

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jéssica Sousa Dantas

**Caracterização de Seca em Bacias de Climas
Semiárido e Subtropical**

**Campina Grande,
Março de 2021**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



JÉSSICA SOUSA DANTAS

**CARACTERIZAÇÃO DE SECA EM BACIAS DE CLIMAS SEMIÁRIDO E
SUBTROPICAL**

CAMPINA GRANDE/PB

2021

JÉSSICA SOUSA DANTAS

**CARACTERIZAÇÃO DE SECA EM BACIAS DE CLIMAS SEMIÁRIDO E
SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia como
requisito para obtenção para obtenção do
título do Mestre em Meteorologia

Orientadora: Prof^a Dr^a Sandra Isay Saad

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande escalas
Subárea: Modelagem Numérica

CAMPINA GRANDE/PB

2021

D192c Dantas, Jéssica Sousa.
Caracterização de seca em bacias de climas semiárido e subtropical /
Jéssica Sousa Dantas. – Campina Grande, 2025.
71 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Sandra Isay Saad".

Referências.

1. Seca – Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. 2. Seca - Região Semiárido
Nordestino – Brasil. 3. Seca – Bacia do Piracicaba. 4. Seca – Região
Sudeste - Brasil. 5. Índice de Precipitação Padronizada (SPI). 6. Índice de
Evapotranspiração Padronizada (SPEI). 7. Mudanças Climáticas.
8. Efeitos da Seca. 9. Semiárido – Brasil. 10. Seca - Análise Espacial de
Série História e Futura (1980-2016). 11. Seca - Análise Espacial de Série
História e Futura (2017-2053). 12. Seca - Análise Espacial de Série
História e Futura (2054-2090). I. Saad, Sandra Isay. Título.

CDU 551.577.38(812/815)(043)

JÉSSICA SOUSA DANTAS

CARACTERIZAÇÃO DE SECA EM BACIAS DE CLIMAS SEMIÁRIDO E
SUBTROPICAL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/03/2021

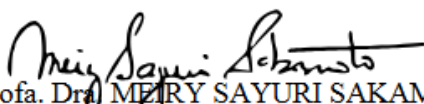
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. SANDRA ISAY SAAD
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BAROBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MEIRY SAYURI SAKAMOTO
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

DEDICATÓRIA

À José Dantas da Paz (*in memoriam*).

Meu pai, meu maior exemplo, fonte de inspiração e força.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, por ter me dado força nos momentos em que pensei que não seria capaz de continuar.

À minha família, por sempre me apoiar e me incentivarem a seguir meus sonhos. Em especial a minha mãe e a minha irmã, Eveline.

Aos meus amigos, Ana Flávia, Ikaro Nascimento, Victória Júlia por mesmo distantes fisicamente se fazerem presentes em meus dias, me aconselhando e me dando forças.

Aos amigos que fiz aqui em Campina Grande, por compartilharem alegrias e choros comigo, Ellen Freitas, Inaê Lima, Manuel Jr., Lorena Ataíde, Renata Luana, Eduarda Vasconcelos, Vanessa Maria, Júlia Moraes, Luiz Fernando, e Romero Thiago, vocês foram essenciais.

Ao Melquizedek Duarte pelo processamento dos dados de projeções climáticas.

À minha orientadora, Sandra Saad por ter me ajudado nessa caminhada.

Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba processo 268/2020.

Por último ao meu pai, que apesar de hoje não está mais nesse plano, foi o meu maior incentivador e sem seu apoio nada disso teria sido possível.

O sucesso consiste em ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.

Winston Churchill

RESUMO

A seca é um fenômeno natural que gera impactos sociais, ambientais e econômicos, que necessita de um maior entendimento. Entre os índices para avaliar a seca está o Índice de Precipitação Padronizada, SPI, que utiliza apenas a precipitação pluviométricas e fornece valores em forma de uma distribuição normal, onde os mesmos são aplicados na caracterização e estudo de eventos de seca em escalas de tempo variado. Este trabalho teve como objetivo avaliar as características da seca meteorológica (intensidade, duração e severidade) no período histórico (desde 1980) e futuro (até 2090) em duas bacias hidrográficas brasileiras de diferentes climas: a bacia do Piancó-Piranhas-Açú, do semiárido nordestino, e a bacia do Piracicaba na região sudeste do país, de clima predominantemente subtropical. Foi calculado o SPI utilizando dados interpolados espacialmente para o período histórico e do modelo MIROC5 para análise das projeções climáticas de dois cenários: RCP8.5 (cenário pessimista de emissões de gases estufa) e RCP4.5 (cenário intermediário). Como resultado observou-se que apesar de ter maiores índices de precipitações pluviométricas a bacia de clima subtropical apresentou maior severidade em relação à bacia de clima semiárido. No futuro, as projeções mostraram um aumento dos eventos secos e extremamente seco na bacia do Piancó-Piranhas-Açú marcadamente maior no cenário pessimista.

Palavras-chave: Seca, Severidade da seca, Mudanças Climáticas, semiárido.

ABSTRACT

Drought is a natural phenomenon that generates social, environmental, and economic impacts, which requires a greater understanding. Among the indexes to assess drought is the Standardized Precipitation Index, SPI, which is based on rainfall and provides values in the form of a normal distribution. It is applied in the drought characterization studies in different time scales. This work aimed to evaluate the characteristics of meteorological drought (intensity, duration, and severity) in the historical period (since 1980) and in the future (until 2090) in two Brazilian hydrographic basins of different climates: the Piancó-Piranhas-Açú basin, from semiarid region in the Northeast of Brazil, and the Piracicaba basin in the Southeast, with a predominantly subtropical climate. SPI was calculated using spatially interpolated data in the historical period and the MIROC5 model was used to analyze climate projections of two greenhouse gas emissions scenarios: RCP8.5 (pessimistic) and RCP4.5 (intermediate). As a result, it was noted that despite presenting higher levels of rainfall, the subtropical climate basin presented greater severity in relation to the basin of semiarid climate. In the future, projections showed an increase in dry and extremely dry events in the Piancó-Piranhas-Açú basin notably greater in the pessimistic scenario.

Keywords: Drought, Drought Severity, Climate Change, semiarid

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO.....	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Seca e Severidade	4
3.2	Mudanças Climáticas	7
3.2.1	Cenários RCP	9
3.3	Semiárido Brasileiro	12
3.4	Clima Subtropical.....	13
4	MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1	Local de Estudo	15
4.1.1	Bacia do Piancó-Piranhas-Açú	15
4.1.2	Bacia do Piracicaba	16
4.2	Dados.....	17
4.2.2	Xavier	17
4.2.3	Portal Hidroweb	17
4.3	Índice de Precipitação Padronizada (SPI)	18
4.4	Índice de Evapotranspiração Padronizada (SPEI)	20
4.5	Severidade Máxima de uma Seca.....	20
4.6	Modelos de projeção climática	21
4.7	Métodos	22
5	RESULTADOS	24
5.1	Variação temporal de SPI e SPEI	24
5.2	Análise de Sensibilidade de SPI e SPEI	30
5.2.1	SPI	30

5.2.2	SPEI	33
5.3	Validação dos Dados do Xavier para aplicação do SPI/SPEI.....	38
5.4	Análise Espacial da Série Histórica.....	44
5.5	Alteração das Secas para o Futuro.....	52
6	CONCLUSÕES.....	56
7.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	57
	REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Mudanças observadas na temperatura do ar próximo da superfície da Terra entre 1901-2012.....	7
Figura 3.2 Mudanças observadas na precipitação anual na superfície de 1951 – 2010.....	8
Figura 3.3 Média global da concentração de gases do efeito estufa.....	9
Figura 3.4 Forçamento radiativo atmosférico.....	10
Figura 3.5. Representações de Concentração (RCPs) de Gás Carbônico.....	11
Figura 3.6. Delimitação do Semiárido.....	12
Figura 4.1 Localização da área de estudo e estação utilizada para validação de dados. Estação de Parelhas dentro da Bacia Piancó-Piranhas-Açu.....	13
Figura 4.2. Localização da Bacia do Piracicaba.....	14
Figura 5.1 Valores do SPI calculado com dados do Xavier et al. (2016) para a localização de Parelhas-RN considerando: A) Médias Mensais. B) Médias Trimestrais. C) Médias Semestrais. D) Médias Anuais.....	23
Figura 5.2. Valores de SPEI calculado com dados do Xavier et al. (2016) para a localização de Parelhas-RN considerando: A) Médias Mensais. B) Médias Trimestrais. C) Médias Semestrais. D) Médias Anuais.....	25
Figura 5.3. Valores de SPI calculado com dados do MIROC para a localização dentro da bacia do Piancó-Piranhas-Açu considerando médias anuais: A) Modelo Climático RCP4.5 . B) Modelo Climático RCP8.5.....	26
Figura 5.4. Valores de SPI calculado com dados do MIROC para a localização dentro da bacia do Piracicaba considerando médias anuais: A) Modelo Climático RCP4.5 . B) Modelo Climático RCP8.5.....	27
Figura 5.5 Relação entre SPI e Variáveis considerando médias mensais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	29
Figura 5.6. Relação entre SPI e Variáveis considerando médias trimestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	29
Figura 5.7. Relação entre SPI e Variáveis considerando médias semestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	30

Figura 5.8 Relação entre SPI e Variáveis considerando médias anuais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	31
Figura 5.9. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias mensais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima. Em vermelho, a reta de regressão linear.....	32
Figura 5.10. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias trimestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	33
Figura 5.11. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias Semestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	34
Figura 5.12. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias anuais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.....	34
Figura 5.13. Índice SPI considerando médias trimestrais. A) Dados do Portal Hidroweb A.1) Dados do Xavier.....	36
Figura 5.14. Índice SPI considerado médias semestrais. B) Dados do Portal Hidroweb B.1) Dados do Xavier.....	37
Figura 5.15. Índice SPI considerando médias anuais. C) Dados do Portal Hidroweb C.1) Dados do Xavier.....	38
Figura 5.16. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias trimestrais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.....	39
Figura 5.17. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias semestrais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.....	39
Figura 5.18. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias anuais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.....	39
Figura 5.19. Gráfico de Dispersão entre os índices SPI e SPEI. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação. A) Médias mensais. B) Médias trimestrais. C) Médias semestrais. D) Médias anuais.....	41
Figura 5.20. Severidade Máxima da Seca em 12 meses para o SPI. A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açu. B) Bacia do Piracicaba.....	43

