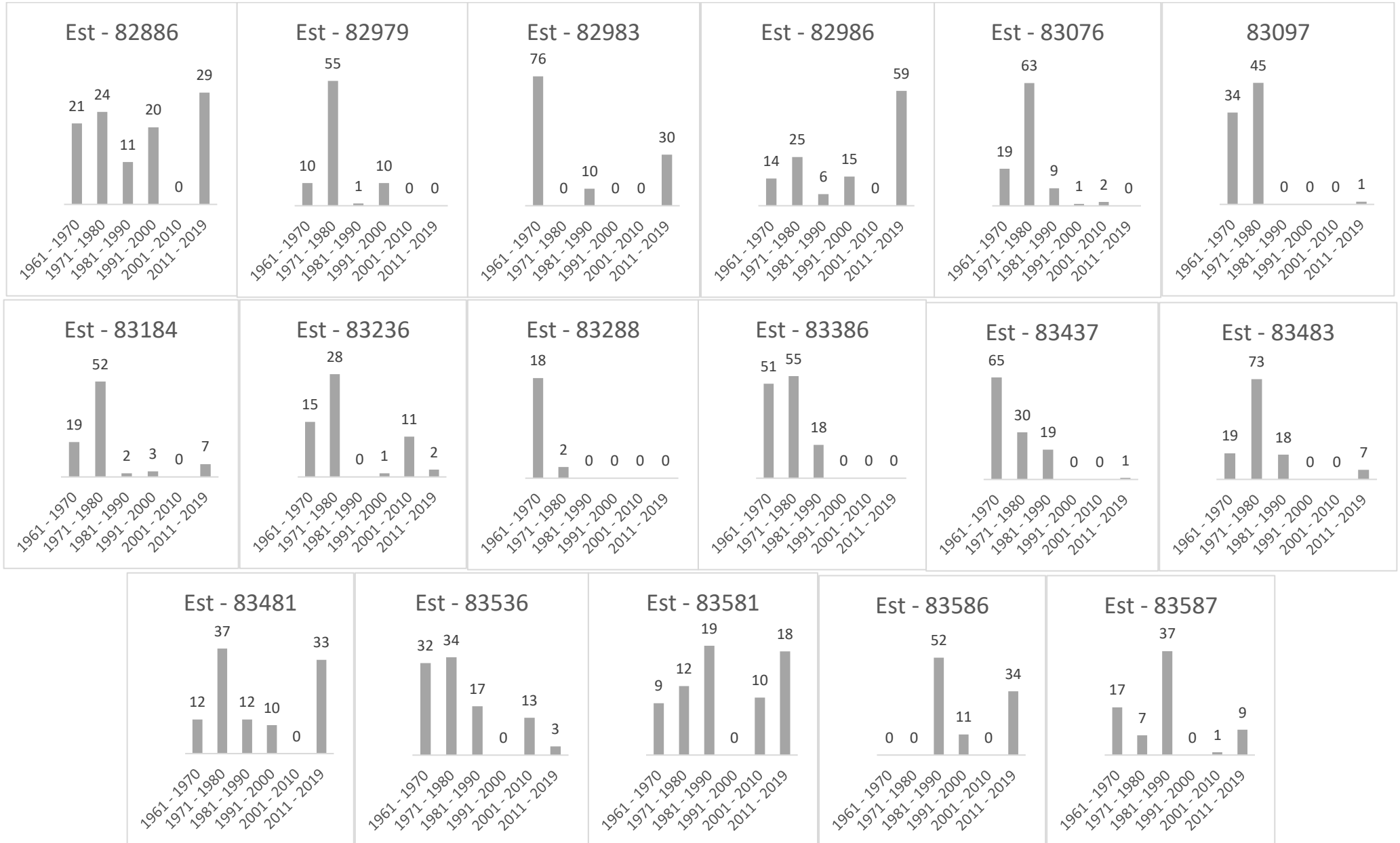
Fonte: Autor, 2023.

4.5.2.2 Duração SPI12

Quanto a variável duração (Gráfico 5), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de duração, verifica-se que na primeira década as estações com maiores números de meses com eventos de secas, ou seja, secas mais duradouras foram as estações 82983 (Submédio), 83288 (Médio) e 83437 (Alto). Na segunda década foram as estações 82886 (Submédio), 82979 (Médio), 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83386 (Alto), 83483 (Alto), 83481 (Alto) e 83536 (Alto). Na terceira década foram as estações 83581 (Alto), 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta e quinta década não houve estações com representatividade em relação as demais décadas. Na sexta década foram as estações 82886 (Submédio) e 82986 (Submédio).

Desta forma, para o SPI12 as décadas com secas mais duradouras no quesito quantidade de meses de duração dos eventos foi primeiramente a segunda década, posteriormente a primeira e terceira, e por fim a sexta década. De forma decrescente, na segunda década as regiões mais críticas foram a do Alto, Médio, Submédio e Baixo. Na primeira década foram a do Alto, Médio e Submédio. Na Terceira década foi a região do Médio. Na sexta década foi o a do Submédio.

Gráfico 5 - Duração SPI12



Fonte: Autor, 2023.

5.2.2.3 Severidade SPI 12

A Tabela 5 mostra os valores de severidade de seca obtidos para a análise de longa duração do SPI12.

Tabela 5 - Severidade SPI12

Décadas	Severidade			
	Estações			
	82886	82979	82983	82986
1961 - 1970	-32.36	-14.58	-101.35	-20.17
1971 - 1980	-73.35	-91.05	0.00	-35.55
1981 - 1990	-17.00	-2.22	-14.41	-8.87
1991 - 2000	-35.22	-14.39	0.00	-18.81
2001 - 2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2011 - 2019	-52.34	0.00	-37.23	-81.85
	83076	83097	83184	83236
1961 - 1970	-31.26	-51.84	-30.24	-29.82
1971 - 1980	-109.13	-68.65	-89.44	-57.64
1981 - 1990	-15.19	0.00	-3.21	0.00
1991 - 2000	0.00	0.00	-7.54	-2.59
2001 - 2010	-4.65	0.00	0.00	-23.87
2011 - 2019	0.00	-2.05	-10.36	-3.47
	83288	83386	83437	83483
1961 - 1970	-27.69	-67.55	-91.16	-31.66
1971 - 1980	-3.08	-77.24	-41.61	-115.12
1981 - 1990	0.00	-24.19	-26.00	-25.77
1991 - 2000	0.00	0.00	0.00	0.00
2001 - 2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2011 - 2019	0.00	0.00	-2.18	-9.56
	83481	83536	83581	83586
1961 - 1970	-22.57	-45.80	-18.14	0
1971 - 1980	-76.41	-72.23	-15.67	0
1981 - 1990	-22.65	-33.21	-44.29	-86.13
1991 - 2000	-13.81	0.00	0.00	-17.63
2001 - 2010	0.00	-21.37	-19.44	0
2011 - 2019	-68.99	-6.69	-55.78	-56.93
		83587		
1961 - 1970		-28.60		
1971 - 1980		-10.94		
1981 - 1990		-72.82		
1991 - 2000		0.00		
2001 - 2010		-2.13		
2011 - 2019		-12.80		

Fonte: Autor, 2023.