Figura 5.21. Duração Máxima da Seca para o SPI. A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. B) Bacia do Piracicaba.....	44
Figura 5.22. Intensidade Máxima da Seca. A)Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. B) Bacia do Piracicaba.....	45
Figura 5.23. Médias Anuais para a Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. A) Precipitação Anual. B) Evapotranspiração Anual. C) Temperatura Mínima Anual. D)Temperatua Máxima Anual.....	46
Figura 5.24. Médias Anuais para a Bacia do Piracicaba. A) Precipitação Anual. B)Evapotranspiração. C)Temepertura Mínima Anual. D)Temperatura Máxima Anual.....	49
Figura 5.25 Número de Eventos Secos (SPI <-1) e Extremamente Secos (SPI <-2) no período histórico e futuro na perspectiva do Cenário RCP4.5 Para: (A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú (Lat: 5,62°S; Long: 36,87°W). (B) Bacia do Piracicaba (Lat: 22,87°S; Long: 46,62°W).....	51
Figura 5.26 Número de Eventos Secos (SPI <-1) e Extremamente Secos (SPI <-2) no período histórico e futuro na perspectiva do Cenário RCP8.5 Para: (A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú (Lat: 5,62°S; Long: 36,87°W). (B) Bacia do Piracicaba (Lat: 22,87°S; Long: 46,62°W).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Estágios de seca, ou categorias, as quais definem a intensidade de seca no Mapa do Monitor de Secas	6
Tabela 4.1. Classes de precipitação e as probabilidades de ocorrência de secas em cada uma delas.....	17
Tabela 4.2 Comparativo de vantagens e desvantagens do Índice de Evapotranspiração Padronizado.....	18
Tabela 5.1. Comparativo dos valores de coeficientes angulares e correlação (R^2) dos índices SPI e SPEI para médias mensais, trimestrais, semestrais e anuais em relação a precipitação, evapotranspiração, temperaturas máxima e mínima.....	35
Tabela 5.2. Valores Médias e Máximos de Severidade Duração e Intensiade da Seca para as bacias do Piancó-Piranhas-Açú e Piracicaba.....	46

1. INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural caracterizado pela pouca quantidade ou até ausência de precipitações, responsável pela ocorrência de desastres naturais gerando problemas sociais e econômicos (Carmo e Lima, 2020). As chances que a frequência e duração de eventos de seca aumentem conforme a passagem de tempo vem preocupando diversos setores, desde gestores de recursos naturais até agricultores (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). As mudanças climáticas são hoje mais que uma preocupação, uma realidade enfrentada por todo o globo terrestre. Segundo o IPCC (2014), espera-se o aumento dos eventos extremos e intensificação das secas no futuro.

A seca gera impactos ambientais, econômicos e sociais, assim na literatura é possível encontrar diversas metodologias para avaliação da seca, através de índices que condensam interações entre variáveis climáticas e os processos relacionados as mesmas. O Índice de Precipitação Padronizada, SPI, pode ser utilizado para monitorar e estudar o comportamento da seca de acordo com as médias pluviométricas de cada região. Silva *et al.* (2013) utilizou o SPI para identificar os eventos de seca no estado da Bahia em séries históricas longas e em escalas de 12, 24, 36 e 48 meses, os autores observaram os principais eventos de seca, sua abrangência espacial e intensidade. Carmo e Lima (2020) utilizaram o SPI para caracterizar de maneira mais objetiva as secas na região do nordeste do Brasil, e obtiveram a abrangência espacial de cada evento. (AWANGE; MPELASOKA; GONCALVES, 2016) mostraram que no Brasil como um todo a extensão espacial da seca tem crescido considerando escalas de 3 e 6 meses para o índice SPI. O monitoramento das secas também é realizado em ambiente operacional. No Brasil o Ministério da Integração Nacional (MI) em parceria com agências federais e estaduais, implementaram desde 2014 o Monitor de Secas para auxílio às tomadas de decisões e para integrar o conhecimento técnico e científico já existente (BRASIL, 2019). Avaliar a extensão e intensidade das secas pode servir como indicativo de avaliação de mudanças climáticas e para delinamento de políticas públicas.

A convivência com a seca no Nordeste brasileiro é uma realidade que conta com políticas públicas para gestão e convivência. Na semiárido da região, há um longo e conhecido histórico com a falta de chuvas, e que poderá se

intensificar devido às mudanças climáticas (MARENGO et al., 2019). Do outro lado, a mais populosa região Sudeste, o clima mais propício a precipitações mais regulares, mas que mesmo assim tem sido afetada por eventos extremos como o caso da seca de 2014 (COELHO et al., 2015).

É no contexto de uma bacia hidrográfica, que se realiza a gestão da água e se administram os eventuais conflitos a partir dos comitês de bacia hidrográfica (PORTO; PORTO, 2008). A bacia do Piancó-Piranhas-Açú se encontra na região semiárida do nordeste brasileiro entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Assim como demais rios da região nordestina, o Piancó-Piranhas-Açú é um rio intermitente e tem sua perenidade assegurada por dois reservatórios, um em cada estado que ocupa. Tais reservatórios garantem o abastecimento de aproximadamente 1.280.000 pessoas (Brasil, 2016). Localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais a bacia Piracicaba, de clima predominantemente subtropical, é composta pelas sub-bacias dos rios Corumbataí, Jaguari e Atibaia, e integra o sistema Cantareira que abastece quase 50% da população da Região Metropolitana de São Paulo (PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS, 1990). A crise hídrica enfrentada em 2014 mostrou a falta de preparação à convivência com as secas na região (MARENGO et al., 2015). É preciso melhorar o entendimento das características das secas em escala de bacias e de como elas se alterarão no futuro.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar as características da seca meteorológica (intensidade, duração e severidade) no período histórico (desde 1980) e futuro (até 2090) em duas bacias hidrográficas de climas distintos: a bacia do Piancó-Piranhas-Açu, do semiárido dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte; e a bacia do Piracicaba, subtropical localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o uso de dados interpolados para aplicação em índices de seca na bacia do Piancó-Piranhas-Açu;
- Aplicar índices de seca sob diferentes janelas temporais para a bacia do Piancó-Piranhas-Açu;
- Confrontar os índices de Precipitação Padronizada (SPI) e Evapotranspiração Padronizada (SPEI);
- Comparar bacias de clima distinto em relação às características das secas para os dados do modelo climático;
- Avaliar a alteração da frequência das secas em cenários de mudança climática.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Seca e Severidade

A seca pode ser definida como um fenômeno climático que ocorre em uma região quando a precipitação apresenta valores muito abaixo das médias climatológicas e se estende por um determinado período de tempo, ocasionando assim problemas de escassez de água. Para McNab & Karl (1991) a dificuldade de se apresentar uma definição geral para seca deve-se à necessidade de especificar os componentes do ciclo hidrológico afetados pela deficiência hídrica e o período de tempo a ela associado.

Farias (2016) utilizou duração, déficit e intensidade como parâmetros delineadores das quatro categorias de classificação da seca: fraca, moderada, severa e extrema. O autor ainda fala que apesar do gênesis da seca ser a irregularidade das precipitações, existe ainda uma série de causas e efeitos que acontecem em função da intensidade e dos tipos de secas, que podem ser: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

A seca meteorológica ocorre quando o valor da precipitação média fica abaixo do valor das normais climatológicas; enquanto a seca agrícola é aquela onde ocorre um déficit de disponibilidade de água no solo causando stress hídrico e afetando a produtividade das culturas; a seca hidrológica diz respeito a uma baixa nos volumes de reservatórios e corpos hídricos; e por último a seca socioeconômica ocorre quando “as reservas de água disponíveis não são suficientes para atender as necessidades humanas” (CUNHA, 2008).

A continuidade do período de déficit pluviométrico gera diversos prejuízos sobre vários setores, culminando nos diferentes tipos de seca (BATISTA JÚNIOR, 2012).

O nordeste brasileiro por ter boa parte do seu território inserido no clima semiárido sofre frequentemente com períodos de seca.

Considerando que ocorra um aumento no número de períodos de seca, Marengo (2011) prevê uma diminuição nas bases de sustentação para atividades que garantem a sobrevivência da população, gerando assim um novo êxodo. Ou seja, um provável deslocamento da população para locais onde seja possível

desenvolver atividades como agricultura irrigada ou mesmo grandes centros urbanos.

Os sinais da seca mais recente que atingiu o nordeste brasileiro apareceram inicialmente em dezembro de 2011 e durante o ano de 2012 se intensificaram (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). Essa seca gerou um déficit hídrico em quase todo o semiárido nordestino, entre os anos de 2012 e 2019.

Devido seus impactos em diversos setores da sociedade é encontrado na literatura diferentes metodologias para estudo e análise do comportamento da seca.

Índice encontrado na literatura e bastante utilizado, o índice de severidade de seca de Palmer (ISSP) que foi desenvolvido por Palmer (1965) e diz respeito a secas meteorológicas. Barra (2002) utilizou o ISSP para caracterizar a variação espacial da seca no estado do Ceará evidenciando assim sua utilidade na avaliação dos impactos das secas, posteriormente Menezes, Azevedo e Santos (2020) utilizaram o ISSP e obtiveram como resultado a avaliação dos resultados quanto a tendência geral do fenômeno da seca para a cidade de Petrolina no Pernambuco mostrando assim sua aplicabilidade no nordeste brasileiro.

O monitoramento das secas também é realizado em ambiente operacional. No Brasil o Ministério da Integração Nacional (MI) em parceria com agências federais e estaduais, implementaram desde 2014 o Monitor de Secas para auxílio às tomadas de decisões e para integrar o conhecimento técnico e científico já existente (BRASIL, 2019). Seu principal objetivo é alcançar um entendimento comum sobre: severidade, evolução espacial e temporal, e os impactos sobre os diferentes setores envolvidos que as secas podem causar. Além de proporcionar um monitoramento, auxiliando em tomadas de decisões mais rápidas.

Tabela 3.1. Estágios de seca, ou categorias, as quais definem a intensidade de seca no Mapa do Monitor de Secas.

Categoria	Percentil	Descrição	Impactos Possíveis
S0	30 %	Seca Fraca	Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
S1	20 %	Seca Moderada	Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
S2	10 %	Seca Grave	Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comum; restrições de água impostas.
S3	5 %	Seca Extrema	Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições.
S4	2 %	Seca Excepcional	Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência.

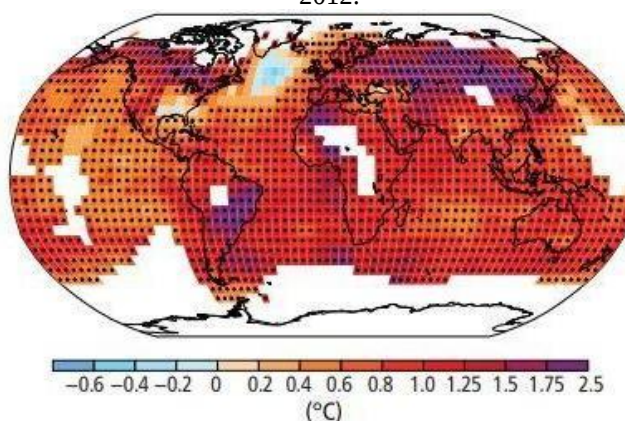
Fonte: BRASIL(2019).

A literatura cita alguns índices para a caracterização de secas: Índice de Anomalia de Chuva (RAI – Rainfall Anomaly Index) (MARCUIZZO et al., 2012); Índice de Anomalia de Umidade (Z-Índice) (PALMER, 1965; FERNANDES et al., 2010; FARIA et al., 2012 e SANTOS et al., 2011); Método dos Decis (GIBBS & MAHER, 1967 e VALADÃO, et al., 2010); Índice de Seca NOAA (NDI - NOAA Drought Index) (STROMMEN et al., 1980; TITLOW, 1987, LIRA, et al., 2011, MELO, et al., 2011, COVELE, 2011); Índice de Precipitação Padronizado denominado (SPI, Standardized Precipitation Index) (MCKEE et al., 1993 e 1995, PAREDES et al., 2008, FERNANDES et al., 2010, FERNANDES et al., 2011, BLAIN et al., 2011, BLAIN et al., 2012).

3.2 Mudanças Climáticas

Nas últimas duas décadas, imagens de satélite apontam uma significativa diminuição dos gelos da Groenlândia e da Antártica (IPCC, 2014). Acompanhando tudo isso, várias regiões do planeta registram temperaturas (máxima e mínima) recordes, e a temperatura dos oceanos vem causando o desaparecimento de corais (essenciais à vida marinha). Esses fatos são possíveis evidências de como as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global vem se intensificando e podem ter consequências graves. A Figura 3.1 mostra as mudanças da temperatura do ar próximo da superfície da Terra pelo globo ao longo do tempo e pode-se observar um aumento de temperatura em quase todas as regiões do mundo.

Figura 3.1 Mudanças observadas na temperatura do ar próximo da superfície da Terra entre 1901-2012.

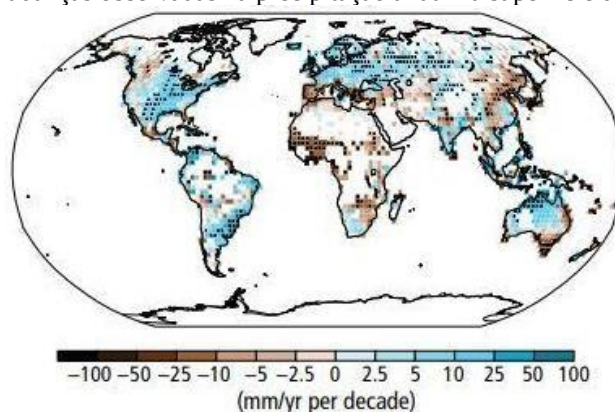


Fonte: IPCC (2014).

A problemática das mudanças climáticas globais levou a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e a UNEP (United Nations Environment Programme) a criarem o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) em 1988. De acordo com o IPCC (2014), no século XX houve um aumento de $0,65^{\circ}\text{C}$ na média da temperatura global, sendo este mais pronunciado na década de 90. Quanto à precipitação, o IPCC (2014) diz que o aumento variou de 0,2% a 0,3% na região tropical. Para o IPCC (2004) as variações podem ser consequências de processos naturais ou de ações antropogênicas, ou ainda um resultado da união

dos dois fatores. A Figura 3.2 ilustra as mudanças observadas no regime pluviométrico por todo o globo.

Figura 3.2 Mudanças observadas na precipitação anual na superfície de 1951 – 2010.



Fonte: IPCC (2014).

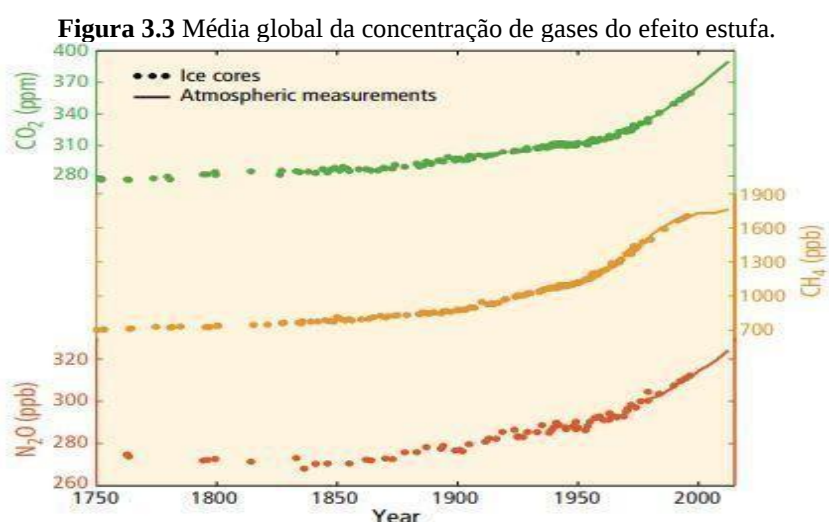
Diversos relatórios depreenderam que as mudanças climáticas devem produzir grandes impactos sobre os recursos hídricos (PBMC, 2012; IPCC, 2013; IPCC, 2007(b); BANCO MUNDIAL, 2010). A modificação nos padrões de fenômenos como precipitação e a evapotranspiração podem suscitar em alterações energéticas no ciclo hidrológico causando sérios impactos em variáveis como: umidade do solo, reservas subterrâneas de água, e escoamento superficial, tudo isso sendo um resultado direto do aquecimento das últimas décadas de acordo com o IPCC (2007) e IPCC (2013). Conforme diz o PBMC (2012) e Salati *et al.* (2008) o crescimento populacional previsto para o futuro é um dos principais fatores que irão interferir diretamente na demanda hídrica, ocasionando uma grande pressão nos hidrossistemas brasileiros.

Para Marengo (2011) o Brasil sofrerá dificuldades de acesso à água devido a uma combinação de alterações climáticas, como pouca (ou até ausência) de chuvas e altas temperaturas que resultarão em um aumento na taxa de evapotranspiração. Entretanto para Nobre (2001) não se pode ter certeza sobre as mudanças precipitação, e sobre como as mudanças climáticas irão impactar e quais efeitos desses impactos sobre os ecossistemas e as atividades agrícolas sobretudo em regiões tropicais e subtropicais onde não se encontram fenômenos como geadas e temperaturas muito baixas. Sendo assim para esse autor, ainda

existem muitas incertezas sobre como será o regime de precipitações em escalas locais.

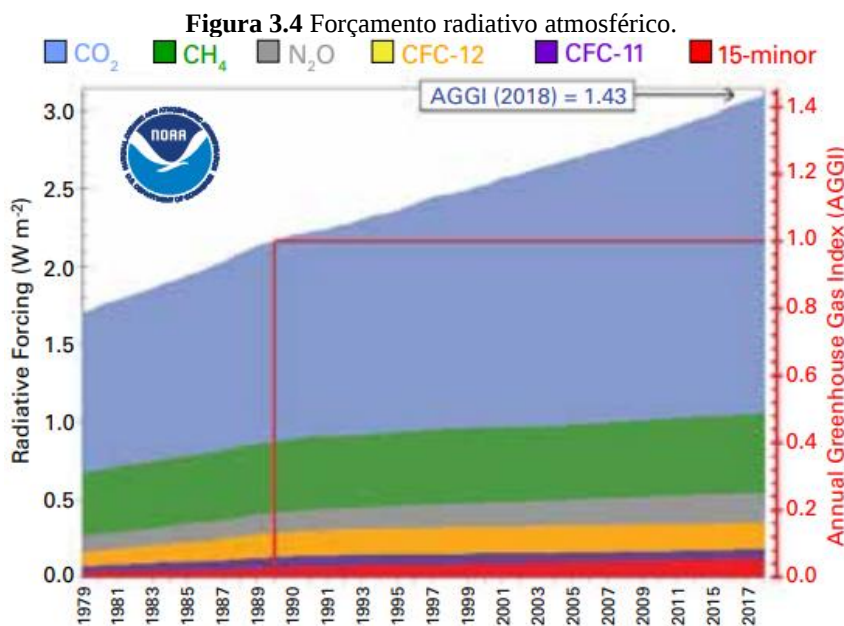
3.2.1 Cenários RCP

As emissões de GEEs aumentam desde a era pré-industrial, segundo o IPCC (2014) entre os anos de 2000 a 2010, as emissões foram as mais altas da história (figura 3.3). As emissões históricas elevaram as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso a níveis sem precedente ocasionando uma absorção de energia pelo sistema climático.



Fonte: IPCC (2014).

Os caminhos representativos de concentração (RCP) descrevem quatro diferentes rotas do século XXI de GEEs e concentrações atmosféricas, emissões de poluentes atmosféricos e uso da terra (IPCC, 2014, tradução da autor). Os RCPs foram desenvolvidos usando Modelos de Avaliação Integrada (IAMs) com o objetivo de serem usados como entrada para simulações de modelos climáticos, projetando assim suas consequências para o sistema climático. Essas projeções climáticas então são utilizadas para estudos de avaliação de impactos e projetos de adaptação às mudanças que estão por vir.



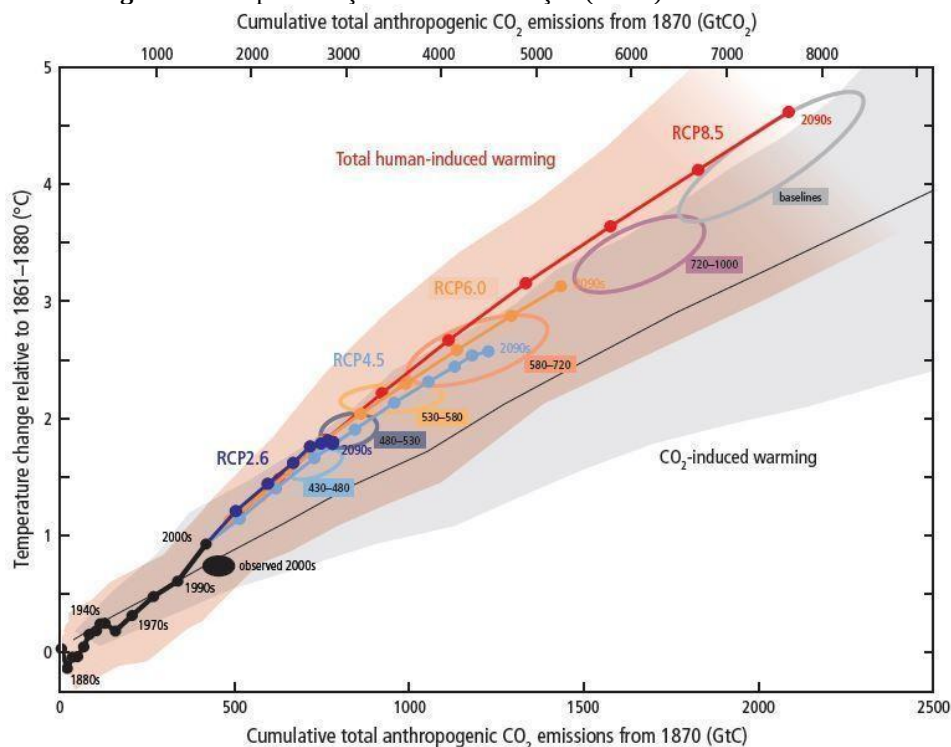
Fonte: World Meteorological Organization (2019).

As figuras 3.3 e 3.4 mostram a variação de concentração e emissões de gases de efeito estufa com o passar do tempo, é possível ver aumento significativo das forçantes radiativas após o período da revolução industrial. Segundo a World Meteorological Organization (2019) o recorde de emissões ocorreu em 2018.

As forçantes radiativas dizem respeito ao aumento da retenção de energia causado pelos GEEs e são mensuradas em W.m⁻² (SOUSA *et al.*, 2019).

Araújo Júnior (2013) exemplifica a nomenclatura dos cenários da seguinte maneira: RCP-X implica em um cenário no qual é adicionada uma forçante radiativa de estabilização ou de pico ao final do século XXI corresponde a X W.m⁻². Os cenários são: RCP 2.6 que indica mitigação rigorosa das emissões, RCP 4.5 e RCP 6.0 que são considerados cenários intermediários e RCP 8.5 onde as emissões de gases de efeitos estufa e a concentrações atmosféricas são muito altas, não há mitigação nenhuma. A figura 3.5 exemplifica o comportamento dos RCP de acordo com a concentração de gás carbônico.