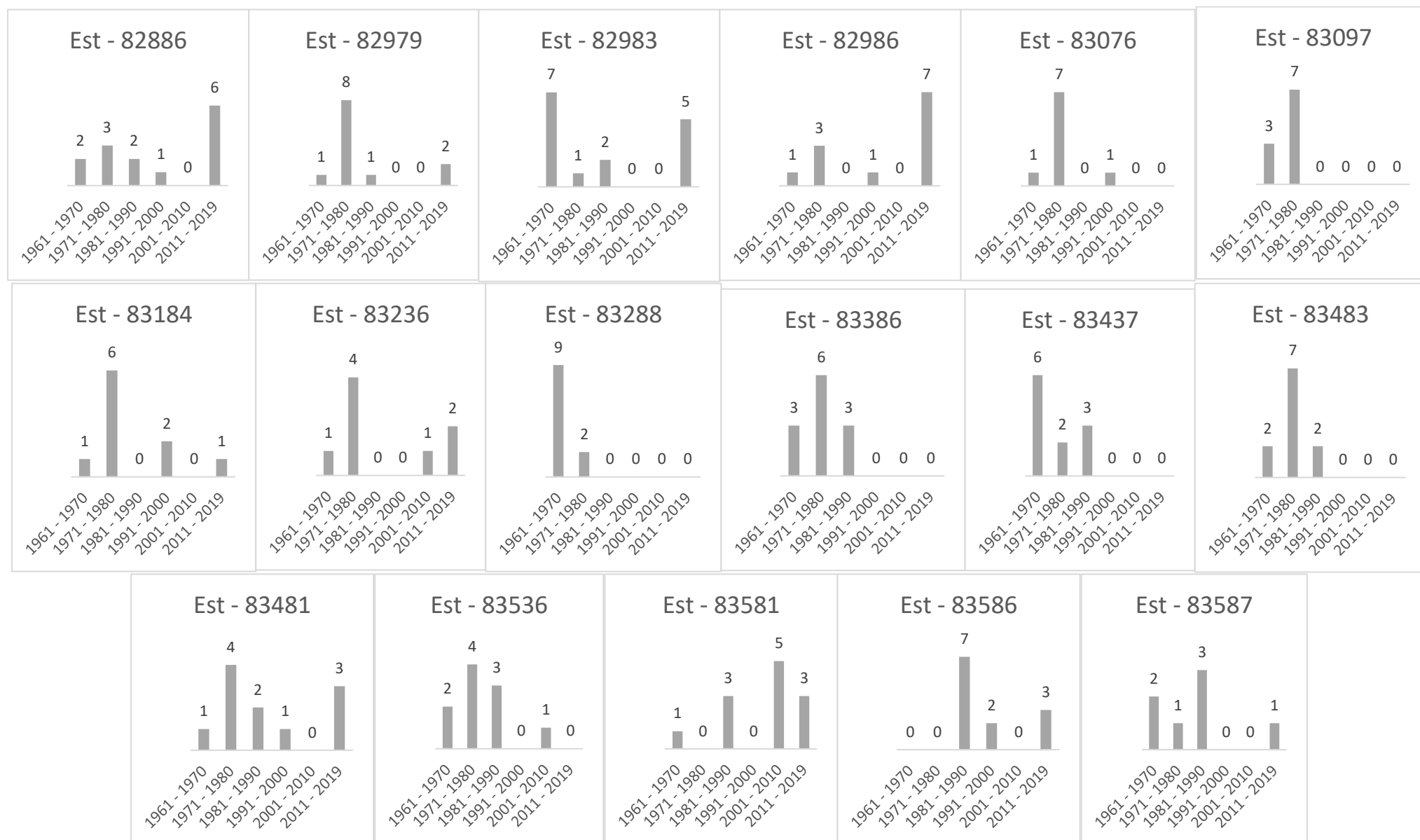
5.2.3 Frequência, Duração e Severidade – SPI24

5.2.3.1 Frequência SPI24

Ao analisar os gráficos referentes ao SPI24 (Gráfico 6), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de frequência, observa-se que na primeira década, entre os anos de 1961 a 1970 as estações que tiveram maiores números de eventos de seca de longo prazo foram as estações 82983 (Submédio), 83288 (Médio) e 83437 (Alto). Na segunda década entre os anos de 1971 a 1980 foram as estações 82979 (Médio), 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (submédio), 83236 (Médio), 83386 (Alto), 83483 (Alto), 83481 (Alto) e 83536 (Alto). Na terceira década foram as estações 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta década não houveram estações com representatividade. Na quinta década foi a estação 83581 (Alto). Na sexta década foram as estações 82886 (Submédio) e 82986 (Submédio).

Portanto para o SPI24 as décadas com maiores números de eventos foram a segunda, primeira e terceira década, de forma ordenada. Na segunda década as regiões mais atingidas foram a do Alto, Médio, Submédio e por fim a do baixo. Na primeira década foram as do Médio, Alto e por fim a do Submédio. Na terceira década foi a região do Alto.

Gráfico 6 - Frequência SPI24



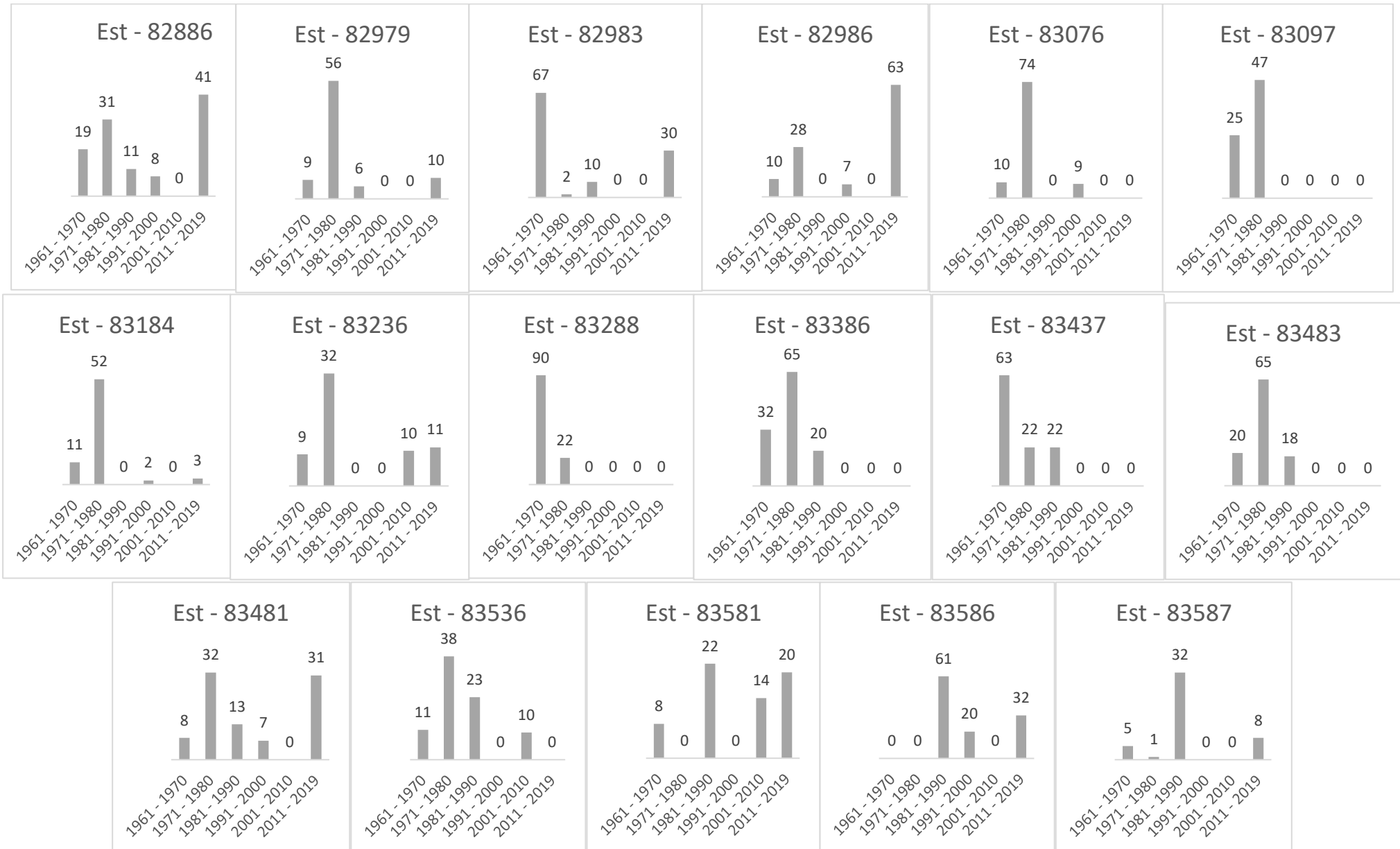
Fonte: Autor, 2023.

5.2.3.2 Duração SPI24

Quanto a variável duração (Gráfico 7), considerando que o eixo X são as décadas e o eixo Y são os números de duração, verifica-se que as estações com maiores números de meses com eventos de secas, ou seja, secas com maiores durações na primeira década foram as estações 82983 (Submédio), 83288 (Médio) e 83437 (Alto). Na segunda década foram as estações 82979 (Médio), 83076 (Médio), 83097 (Baixo), 83184 (Submédio), 83236 (Médio), 83386 (Alto), 83483 (Alto), 83481 (Alto) e 83536 (Alto). Na terceira década foram as estações 83581 (Alto), 83586 (Alto) e 83587 (Alto). Na quarta e quinta década não houveram estações com representatividade. Na sexta década foram as estações 82886 (Submédio) e 82986 (Submédio).

Portanto as décadas com maiores impactos quanto a duração na análise do SPI24, de forma decrescente, foram a segunda década, primeira, terceira e por fim sexta década. Na segunda década as regiões de maiores impactos foram a região do Alto, Médio, Submédio e Baixo. Na terceira década foi a do Alto. Na primeira foi a do Alto, Médio e Submédio. Na sexta década foi a região do Submédio.

Gráfico 7 - Duração SPI24



Fonte: Autor, 2023.

5.2.3.3 Severidade SPI24

A Tabela 6 mostra os valores de severidade da seca obtidos para o SPI24 ao longo das 6 décadas.

Tabela 6 - Severidade SPI24

Décadas	Severidade			
	Estações			
	82886	82979	82983	82986
1961 - 1970	-27.71	-12.41	-104.78	-16.45
1971 - 1980	-81.67	-115.13	-4.10	-47.61
1981 - 1990	-18.22	-7.59	-14.75	0.00
1991 - 2000	-12.42	0.00	0.00	-10.94
2001 - 2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2011 - 2019	-68.43	-17.51	-42.44	-104.27
	83076	83097	83184	83236
1961 - 1970	-19.56	-50.03	-25.77	-18.83
1971 - 1980	-155.36	-88.44	-139.60	-124.92
1981 - 1990	0.00	0	0.00	0.00
1991 - 2000	-15.01	0	-4.83	0.00
2001 - 2010	0.00	0	0.00	-23.80
2011 - 2019	0.00	0	-4.12	-24.13
	83288	83386	83437	83483
1961 - 1970	-109.19	-45.71	-101.39	-28.19
1971 - 1980	-26.45	-99.09	-35.42	-112.02
1981 - 1990	0	-29.22	-34.10	-26.12
1991 - 2000	0	0	0	0
2001 - 2010	0	0	0	0
2011 - 2019	0	0	0	0
	83481	83536	83581	83586
1961 - 1970	-9.45	-17.61	-13.19	0.00
1971 - 1980	-110.10	-157.38	0.00	0.00
1981 - 1990	-21.90	-49.19	-58.65	-107.50
1991 - 2000	-9.00	0.00	0.00	-29.76
2001 - 2010	0.00	-15.35	-23.36	0.00
2011 - 2019	-125.32	0	-60.03	-65.60
		83587		
1961 - 1970		-8.15		
1971 - 1980		-2.20		
1981 - 1990		-155.06		
1991 - 2000		0.00		
2001 - 2010		0.00		
2011 - 2019		-10.29		

Fonte: Autor, 2023.