Figura 3.5. Representações de Concentração (RCPs) de Gás Carbônico.



Fonte: IPCC(2014).

De acordo com o IPCC (2014), cenários onde não existem medidas mitigadoras adicionais para restringir as emissões variam entre RCP 6.0 e RCP 8.5. O RCP 2.6 é representativo de um cenário que visa manter o aquecimento global abaixo de 2 ° C acima das temperaturas pré-industriais.

Ao analisar modelos globais do CMIP5 Silveira (2013) verificou correlações elevadas entre os modelos e a climatologia observada no período de 1901 a 1999 para as regiões do Nordeste Setentrional do Brasil, bacia do Prata e Amazônia, mostrando que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais.

Em Silveira *et al.* (2016), modelos do IPCC como: BCC-CSM1.1, MIROC5, HadGEM2-AO, ACCESS1.3, CSIRO-Mk3.6.0, BNU-ESM, MPI-ESM-MR (e outros mais) foram analisados e forneceram como resultados anomalias que indicaram aumento nas temperaturas e precipitações na bacia do Rio São Francisco, em ambos os cenários.

3.3 Semiárido Brasileiro

O semiárido é um clima presente em diversas regiões do globo como partes da África, Américas do Norte e do Sul, Ásia e Oceania (Austrália). No Brasil, o clima semiárido se encontra na região Nordeste e em parte da Região Sudeste, ocupa cerca de 57% de todo território nordestino e 18,27% de todo o território nacional, possui uma extensão de 1.561.177,8 Km² (ANDRADE, 2019), a figura 3.6 mostra a delimitação do semiárido dentro do território brasileiro.

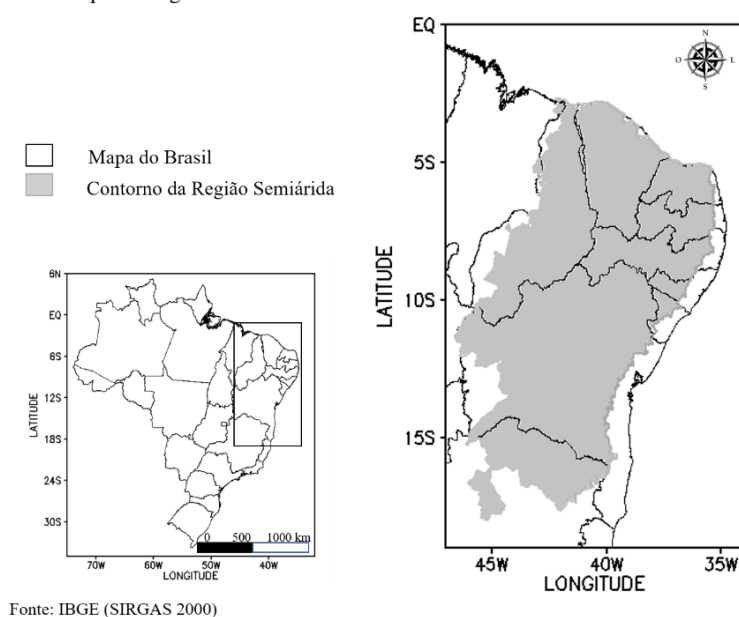
Palharini e Vila (2017) afirmam que: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), convergência de umidade (brisas e ventos alísios) e convecção local, são os fenômenos responsáveis pelo regime pluviométrico da região.

Possui temperaturas médias elevadas, em torno de 27°C com variações anuais em torno de 5°C (MORGADO, 2011; SILVA *et al.*, 2015), a região apresenta também a alta variabilidade espaço-temporal da precipitação (SILVA, 2004; MEDEIROS *et al.*, 2017) com índices pluviométricos de 750 mm/ano, havendo regiões que superam 800 mm/ano e em contrapartida regiões que apresentam índices menores que 250 mm/ano (ANDRADE, 2019).

Para AB'SÁBER (1977) outras faixas do globo que possuam os mesmos totais pluviométricos podem ser consideradas regiões subúmidas, o que não ocorre no semiárido brasileiro devido ao desequilíbrio do balanço hídrico junto com os índices térmicos regionais. Assim pode-se dizer que esse conjunto de características climáticas contribuiu para submeter região a eventos de seca que geram a crise hídrica com inúmeras consequências negativas (LUCENA, 2018).

De acordo com MALVEZZI (2007): “O semiárido brasileiro é hoje uma das regiões mais “açudadas” do planeta, pois são aproximadamente 70.000 açudes construídos. Os pequenos e médios açudes, com volumes compreendidos entre 10.000 e 200.000 m³, representam 80% dos corpos de água nos estados do Nordeste”.

Figura 3.6. Delimitação do Semiárido.
Mapa da Região Semiárida do Nordeste do Brasil



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

3.4 Clima Subtropical

Segundo o IBGE, algumas das características que ocorrem no Clima Subtropical brasileiro são temperatura do ar anuais médias inferiores a 18°C em termos de precipitação, existe uma variação média entre 1050 e 1750 mm/ano (RAO e HADA, 1990), que ocorre de forma bem distribuída ao longo do ano, logo dificultando a identificação de uma estação seca. Ainda nas áreas mais elevadas, na maioria das vezes, o verão ocorre de maneira quente e úmida, enquanto o inverno é frio e seco, com alguns registros de nevascas ocasionais.

No estudo de Reboita et al. (2010) são destacados os principais sistemas atmosféricos que auxiliam na manutenção das características de temperatura e precipitação descritas anteriormente para o clima subtropical, por exemplo, os sistemas frontais frios que atuam se deslocando do Oceano Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste do Brasil, de acordo com Kousky (1979), Oliveira (1986), Rodrigues et al. (2004) e Andrade (2007). O desenvolvimento de ciclones e frentes frias que se no sul da América do Sul, devido à presença de vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis sobre a costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico (MIKY FUNATSU et al., 2004; IWABE e DA ROCHA, 2009), e ainda segundo Satyamurty e Mattos (1989) e Reboita (2008) devido à

condições frontogenéticas e/ou ciclogénéticas originadas também no sul da América do Sul.

Complexos Convectivos de Mesoescala – CCMs – também atuam na região subtropical brasileira (FIGUEIREDO e SCOLAR, 1996; SALIO et al. 2007). Além disso, também ocorrem os bloqueios atmosféricos (MARQUES e RAO, 2000; NASCIMENTO e AMBRIZZI, 2002), a atuação da circulação de brisa (BRAGA e KRUSCHE, 2000) e a influência indireta (através dos seus ramos subsidentes) da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS – (KOUSKY, 1988; KODAMA, 1992; QUADROS, 1994; NOGUÉS-PEAGLE e MO, 1997; FERRAZ, 2004; CARVALHO et al., 2004).

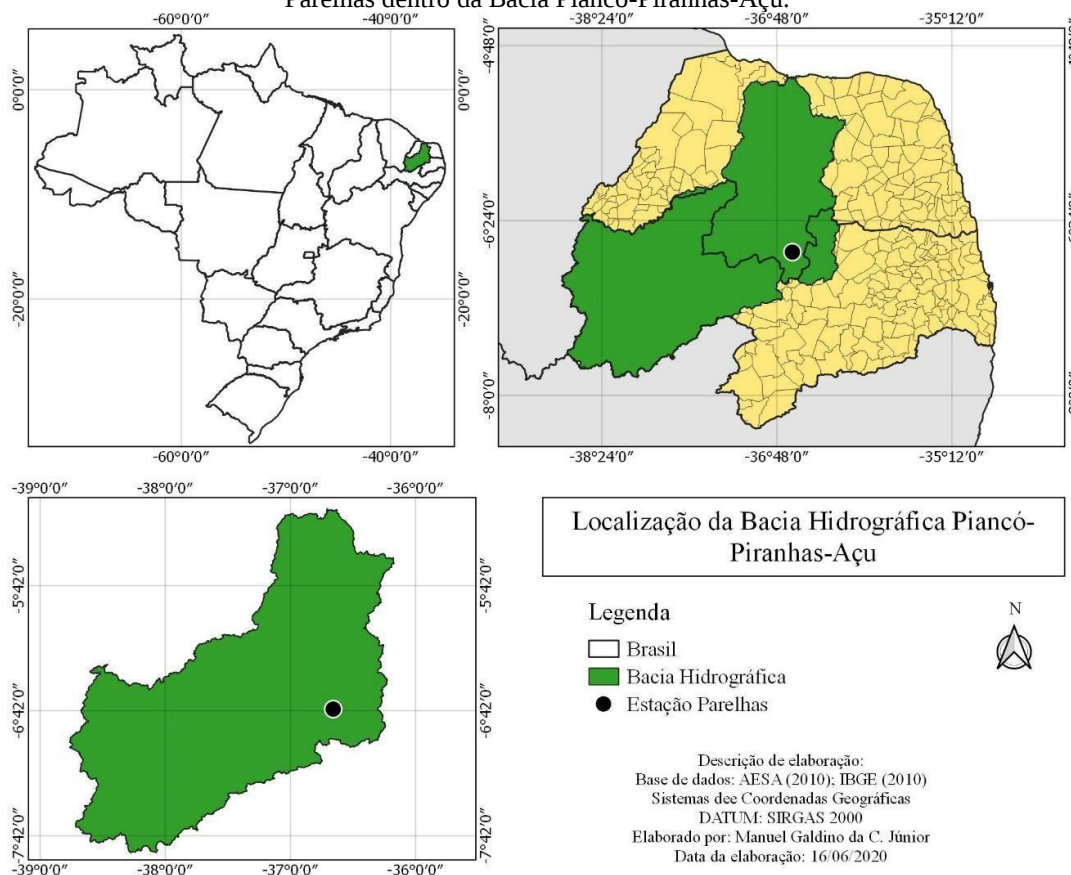
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de Estudo

4.1.1 Bacia do Piancó-Piranhas-Açú

A bacia hidrográfica Piancó-Piranhas-Açú se estende entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte e tem uma área aproximada de 43.682 km², sendo 60% de sua área localizada na Paraíba com 100 municípios e 40% no Rio Grande do Norte com 47 municípios. Dentro da bacia existem dois reservatórios que garantem um fluxo perene ao rio, que como a maioria dos rios encontrados no seminário nordestino é intermitente, Coremas- Mãe d'Água, e o Engenheiro Ávido que se encontram na Paraíba e a barragem Armando Ribeiro Gonçalves está no Rio Grande do Norte (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ-PIRANHAS-AÇÚ).

Figura 4.1 Localização da área de estudo e estação utilizada para validação de dados. Estação de Parelhas dentro da Bacia Piancó-Piranhas-Açú.



Fornecido por: COSTA JÚNIOR (2020).

A estação pluviométrica da cidade de Parelhas foi utilizada como ponto inicial das análises e também para validação dos dados. A cidade se localiza no interior do Rio Grande do Norte bem próxima ao limite dos estados, como observa-se na Figura 4.1. A cidade de Parelhas tem características climáticas baixa umidade e pouco volume pluviométrico (NUNES, Florestan et al. Estudos físico-químicos da água do município de Parelhas/RN em relação aos dados informativos da CAERN (2016). http://editorarealize.com.br/editora/anais/conidis/2017/TRABALHO_EV074_MD4_SA5_ID1190_02102017201755.pdf

4.1.2 Bacia do Piracicaba

A bacia do rio Piracicaba abrange uma área de 12.400 km² entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, sendo a maior parte do seu território localizado no estado de São Paulo (figura 4.2). Constituem a bacia, as sub-bacias dos rios Corumbataí, Jaguari e Atibaia. Fazem parte da Bacia do Piracicaba, quatro das cinco subbacias do Sistema Cantareira, principal sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo, abastecendo quase metade dos 18 milhões de habitantes (Agência PCJ).