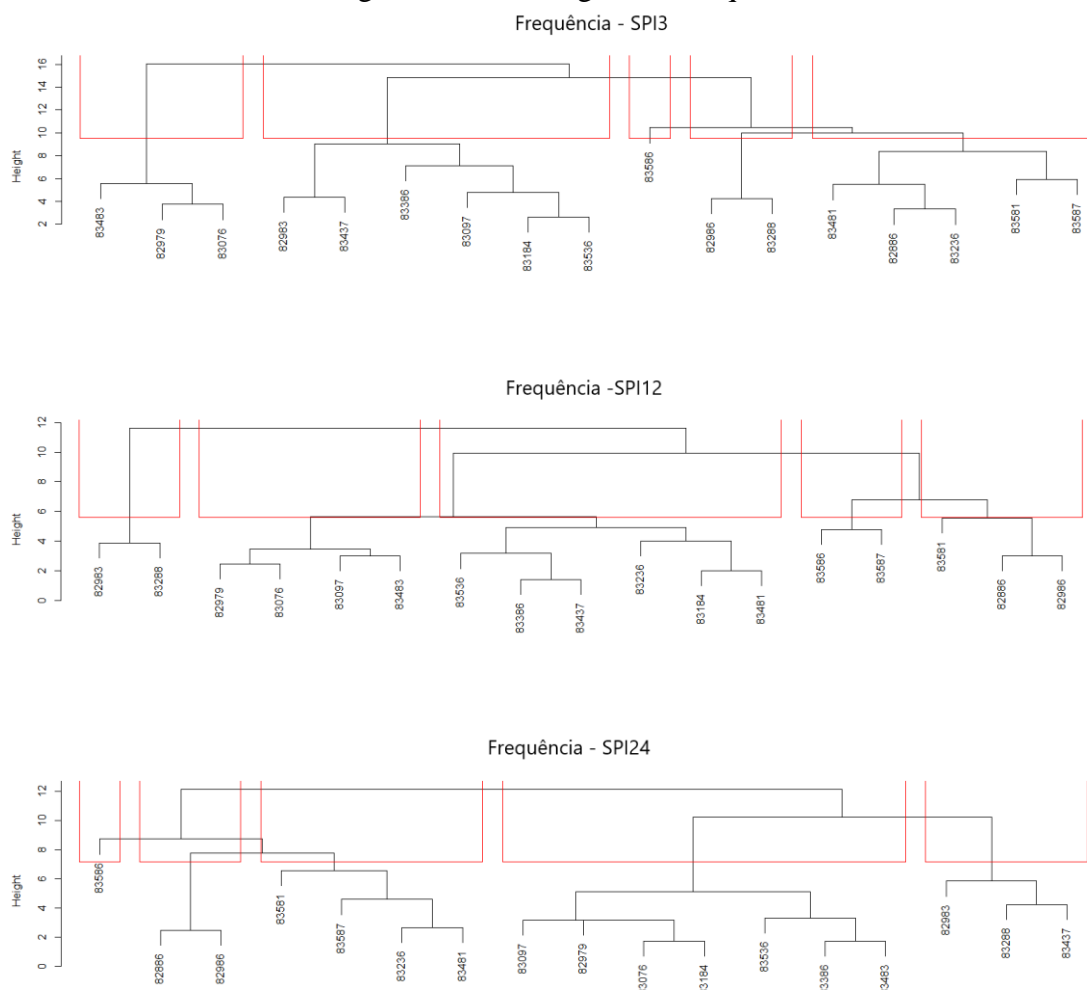
5.3 Análise de Cluster

5.3.1 Dendrogramas - SPI3/SPI12/SPI24

Para a análise da frequência, duração e severidade obtidos para o SPI3, SPI12 e SPI24 foram criados os dendrogramas. Foi traçada uma linha de formação de grupos, gerando 5 grupos distintos de estações que apresentam características estatísticas semelhantes quanto as variáveis da seca dentro dos grupos. Dentro de cada grupo para as variáveis da seca, é possível visualizar as distâncias e níveis de similaridade entre as estações.

Através dos dendrogramas da frequência para o SPI3, SPI12 e SPI24 é possível visualizar as estações em cada grupo que possuem números de eventos de secas semelhantes, e os grupos de estações que possuem frequência de eventos de seca distintos.

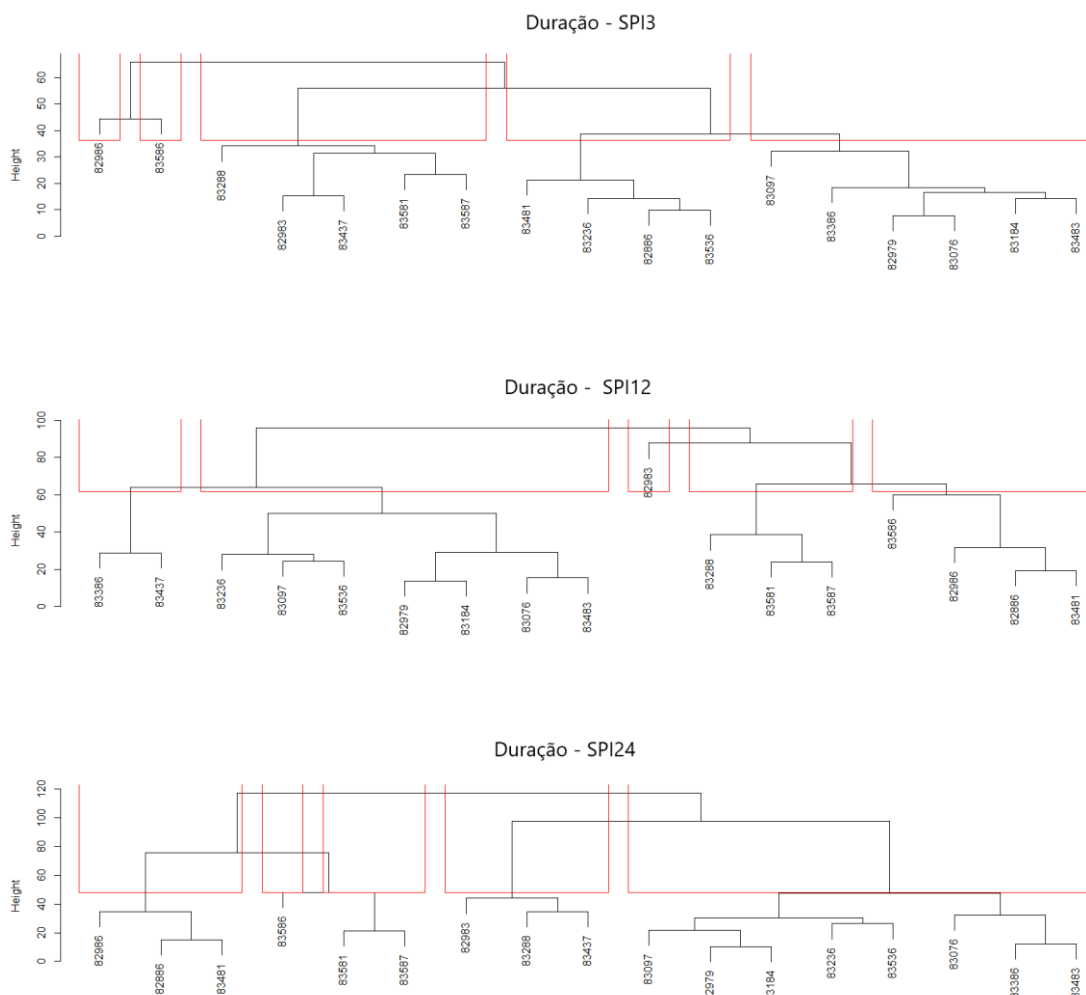
Figura 24 - Dendrogramas Frequência



Fonte: Autor, 2023.

Através dos dendrogramas da duração para o SPI3, SPI12 e SPI24 é possível visualizar as estações em cada grupo que possuem duração dos eventos de seca semelhantes, e os grupos de estações que possuem duração de eventos de seca distintos.

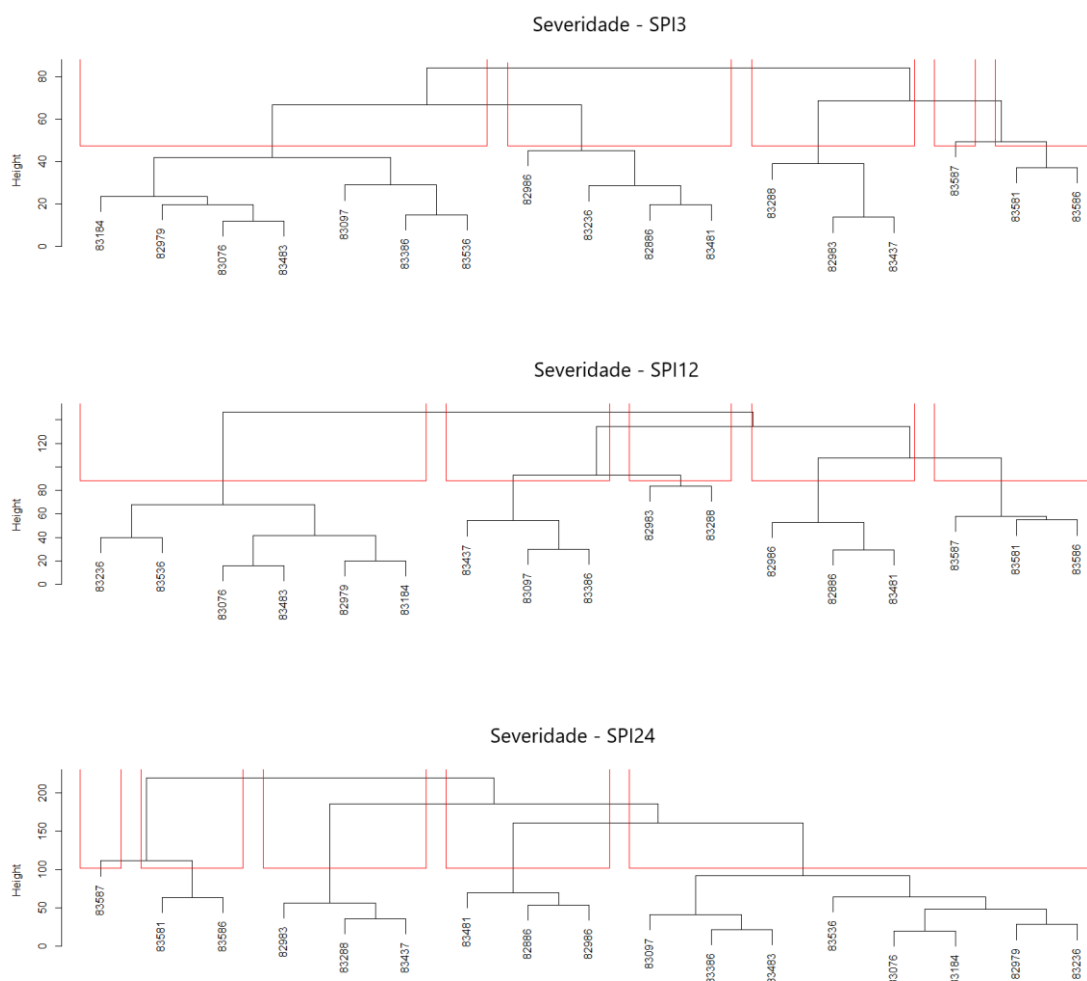
Figura 25 - Dendrogramas Duração



Fonte: Autor, 2023.

Através dos dendrogramas da severidade para o SPI3, SPI12 e SPI24 é possível visualizar as estações em cada grupo que possuem valores de severidade de seca semelhantes, e os grupos de estações que possuem severidade de seca distintos.

Figura 26 - Dendrogramas Severidade



Fonte: Autor, 2023.

Ao associarmos os resultados obtidos através dos dendrogramas (Figuras 24, 25 e 26) com os resultados obtidos nos Gráficos de frequência e duração, e tabelas de severidade, expostos na seção de resultados (4.5 Análise local – Duração, Severidade e Frequência). Observa-se que as estações foram agrupadas entre si por similaridade, ou seja, para a variável frequência as estações foram agrupadas em 5 grandes grupos, em que em cada grupo as estações que o compõe tem a mesma faixa de números de eventos de seca, enquanto que esse número varia de um grupo para outro, porém de forma suave devido ao método utilizado, o de ward. O mesmo ocorre para as demais variáveis, para o quesito duração, as estações também foram agrupadas entre si de acordo com o tempo de duração dos eventos de seca, sendo similares e próximos entre si, mas com discreta distinção de um grupo para o outro. De forma análoga ocorre para a variável severidade.

6 CONCLUSÃO

Através das análises realizadas por meio do cálculo do SPI3, SPI12 e SPI24, dos mapas de estiagem, gráficos de frequência e duração, valores de severidade e a análise de cluster para as variáveis da seca (Frequência, duração e severidade), com a utilização do método de interpolação do Inverso da distância Ponderada (IDW). Para o SPI3 concluiu-se que as secas de curta duração e com impacto nas variações de precipitação e umidade do solo, de forma decrescente, ocorreram nas regiões do Alto São Francisco, posteriormente na do Submédio, passando para o Médio, e por fim para a região do Baixo São Francisco. As décadas mais críticas destas secas de curto prazo foram a primeira, segunda e sexta década, mostrando grande suavização do fenômeno na quinta década. Analisa-se também que foi na segunda e sexta década que apresentaram maior intensificação das variáveis frequência e duração.

Na análise do SPI12 e SPI24 a incidência de secas hidrológicas, secas de longo prazo ocorreram ao longo da primeira, segunda e sexta décadas. Ao longo dessas décadas foi intensificado a ocorrência da seca de forma duradoura nas regiões do Alto, Médio e Submédio São Francisco. Quanto as variáveis duração e frequência, os valores mais elevados para o SPI12 e SPI24 migraram entre a primeira, segunda, terceira e sexta décadas.

Embora a região do Alto São Francisco tenha valores elevados de precipitação acumulada, ela se destacou no SPI3, indicando grande ocorrência de secas de curto prazo nessa região. Destaca-se também que nas regiões do Submédio e Médio São Francisco, analisadas através do SPI12 e SPI24, as secas de longa duração são predominantes. Nestas regiões as secas mais recorrentes possuem duração elevada. Embora a região do Alto São Francisco tenha se destacado quanto ao SPI3, na análise do SPI12 e SPI24 mostra-se a ocorrência de secas duradouras também nesta região, porém com intensidade menor que as do SPI3, secas de curto prazo.