Figura 4.2. Localização da Bacia do Piracicaba.



Fonte: SAAD (2015).

O clima encontrado na bacia, é majoritariamente considerado subtropical , com temperaturas médias anuais entre 18°C e 22 °C, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos (1990) cerca de 2% da bacia possui clima temperado . Trindade (2007) definiu o clima da bacia, como clima de transição pois a mesma sofre influências de sua posição latitudinal, e ainda dos fenômenos que ocorrem nas latitudes médias e tropicais. De acordo com a Agência das Bacias PCJ (2017), a bacia do Piracicaba possui diferenças regionais no seu clima, devido a distância do mar e por fatores topoclimáticos.

4.2 Dados

4.2.2 Xavier

Para a realização dos estudos foram utilizados dados de precipitação (mm), temperaturas máxima e mínima (°C) e evapotranspiração potencial (mm), obtidos a partir de XAVIER *et al.* (2016), que são dados mensais em ponto de grade obtidos através de interpolações feitas entre estações próximas, esses dados foram retirados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional de Águas (ANA), e do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), estão disponíveis durante o período de 1980 à 2016 e para todo o país.

4.2.3 Portal Hidroweb

Para fins de validação foram utilizados dados observados de precipitação (mm) retirados do Portal Hidroweb, que consiste em uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) no endereço: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Na cidade de Parelhas, localizada na região do Seridó do estado do Rio Grande do Norte com latitude de 6° 41' 18"S, longitude de 36° 39' 29" O e altitude: 226 metros, a estação

pluviométrica com código 636018 foi a estação escolhida para as primeiras análises estatísticas e validação de dados.

4.3 Índice de Precipitação Padronizada (SPI)

MCKEE *et al.* (1993) desenvolveram o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), um dos índices mais utilizados no mundo que, por usar apenas a precipitação em seu cálculo e não ter seus resultados afetados por elementos topográficos, é considerado um índice bastante acessível. Usando dados de estações pluviométricas (automáticas e convencionais), é possível determinar o SPI de cada estação. Segundo Martins *et al.* (2015) calcular os intervalos relativos de três e quatro meses torna viável a identificação de possíveis secas de curto prazo, assim como para intervalos de doze, dezoito e vinte e quatro meses é possível identificar secas de longo prazo. Assim ao calcular o intervalo de seis meses verifica-se a transição entre curto e longo prazos.

O SPI demonstra a precipitação em função de valores de desvios padrão. Dentro de uma janela temporal esses valores se afastam da média, criando assim a ideia de precipitação padronizada do índice de acordo com Lima (2016).

Segundo Santos *et al.* (2017), uma determinada distribuição cumulativa é transformada em distribuição probabilidade normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um. Estima-se então uma probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor mensal, e por fim aplica-se a essa probabilidade a função normal inversa para encontrar o valor do SPI. De maneira simplificada pode-se dizer que o SPI é dado pela equação 4.1:

Equação 4.1. Cálculo do índice de precipitação padronizada

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}_i}{\sigma}$$

Onde:

P_i é a precipitação observada;

$\bar{P}_i$ é precipitação média; e

σ é o desvio padrão da série ajustada.

Altamirano (2010) atribui à empregabilidade do índice a sua versatilidade, pois permite a comparação entre regiões com climas dessemelhantes em variadas escalas de tempo.

Utilizando funções de densidade de probabilidades estatísticas as séries históricas pluviométricas são descritas em diversas escalas de tempo, assim, com no mínimo 30 anos de dados é determinado o SPI (SILVA *et al*, 2013).

Uma distribuição do tipo normal, onde os valores são distribuídos uniformemente em todo no valor médio não é vista em séries históricas de precipitação. Para Lima (2016) ao se calcular o índice é necessário que haja um tratamento inicial das séries de dados, de tal forma que os valores passem a ter uma distribuição normal. Assim, inicialmente deve-se ajustar a série de dados em uma função de distribuição de probabilidade que em seguida se torna uma distribuição normal.

A tabela 4.1 mostra a classificação da seca de acordo com cada valor apresentado pelo SPI, e a sua probabilidade de ocorrência (SANTOS *et al.*, 2013).

Tabela4.1. Classes de precipitação e as probabilidades de ocorrência de secas em cada uma delas.

Classe	Limites SPI	P (inf)	P (sup)	P classe
Seca Extrema (SE)	< -2,0	0,0%	2,3%	2,3%
Seca Severa(SS)	-2,0 a -1,5	2,3%	6,7%	4,4%
Seca Moderada (SM)	-1,5 a -1,0	6,7%	15,9%	9,2%
Seca Leve (SL)	-1,0 a 0,0	15,9%	50,0%	34,1%
Chuvoso Leve (CL)	0,0 a 1,0	50,0%	84,1%	34,1%
Chuvoso Moderado (CM)	1,0 a 1,5	84,1%	93,3%	9,2%
Chuvoso Severo (CS)	1,5 a 2,0	93,3%	97,7%	4,4%
Chuvoso Extremo (CE)	>2,0	97,7%	100,0%	2,3%

Fonte: SANTOS *et al.* (2013).

Assim, de acordo com Martins *et al.* (2015), pode-se adotar os valores negativos como indicativos de precipitações abaixo da média, ou seja, períodos secos e valores positivos, como indicativos de períodos úmidos.

As desvantagens do índice, segundo Martins *et al.* (2015) são: (i) precipitação é o único parâmetro de entrada, a seca é avaliada levando-se em

consideração somente o acumulado dessa grandeza; (ii) não possui componente de balanço de água; e (iii) valores se modificam com a atualização da série de dados.

4.4 Índice de Evapotranspiração Padronizada (SPEI)

Esse indicador foi desenvolvido por Vicente-Serrano *et al.* (2010) baseado nos procedimentos do SPI e inclui efeitos da variabilidade da temperatura na avaliação da seca pela inclusão da Evapotranspiração Potencial além da precipitação. Pelo método, substitui-se a precipitação da eq. 4.1 pela diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial. Um dos métodos sugeridos pelos autores para obtenção da evapotranspiração potencial (ETP) é o balanço de água de Thornthwaite (1948).

Assim como o SPI, esse índice é calculado com intervalos de 3 e 4 meses para curto prazo, 12, 18 e 24 meses para longo prazo e 6 meses para valores intermediários. O SPEI também é representado por uma distribuição normal, com valores que variam em torno da média, sendo valores negativos indicadores de períodos secos e valores positivos indicativo de períodos úmidos.

Tabela 4.2 Comparativo de vantagens e desvantagens do Índice de Evapotranspiração Padronizado.

Vantagens	Desvantagens
Utiliza dados de precipitação, e também dados de temperatura, permitindo o cálculo da evapotranspiração (ETP)	Valores modificam com a atualização da série de dados
Possui componente de balanço de água no solo	Existe uma dificuldade grande de conseguir longas séries de temperatura e precipitação para uma mesma localidade
	Sensível ao método de cálculo de Evapotranspiração

Fonte: Martins *et al.* (2015);

Adaptado: AUTORA (2020).

Os índices SPI e SPEI foram calculados e analisados utilizando o pacote SPEI do Rstudio (BEGUERÍA; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA, 2017).

4.5 Severidade Máxima de uma Seca

A seca ocorre quando os valores dos índices SPI e SPEI são negativos, assim pode-se definir a intensidade da seca como o valor em módulo dos índices. Assim, ficou definido que os valores serão computados de acordo com a equação 4.2.

Equação 4.2. Intensidade da Seca

$$intensidade = \{SPI, \text{ se } SPI \geq 1 \quad \quad \quad abs(SPI), \text{ se } SPI < -1\}$$

Fonte: AUTORA (2020).

Para SPEI substitui SPI por SPEI na equação 4.2.

De acordo com Araújo Rodrigues (2014): evento seca começa quando o SPI torna-se negativo e termina quando este volta a apresentar valores positivos. Portanto definiu-se a duração da seca como o somatório de um período em que os índices SPI e SPEI apresentam valores abaixo de -1.

Equação 4.3. Duração da seca

$$duração = t_n - t_1$$

Fonte: AUTORA (2020).

onde t_1 é o primeiro tempo de um período da série temporal em que o SPI ou SPEI são menores ou iguais do que -1 e t_n é o último tempo do período em que SPI ou SPEI são menores ou iguais do que -1.

A severidade da seca, aqui, foi definida como a somatória da sua intensidade durante um período em que o SPI é menor do que -1.

Equação 4.4. Cálculo de Severidade da Máxima do Período t_n

$$severidade = \sum(intensidade)_{t_1}$$

Fonte: AUTORA (2020).

onde a intensidade da seca é dada pelo valor em módulo do SPI ou do SPEI, em casos em que esses são menores do que zero.

Finalmente, considerou-se o valor máximo da severidade obtida de uma série temporal para a estimativa da severidade máxima da seca.

4.6 Modelos de projeção climática

Foram utilizadas as projeções globais do modelo MIROC5 (WATANABE *et al.*, 2010) regionalizadas pela NASA Earth Exchange (NEX-GDDP), que disponibilizam as saídas dos modelos climáticos globais do CMIP5 regionalizados estatisticamente. Foram considerados três períodos de tempo: histórico (1980-2016), futuro próximo (2017-2053) e futuro distante (2054-2090). Foram utilizados dois cenários pelo IPCC: o RCP 4.5 e RCP 8.5, sendo esses cenários intermediário (porém ainda otimista) e pessimista, respectivamente. O MIROC foi escolhido pois simula de modo realista, posição e intensidade de fenômenos como ZCAS (VERA *et al.*, 2006; BOMBARDI; CARVALHO, 2008), apesar de tender a superestimar os eventos chuvosos a regionalização estatística melhorou a simulação de precipitações (ALMAGRO e OLIVEIRA, 2019). A regionalização se faz necessária para avaliar as alterações ao longo da escala das bacias devido à melhor resolução espacial em relação às saídas originais do modelo MIROC5 (WATANABE *et al.*, 2010).

4.7 Métodos

O SPI leva em consideração em seu cálculo a média das precipitações acumuladas conforme a escala temporal utilizada, e o SPEI em seus cálculos considera o balanço entre as médias acumuladas da evapotranspiração e precipitação.

O SPI é calculado levando em consideração apenas a precipitação, sendo assim calculado utilizando dados do XAVIER *et al.* (2016) e dados do Portal Hidroweb para fins de validação das demais análises. Enquanto o SPEI leva em seu cálculo o balanço hídrico entre evapotranspiração potencial e precipitação.

A correlação entre cada índice e as variáveis foram feitas através de regressão linear, tendo o R^2 como parâmetro principal de observação sobre qual variável tem maior ou menor relação com os índices.

Após as análises estatísticas, e usando o RStudio foi realizado a análise espacial da severidade da seca para a bacia Piancó-Piranhas-Açú, a severidade foi calculada baseada nos dois índices: SPI e SPEI. Sendo considerado eventos de seca valores maiores ou iguais a -1, e eventos de seca extrema valores menores ou iguais a -2.