Trabalhos de autores diversos fundamentam e afirmam a ocorrência e o aumento das secas em toda a extensão territorial da Bacia do Rio São Francisco, principalmente eventos de seca moderados e severos. Os eventos de seca na BHSF estão ligados a eventos climáticos. Em anos de ocorrência de El-Niño há um aumento de precipitação nas regiões do Alto e Médio São Francisco, em contrapartida uma redução no baixo São Francisco. Quando há ocorrência de La-Niña estes aumentos e reduções de precipitação ocorrem de

forma contrária (GALVÍNCIO; SOUSA, 2002; SILVA; GALVÍNCIO; NÓBREGA, 2009)

De modo geral nos anos de ocorrência de El-Niño há seca na região semi-árida do Nordeste do Brasil e região nordeste da bacia, ou seja, no Baixo São Francisco. Enquanto que em anos de La-Niña há eventos de seca nas regiões do Alto e Médio São Francisco. Verifica-se que em anos de El-Niño a Bacia do Rio São Francisco produz mais água do que em anos de La-Niña (GALVÍNCIO; SOUSA, 2002; SILVA; GALVÍNCIO; NÓBREGA, 2011).

Desta forma, através dos mapas de ocorrência dos eventos da seca verifica-se que as secas incidentes na bacia em estudo ocorrem de maneira predominante nas regiões do Alto, Médio e Submédio São Francisco, com destaque para a região do Alto, por ter sido bastante indicada. Através da Análise de Cluster, por meio dos dendrogramas visualiza-se que as estações pluviométricas que possuem características semelhantes não necessariamente pertencem à mesma região da BHSF. Através dos grupos formados é possível verificar agrupamentos entre estações pluviométricas que ficam localizadas em regiões distintas dentro da bacia.

Como sugestões para trabalhos futuros se tem a utilização dos dados MERGE, do banco de dados do CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Este produto MERGE é uma nova técnica que combina as estimativas de precipitação do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) com os dados das observações de superfície (ROZANTE *et al.*, 2010). Os dados possuem um formato binário e podem ser obtidos para toda a extensão da Bacia do Rio São Francisco. A fim de se comparar os resultados entre essas bases de dados distintas.

REFERÊNCIAS

ABBASIAN, M. S.; NAJAFI, M. R.; ABRISHAMCHI, A. Increasing risk of meteorological drought in the Lake Urmia basin under climate change: Introducing the precipitation–temperature deciles index. **Journal of Hydrology**. v. 592, 2021.

ABIODUN, B. J. Future projection of droughts over major river basins in Southern Africa at specific global warming levels. p. 1785–1799, 2019.

ABOUABDILLAH, A. *et al.* Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. **Soil Use and Management**. v. 30, n. 4, p. 539–549, 2014.

ABUBAKAR, H. B.; NEWETE, S. W.; SCHOLE, M. C. Drought characterization and trend detection using the reconnaissance drought index for setsoto municipality of the free state province of south africa and the impact on maize yield. **Water (Switzerland)**. v. 12, n. 11, p. 1–16, 2020.

ADARSH, S.; REDDY, M. J. Evaluation of trends and predictability of short-term droughts in three meteorological subdivisions of India using multivariate EMD-based hybrid modelling. **Hydrological Processes**. v. 33, p. 130–143, 2019.

ADNAN, R. M. *et al.* Improving Drought Modeling Using Hybrid Random Vector Functional Link Methods. **Water**, v. 13, 2021.

AGHAKOUCHAK, A. *et al.* Reviews of Geophysics Remote sensing of drought : Progress , challenges. p. 452–480, 2015.

AL-BAKRI, J. T. *et al.* Modelling desertification risk in the north-west of Jordan using geospatial and remote sensing techniques. v. 5705, 2016.

ALVAREZ-GARRETON, C. *et al.* Progressive water deficits during multi-year droughts in central-south Chile. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**. p. 1–23, 2020.

AMRIT, K.; MISHRA, S. K.; PANDEY, R. P. Tennant Concept Coupled with Standardized Precipitation Index for Environmental Flow Prediction from Rainfall. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 23, n. 2, p. 05017031, 2018.

ANDAWAYANTI, U.; DARA LUFIRA, R.; DYAH AWALITA, R. Mapping of drought distribution using the deciles index in Rokan Watershed, Province of Riau, Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 437, n. 1, 2020.

ARAUJO, M. V. O.; CELESTE, A. B. Rescaled range analysis of streamflow records in the São Francisco River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 135, n. 1–2, p. 249–260, 2019.

ASKARIMARNANI, S. S.; KIEM, A. S.; TWOMEY, C. R. Comparing the performance of drought indicators in Australia from 1900 to 2018. v. 41, p. 912–934, 2021.

AWAN, J. A.; BAE, D. H. Features and interdecadal variability of droughts in the homogeneous rainfall zones over the East Asian monsoon region. **International Journal of Climatology**. v. 36, n. 4, p. 1943–1953, 2016.

BASIN, H. R. Drought Trends and the Extreme Drought Frequency and Characteristics under Climate Change Based on SPI and HI in the Upper and Middle Reaches of the. 2020.

BASTOS, C. A. B.; OLIVEIRA, J. L. O sertão nordestino e a matemática da fome. **Escola Digital** [(s.d.)].

BHALME, H.N.; MOOLEY, D.A. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. **Mon. Weather Ver.** v. 108, p. 1197–1211, 1980.

BEZERRA, B. G. *et al.* Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 135, n. 1–2, p. 565–576, 2019.

BLAUHUT, V.; GUDMUNDSSON, L.; STAHL, K. Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts. **Environmental Research Letter**. v. 10, 2015.

BOHN, L. *et al.* Desertification susceptibility over Rio de Janeiro, Brazil, based on aridity

indices and geoprocessing. **International Journal of Climatology**. v. 41, n. S1, p. E2600–E2614, 2021.

CAMPOS, J. N. B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: A Historical Perspective. **Environmental Management**. v. 55, n. 5, p. 1052–1063, 2015.

CARRARA, A. A.; ZAIDAN, R. T.; PAULA, L. P. De. Geoprocessamento aplicado à história agrária: o vínculo da Jaguará. **Revista de História**. n. 177, p. 01, 2018.

CBHSF. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – A Bacia**. Disponível em:< <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>>. Acesso em fevereiro 2021.

CHOI, J. W. *et al.* The assessment of droughts in Northern China and Mongolian areas using PDSI and relevant large-scale environments. **International Journal of Climatology**. v. 36, n. 9, p. 3259–3269, 2016.

COSTA, J. A.; RODRIGUES, G. P. Space-Time Distribution of Rainfall Anomaly Index (Rai) for the Salgado Basin, Ceará State - Brazil. **Ciência e Natura**. v. 39, n. 3, p. 627, 2017.

CPTEC/INPE. **Produto MERGE**. Disponível em:< <http://ftp.cptec.inpe.br/mode-los/io/produtos/MERGE/>>. Acesso em fev. 2021.