Por fim, foi calculado o SPI para as bacias do Piraciaba e Piancó-Piranhas-Açu, utilizando os dados do MIROC para a série histórica (1980-2016), futuro próximo (2017-2053) e futuro distante (2054-2090). Diante da série temporal do SPI foram selecionados dois pontos: o ponto com coordenadas de latitude de 5,62°S e longitude 36,87°W (Itajá-RN) por apresentar os valores de maior severidade; e por fim dentro da bacia do Piracicaba o ponto de latitude 22,87°S e 46,62°W (Bragança Paulista-SP), que também apresentou valores de maior severidade.

Os pontos selecionados foram utilizados para caracterização e identificação dos eventos de seca e seca extrema.

5 RESULTADOS

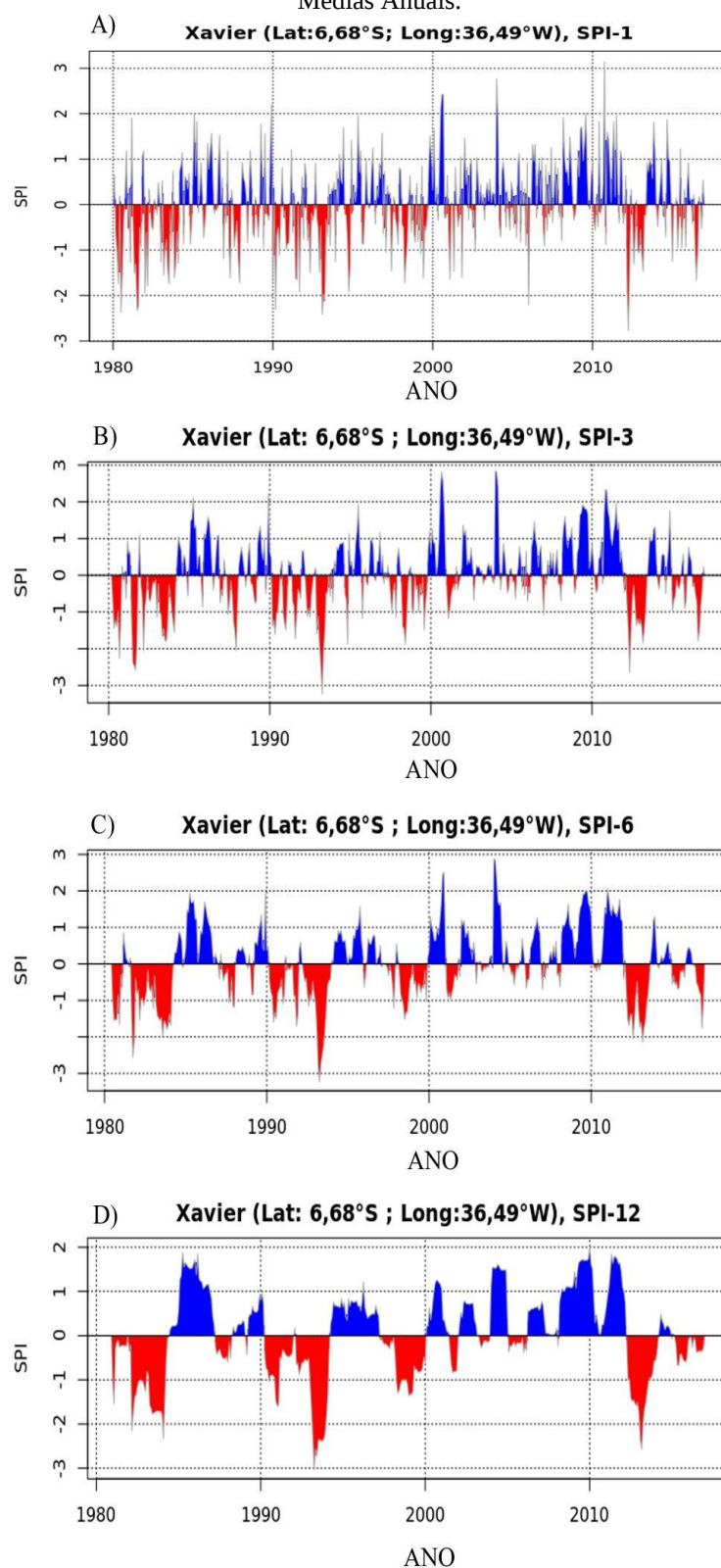
5.1 Variação temporal de SPI e SPEI

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram a variação temporal dos índices calculados com médias mensais, trimestrais, semestrais e anuais ao longo do intervalo de tempo entre os anos estudados (1980 a 2016).

Nos gráficos observa-se a variação dos índices para trimestres corridos tanto SPI como SPEI, aumentam conforme aumentam as frequências temporais.

Segundo Marengo; Cunha; Alves (2016) o evento de seca ocorrido entre 2012- 2015 foi considerada o pior nas últimas décadas, tendo sido devastador em diversos setores. Nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2 é possível observar valores próximos ao três negativo (-3) durante esse período.

Figura 5.1 Valores do SPI calculado com dados do Xavier et al. (2016) para a localização de Parelhas-RN considerando: A) Médias Mensais. B) Médias Trimestrais. C) Médias Semestrais. D) Médias Anuais.

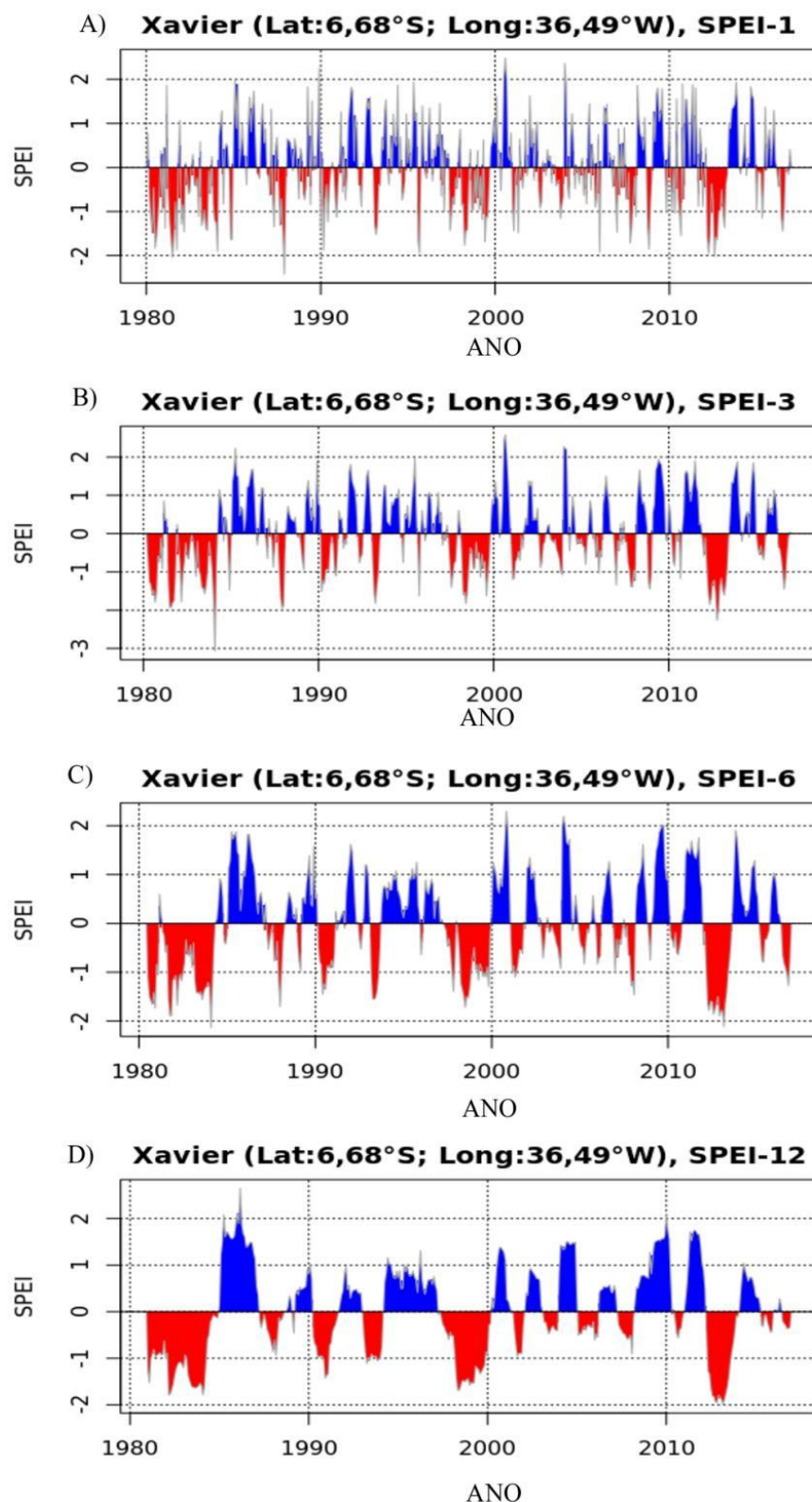


Fonte: AUTORA (2020).

Ao se comparar as variações temporais (Figuras 5.1 e 5.2) dos índices é visto que os dois são muito parecidos com períodos secos e úmidos que se diferenciam pouco em intervalo como entre os anos de 2010 e 2016. Esse intervalo diz respeito justamente a seca mais recente vivenciada pelo nordeste brasileiro.

Por está dentro do semiárido brasileiro se encaixa em uma região com baixos índices pluviométricos e altas médias de temperatura o que justifica os resultados encontrados na figuras 5.2. Esses resultados foram gerados utilizando médias de uma única estação pluviométrica.

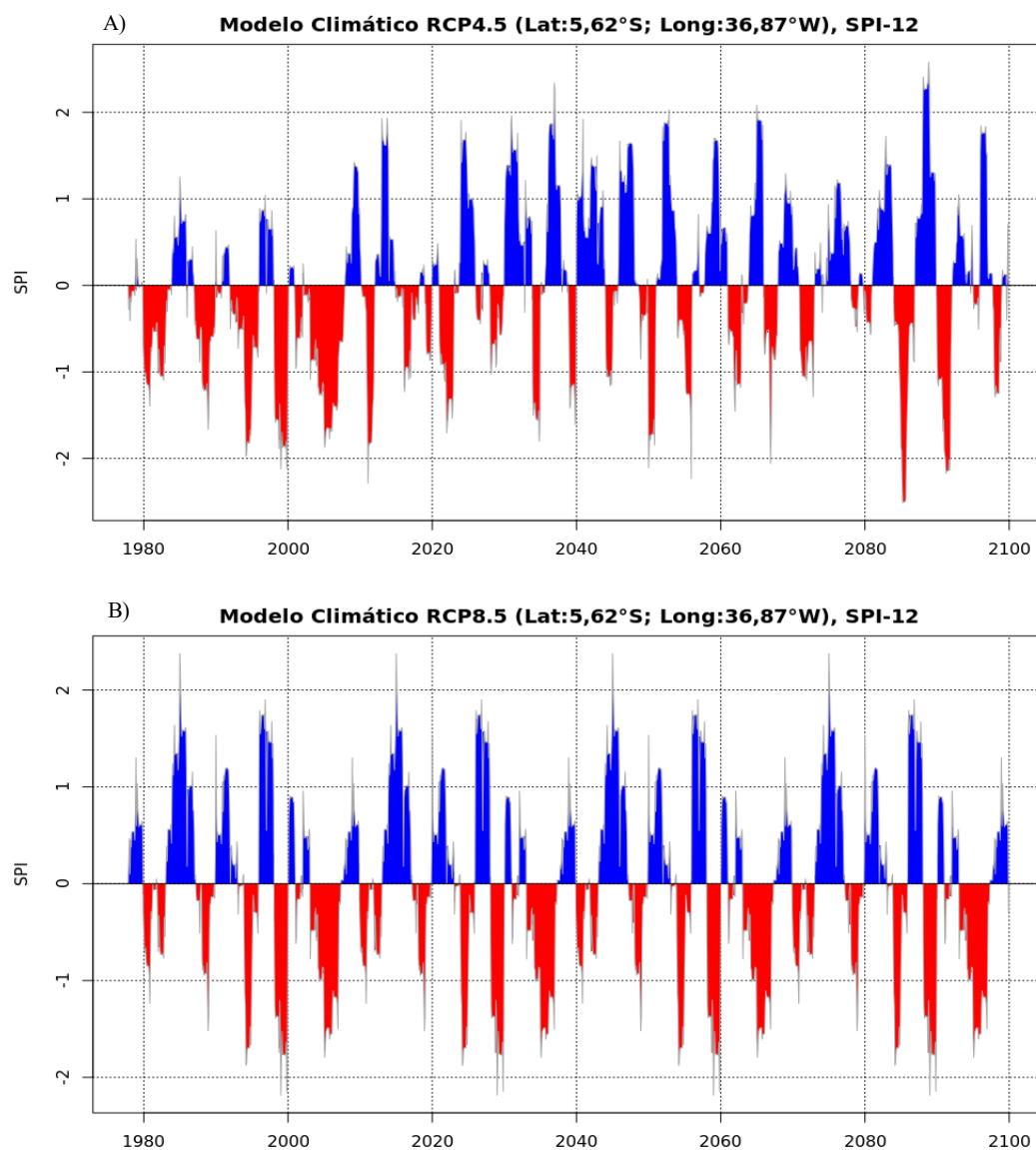
Figura 5.2. Valores de SPEI calculado com dados do Xavier et al. (2016) para a localização de Parelhas-RN considerando: A) Médias Mensais. B) Médias Trimestrais. C) Médias Semestrais. D) Médias Anuais.



Fonte: AUTORA (2020).

A figura 5.3A mostra a variação temporal do SPI considerando médias anuais para o ponto de latitude 5,62°S e longitude 36,87°W dentro da bacia do Piancó-Piranhas-Açú, esse ponto foi escolhido pois apresentou valores extremos. O índice foi calculado utilizando os dados do MIROC ,de acordo com o cenário RCP4.5, e a figura 5.3B mostra os valores do SPI para o mesmo ponto, para o cenário RCP8.5. É possível observar que em ambos os cenários os eventos de seca são frequentes para o futuro, porém não são duradouros.

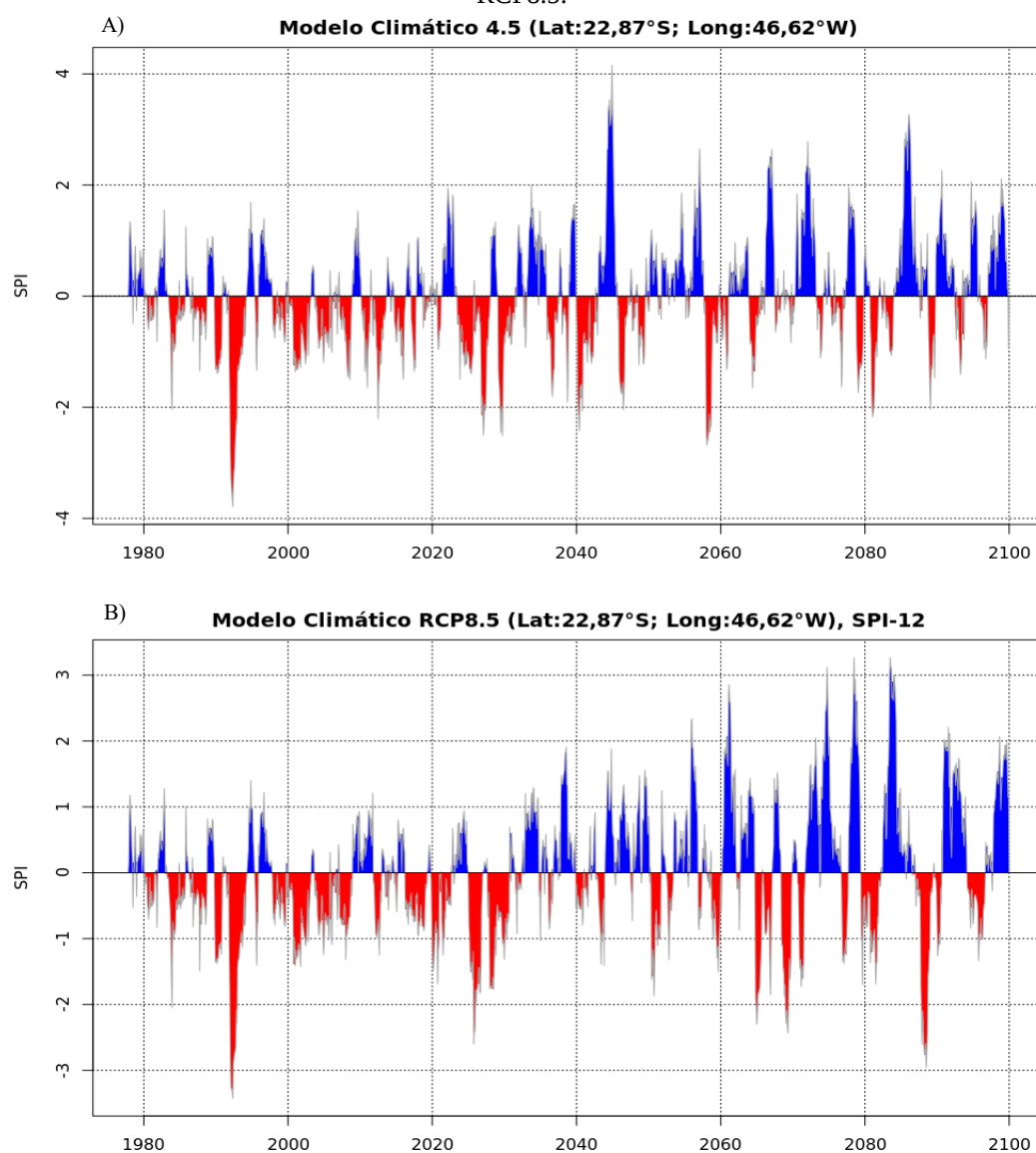
Figura 5.3. Valores de SPI calculado com dados do MIROC para a localização dentro da bacia do Piancó-Piranhas-Açú considerando médias anuais: A) Modelo Climático RCP4.5 . B) Modelo Climático RCP8.5.



Fonte: AUTORA (2021).

A figura 5.4 mostra os valores do SPI para as médias anuais de um ponto dentro da bacia do Piracicaba com coordenadas iguais a 22,87°S e 46,62°W, assim como na figura 5.3 esse ponto foi escolhido por apresentar valores extremos de severidade dentro do território da bacia. A figura 5.4A mostra a variação temporal para o cenário RCP4.5, enquanto a figura 5.4B mostra a variação para o cenário RCP8.5 é possível ver que a frequência nos eventos de seca aumenta no cenário mais péssimista assim como a intensidade da mesma.

Figura 5.4. Valores de SPI calculado com dados do MIROC para a localização dentro da bacia do Piracicaba considerando médias anuais: A) Modelo Climático RCP4.5 . B) Modelo Climático RCP8.5.



Fonte: AUTORA(2021).

5.2 Análise de Sensibilidade de SPI e SPEI

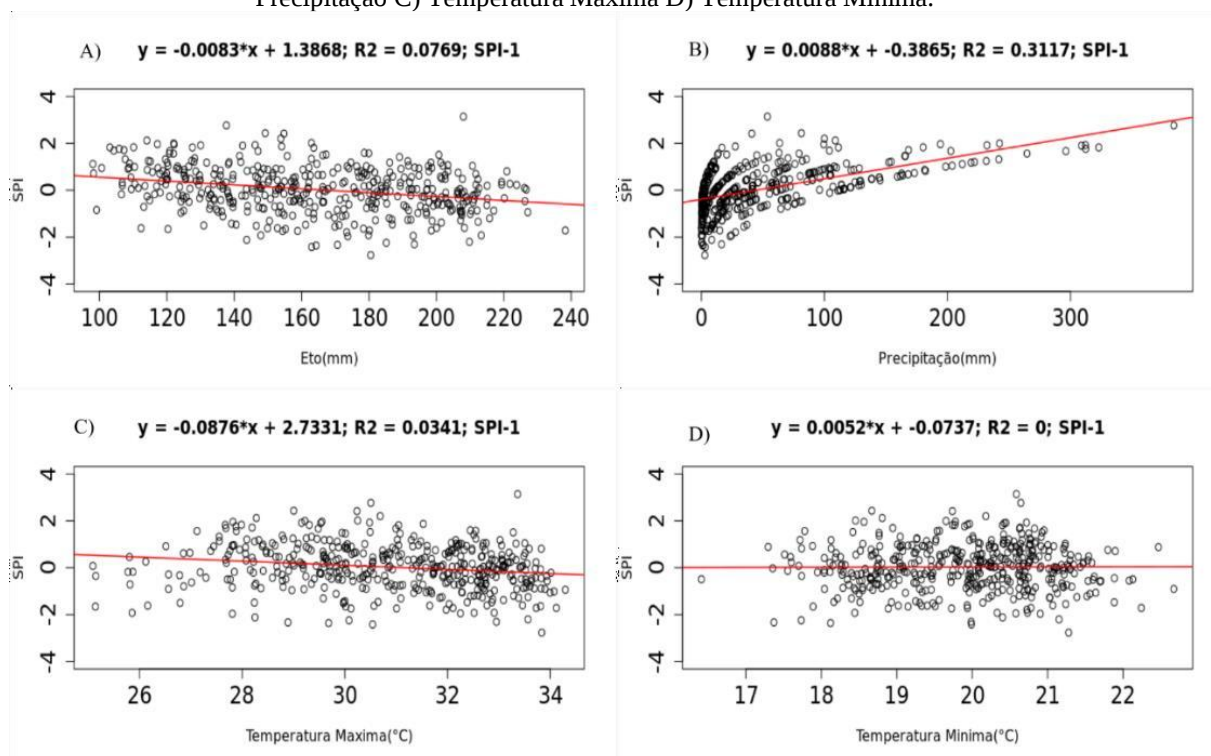
Os valores dos índices, SPI e SPEI, podem ser alterados devido as variáveis que possam estar inseridas em seus cálculos. Inicialmente são dados de entrada efeitos: de temperatura, evapotranspiração e precipitação; posteriormente pode-se dizer que devido ao método que é utilizado para a determinação da evapotranspiração efeitos de outras variáveis são sentidos nos valores dos índices, que seria o caso do método de Penman-Montheith, que foi utilizado nos cálculos dos dados de evapotranspiração utilizados e assim pode-se dizer que variáveis como: irradiância solar incidente, velocidade do vento e umidade relativa também têm influência nos cálculos.