DAS, P. K. *et al.* Trends and behaviour of meteorological drought (1901-2008) over Indian region using standardized precipitation-evapotranspiration index. **International Journal of Climatology**. v. 36, n. 2, p. 909–916, 2016.

DIANI, K. *et al.* Evaluation of meteorological drought using the Standardized Precipitation Index (SPI) in the High Ziz River basin, Morocco. **Limnological Review**. v. 19, n. 3, p. 125–135, 2019.

EMBRAPA. Análise de Cluster não supervisionado em R: Agrupamento hierárquico. Campinas, 43 p., ISSN 0103-7811, Nov. 2020.

FARO, G. T. C. *et al.* Utilização de Índices para Avaliação de Estresse Hídrico em Sistemas de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 24, p. 1–13, 2019.

FENG, Y. *et al.* Drought Forecasting using SPI and EDI under RCP-8.5 Climate Change

Scenarios for Langat River Basin , Malaysia. **Procedia Engineering**. v. 154, p. 710–717, 2016.

FOROOTAN, E. *et al.* Understanding the global hydrological droughts of 2003–2016 and their relationships with teleconnections. **Science of the Total Environment**. v. 650, p. 2587–2604, 2019.

FRAGOSO, M.; CARRAÇA, M. Da G.; ALCOFORADO, M. J. Droughts in Portugal in the 18th century: A study based on newly found documentary data. **International Journal of Climatology**. v. 38, n. 15, p. 5522–5541, 2018.

GALVÍNCIO, J. D.; SOUSA, F. A. S. Relação entre o fenômeno El Niño e os Totais Mensais Precipitados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 7, p. 113-119, 2002.

GAO, Xuerui *et al.* Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. **Science of the Total Environment**. v. 595, p. 191–200, 2017.

GARDIMAN JUNIOR, B. S. *et al.* Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluuvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Ambiência Guarapuava**. v. 8, p. 61-71, 2012.

GE, Y.; APURV, T.; CAI, X. Spatial and temporal patterns of drought in the Continental U.S. during the past century. **Geophysical Research Letters**. v. 43, n. 12, p. 6294–6303, 2016.

GIBBS, W.J.; MAHER, J.V. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology Bull. 48. Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia, 1967.

GOMMES, R.; PETRASSI, F. Rainfall Variability and Drought in Sub-Saharan Africa Since 1960. Agro-meteorology Series Working Paper 9, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 1994.

GONDIM, G. *et al.* DROUGHT MONITORING FOR SOUTH AMERICA USING REMOTE. p. 1–8, 2017.

GROSS, J. A.; CASSOL, R. Rainfall anomaly index in the State of Rio Grande do Sul.

Ambiência. v. 11, n. 3, p. 529–543, 2015.

GUERREIRO, M. J.; LAJINHA, T.; ABREU, I. Flood Analysis with the Standardized Precipitation Index (SPI). **Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia. Porto** v. 4, p. 8–14, 2008.

GUMUS, V.; ALGIN, H. M. Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan – Ceyhan River Basins , Turkey. v. 73, p. 62–73, 2017.

GUO, Y. *et al.* Science of the Total Environment Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels. **Science of the Total Environment**. v. 712, p. 136502, 2020.

GURJÃO, C. D. S. *et al.* Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 04, p. 774-790, 2012.

HENNING, E. *et al.* Para Além Da Computação Estatística: O Uso Do Ambiente R Para O Ensino De Métodos Numéricos. **Renote**. v. 14, n. 1, 2016.

HOLLINGER, S.E.; ISARD, S.A., WELFORD, M.R. A New Soil Moisture Drought Index for Predicting Crop Yields. In: Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., pp. 187–190, 1993.

HUANG, S.; HUANG, Q.; ZHANG, H.; *et al.* Spatio-temporal changes in precipitation, temperature and their possibly changing relationship: A case study in the Wei River Basin, China. **International Journal of Climatology**. v. 36, n. 3, p. 1160–1169, 2016.

_____; _____; LENG, G.; *et al.* A nonparametric multivariate standardized drought index for characterizing socioeconomic drought: A case study in the Heihe River Basin. **Journal of Hydrology**. v. 542, p. 875–883, 2016.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Pluviométricos**. Disponível em:< <https://bdmep.inmet.gov.br/>>.

IONITA, M.; SCHOLZ, P.; CHELCEA, S. Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index. **Natural Hazards**. v. 81, n. 3, p. 1483–1498, 2016.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental**

sobre **Alterações Climáticas**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

IWATA, T. *et al.* Preoperative serum value of sialyl Lewis X predicts pathological nodal extension and survival in patients with surgically treated small cell lung cancer. **Journal of Surgical Oncology**. v. 105, n. 8, p. 818–824, 2012.

KOCH, H. *et al.* Scenarios of climate and land-use change, water demand and water availability for the São Francisco River basin. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**. n. 36, p. 96–114, 2015.

LIEPKAN MARANHÃO, H.; SANT'ANA, L. P. Utilization of geoprocessing for environmental studies. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**. v. 6, n. 3, p. 62–66, 2016.

LIMA, M. J. A. *et al.* Optimal soybean sowing window adjusted to climatic variability based on El Niño-Southern Oscillation using agrometeorological modeling. **Pesq. Agropec. Trop**, v. 52, 2022.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. ed. 2, 2015.

LOON, A. F. VAN. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**. v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.

MAHFOUZ, P. *et al.* Investigating the temporal variability of the Standardized Precipitation Index in Lebanon. **Climate**. v. 4, n. 2, 2016.

MAHMOUDI, P.; RIGI, A.; MIRI KAMAK, M. Evaluating the sensitivity of precipitation-based drought indices to different lengths of record. **Journal of Hydrology**. v. 579, p. 124181, 2019.

MARENGO ORSINI, J. A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018.

MARONEZE, M. M. *et al.* A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente e Água**. v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

MASUPHA, T. E.; MOELETSI, M. E. Use of standardized precipitation evapotranspiration index to investigate drought relative to maize, in the Luvuvhu River

catchment area, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**. v. 102, p. 1–9, 2017.

MATHEUS, N. P. A.; ANTÔNIO, J. F. **Seca no sul da Angola: Uma avaliação do episódio extremo de 2018/2019**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 08, Vol. 09, pp. 24-45, 2020.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Paper Presented at 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993.

MEYER, S.J.; HUBBARD, K.G.. Extending the Crop-specific Drought Index to Soybean. In: Preprints, Ninth Conf. on Applied Climatology, Dallas, TX, **Amer. Meteor. Soc.**, pp. 258–259, 1995.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**. v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010.

MOHAMMADI, H.; ABASI, M.; BAZRAFSHAN, J. Drought Monitoring in Chaharmahl-Bakhtiyari Province in Iran Monitoramento da Seca na Província de Chaharmahl-Bakhtiyari no Irã. p. 615–621. 2017.

NICHOL, J. E.; ABBAS, S. Integration of remote sensing datasets for local scale assessment and prediction of drought. **Science of the Total Environment**. v. 505, p. 503–507, 2015.

OLIVEIRA, J. B. Uma análise da eficiência e eficácia nas Universidades Federais brasileiras (2009-2018). Dissertação de Mestrado. Recife, 78 p., 2020.

OLIVERIA, V. G. DE *et al.* Temporal variability of land cover in paraíba and rio grande do norte states. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 36, n. 1, p. 125–136, 2021.

PALMER, W.C. Meteorologic Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau. **Research Paper** No. 45, p. 58, 1965.

PALMER, W.C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index. *Weatherwise* 21, 156–161, 1968.

PAREDES TREJO, F. *et al.* Main features of large-scale oceanic-atmospheric circulation related to strongest droughts during rainy season in Brazilian São Francisco River Basin. **International Journal of Climatology**. v. 36, n. 12, p. 4102–4117, 2016.

PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Minas Gerais, 349 p., ISBN 85-88618-0208, 2001.

PULQUÉRIO, M. *et al.* On using a generalized linear model to downscale daily precipitation for the center of Portugal: an analysis of trends and extremes. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 120, n. 1–2, p. 147–158, 2015.

QUESADA-MONTANO, B. *et al.* Characterising droughts in Central America with uncertain hydro-meteorological data. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 137, n. 3–4, p. 2125–2138, 2019.

RAHMATI, O. *et al.* Machine learning approaches for spatial modeling of agricultural droughts in the south-east region of Queensland Australia. **Science of the Total Environment**. v. 699, p. 134230, 2020.

RIBEIRO, A. *et al.* Estudo da Relação entre a Variabilidade dos Índices de Vegetação e Temperatura da Região Nordeste do Brasil Study of the Relationship Between the Variability of Vegetation and Temperature Indexes of the Northeast Region of Brazil. p. 359–368, 2019.

ROSSATO, L. *et al.* Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. **Rbrh**. v. 22, n. 0, 2017.

ROZANTE, J. R. *et al.* Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**. v. 25, n. 3, p. 885–894, 2010.

RUDD, A. C.; KAY, A. L. National-scale analysis of future river flow and soil moisture droughts : potential changes in drought characteristics. p. 323–340, 2019.

SANTOS, C. A. G. *et al.* Drought assessment using a TRMM-derived standardized precipitation index for the upper São Francisco River basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 189, n. 6, 2017.

_____ *et al.* Integrated spatiotemporal trends using TRMM 3B42 data for the Upper São Francisco River basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 190, n. 3, 2018.

SANTOS, M. S. *et al.* Time-space characterization of droughts in the São Francisco river catchment using the Standard Precipitation Index and continuous wavelet transform. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 24, p. 1–12, 2019.

SEIDEL, E. J. *et al.* Comparação entre o método Ward e o método K-médias no agrupamento de produtores de leite. **Ciência e Natura**. v. 30, p. 7- 15, 2008.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. n. 19, 2011.

SHAFER, B.A.; DEZMAN, L.E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. In: Preprints, Western SnowConf., Reno, NV, Colorado State University, pp. 164– 175, 1982.

SOH, Y. W. *et al.* Application of artificial intelligence models for the prediction of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at Langat River Basin, Malaysia. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 144, p. 164–173, 2018.

SOUSA, F. De A. S. De *et al.* The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). **Ambiência**. v. 12, n. 2, p. 707–719, 2016.

SOUZA JÚNIOR, C. B. *et al.* An exploratory scenario analysis of strategic pathways towards a sustainable electricity system of the drought-stricken São Francisco River Basin. **Energy Systems**, 2019.

SPINONI, J. *et al.* World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**. V. 34, p. 2792-2803, 2014.

SUN, F. *et al.* Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River basin. **Science of the Total Environment**. v. 696, p. 134076, 2019.

SUN, T. *et al.* Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. 2016.

SURIBABU, C. R.; NEELAKANTAN, T. R. Assessment of dry and wet periods using selected rainfall-based drought indicators – a case study. **ISH Journal of Hydraulic**

Engineering. v. 00, n. 00, p. 1–8, 2018.

TREJO, F. P. *et al.* Main features of large-scale oceanic-atmospheric circulation related to strongest droughts during rainy season in Brazilian São Francisco River Basin. v. 4117, p. 4102–4117. 2016.

TUFANER, F.; ÖZBEYAZ, A. Estimation and easy calculation of the Palmer Drought Severity Index from the meteorological data by using the advanced machine learning algorithms. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 192, n. 9, 2020.

VALTER, R. *et al.* Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento Spatial analysis of drought events in the Piauí state based on standardized. p. 55–65, 2012.

VAN ROOY, M.P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos* 14, 43, 1965.

VICENTE-SERRANO, S.; BEGUERIA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**. p. 1696-1718, 2010.

WAN, W. *et al.* A Holistic View of Water Management Impacts on Future Droughts: A Global Multimodel Analysis. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**. v. 123, n. 11, p. 5947–5972, 2018.

WANG, Y. *et al.* Linking drought indices to impacts to support drought risk assessment in Liaoning province, China. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** v. 20, p. 889-906, 2020.

WEGHORST, K.M. The Reclamation Drought Index: Guidelines and Practical Applications. Bureau of Reclamation, Denver, CO, p. 6 (Available from Bureau of Reclamation, D-8530, Box 25007, Lakewood, CO 80226, 1996.

YAN, Z. *et al.* The spatio-temporal variability of droughts using the standardized precipitation index in Yunnan, China. **Natural Hazards**. v. 88, n. 2, p. 1023–1042, 2017.

YANG, P. *et al.* Comprehensive assessment of drought risk in the arid region of Northwest China based on the global palmer drought severity index gridded data. **Science**

of the Total Environment. v. 627, p. 951–962, 2018.

ZAREI, A. R.; MOGHIMI, M. M.; MAHMOUDI, M. R. Analysis of Changes in Spatial Pattern of Drought Using RDI Index in south of Iran. **Water Resources Management.** v. 30, n. 11, p. 3723–3743, 2016.

ZHANG, B.; WANG, Z.; CHEN, G. A Sensitivity Study of Applying a Two-Source Potential Evapotranspiration Model in the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index for Drought Monitoring. **Land Degradation and Development.** v. 28, n. 2, p. 783–793, 2017.

ZHANG, Yajie; YU, Z.; NIU, H. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index is highly correlated with total water storage over China under future climate scenarios. **Atmospheric Environment.** v. 194, n. 19, p. 123–133, 2018.

ZHAO, Q. *et al.* The temporal-spatial characteristics of drought in the loess plateau using the remote-sensed TRMM precipitation data from 1998 to 2014. **Remote Sensing.** v. 10, n. 6, 2018.

ZHAO, T.; DAI, A. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario. **Journal of Climate.** v. 28, n. 11, p. 4490–4512, 2015.

ZSELECZKY, L. Are Shocks Really Increasing of Five Types of Shocks. 2014.