O valor dos índices (SPI e SPEI) aumentam com a precipitação, pois quanto mais precipitação pluviométrica mais úmido está o período avaliado, que conforme mencionado anteriormente, neste trabalho é dado por valores positivos dos índices. O contrário ocorre com a evapotranspiração, o valor dos índices diminui pois quanto maior a evapotranspiração mais água está sendo perdida para o ambiente e mais seco se encontra o período de tempo que está sendo analisado. O mesmo ocorre com as temperaturas conforme os valores das mesmas aumentam, maior a perda de água e consequentemente mais seco fica o ambiente, o que resulta numa diminuição dos valores de ambos os índices (SPI e SPEI).

5.2.1 SPI

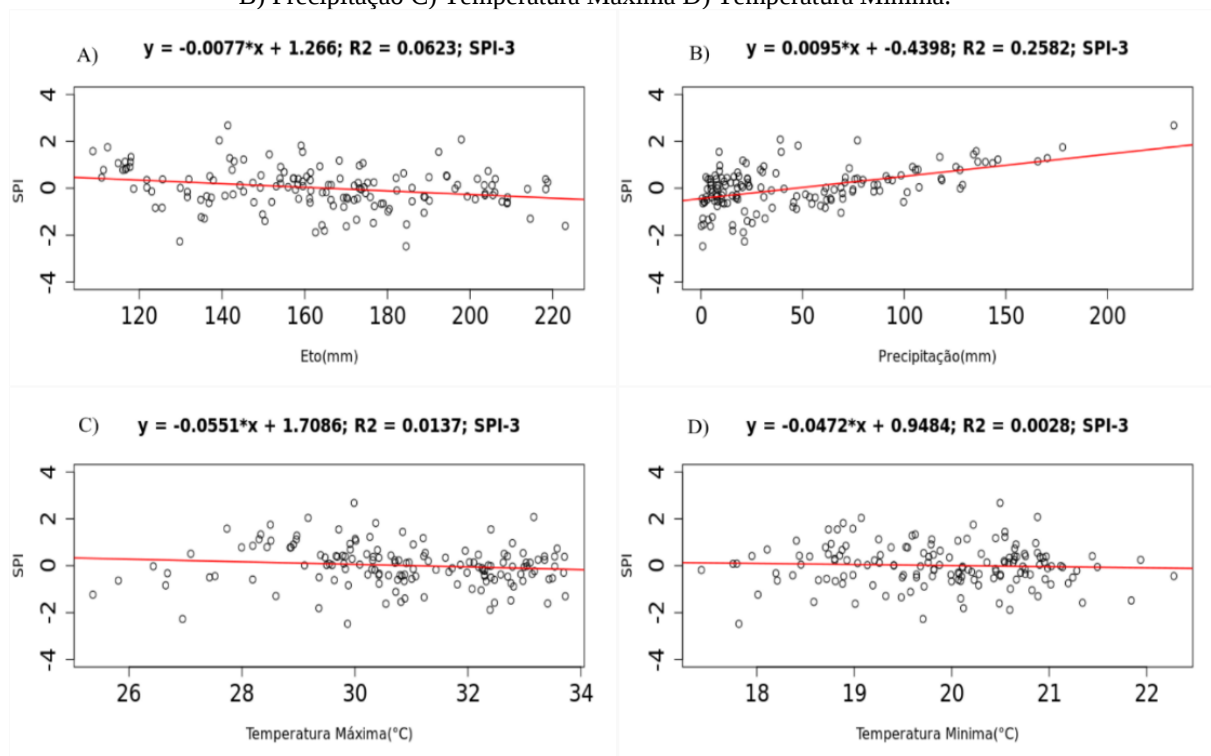
O cálculo do índice SPI foi feito com o acumulado de médias para um, três, seis e doze meses, assim na Figura 5.5 podemos observar a regressão linear entre o SPEI e as demais variáveis utilizadas, para médias mensais. Salientando que esse índice leva em consideração apenas a precipitação. Ao observar os gráficos gerados observa-se que a maior sensibilidade do índice está justamente na precipitação, pois seus valores do coeficiente de determinação (R^2) são maiores para a mesma do que comparado aos valores para as outras variáveis.

Figura 5.5 Relação entre SPI e Variáveis considerando médias mensais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

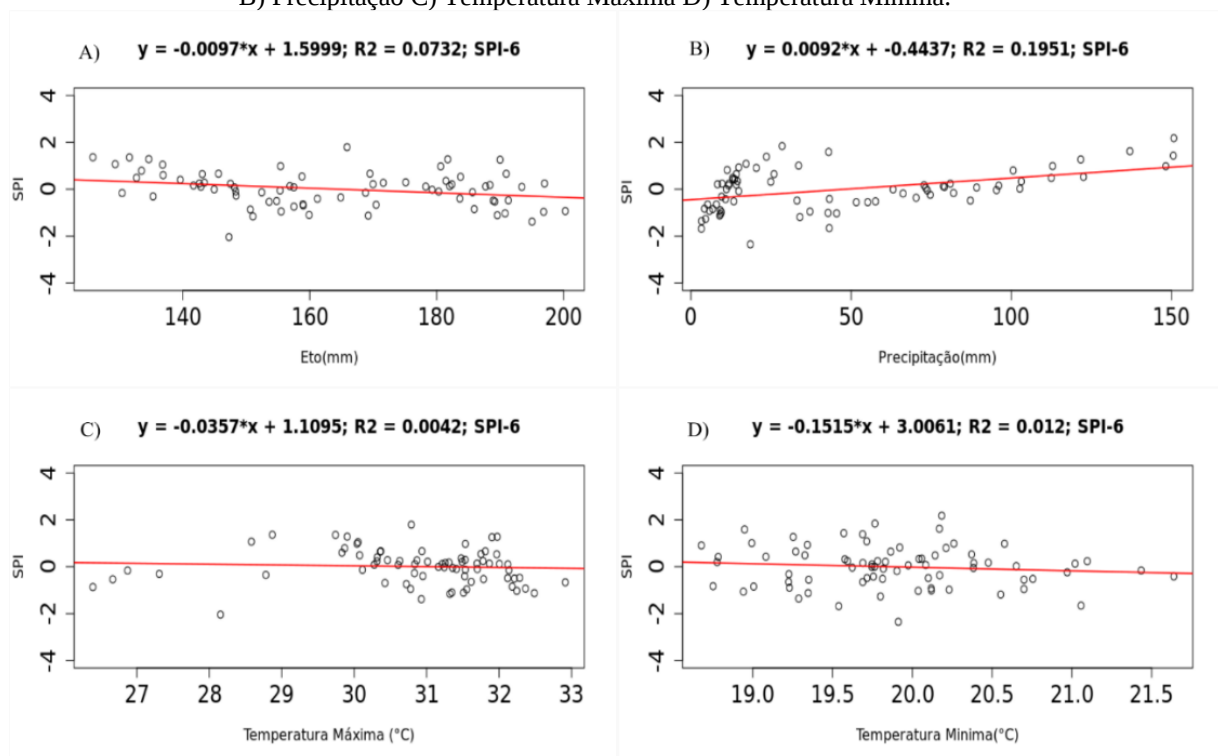
Figura 5.6. Relação entre SPI e Variáveis considerando médias trimestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram uma queda dos valores do coeficiente de determinação em relação as médias mensais e trimestrais, enquanto a Figura 5.7 um aumento quando considerado o período de seis meses, chegando a um R^2 igual a 84,9% quando calculado as médias anuais. Indicando que nesses períodos a sensibilidade entre o índice e a precipitação diminui, ou seja, a precipitação exerce menos influência em médias mensais e trimestrais, porém mesmo nessas situações a precipitação é a variável que o índice tem maior resposta.

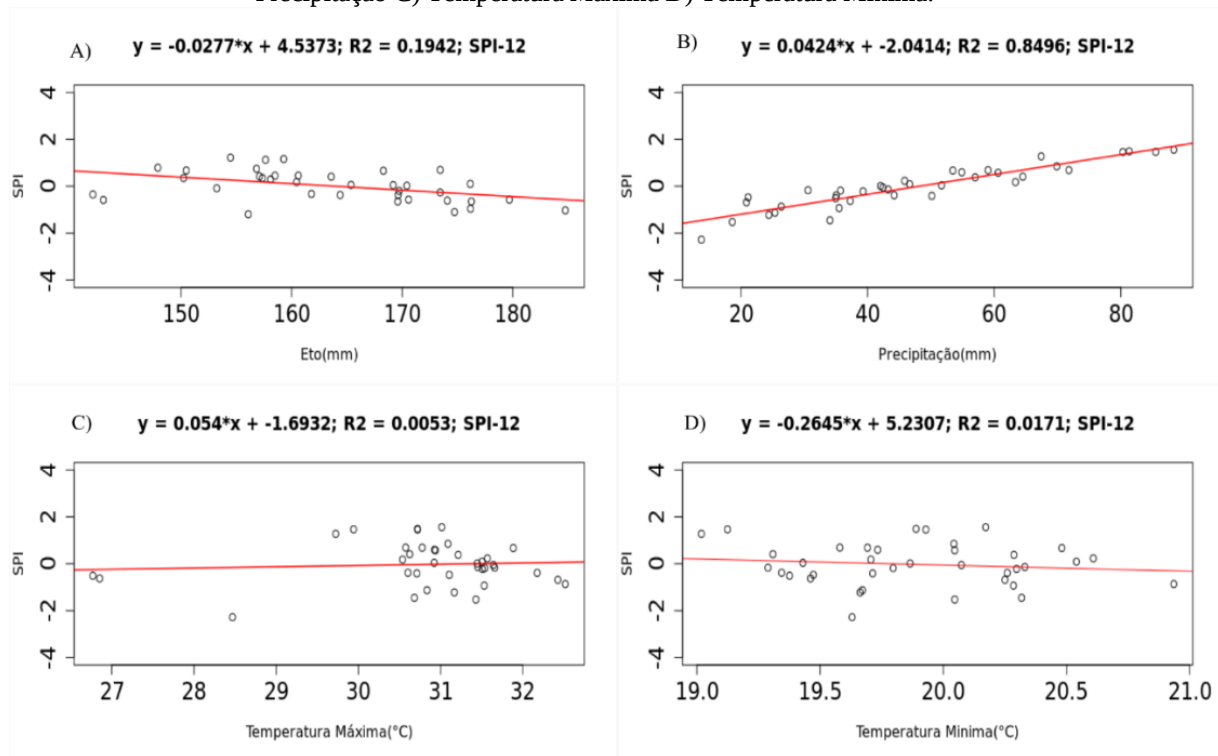
Figura 5.7. Relação entre SPI e Variáveis considerando médias semestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

As retas de regressão em todas as Figuras, para as seguintes variáveis: evapotranspiração; temperaturas máxima e mínima, apresentam valores negativos que indicam uma diminuição nos valores do SPI. Em contrapartida as retas que representam a regressão entre o índice e as precipitações apresentam valores positivos, que explica o por que o valor do índice aumentar nesses casos.

Figura 5.8 Relação entre SPI e Variáveis considerando médias anuais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

5.2.2 SPEI

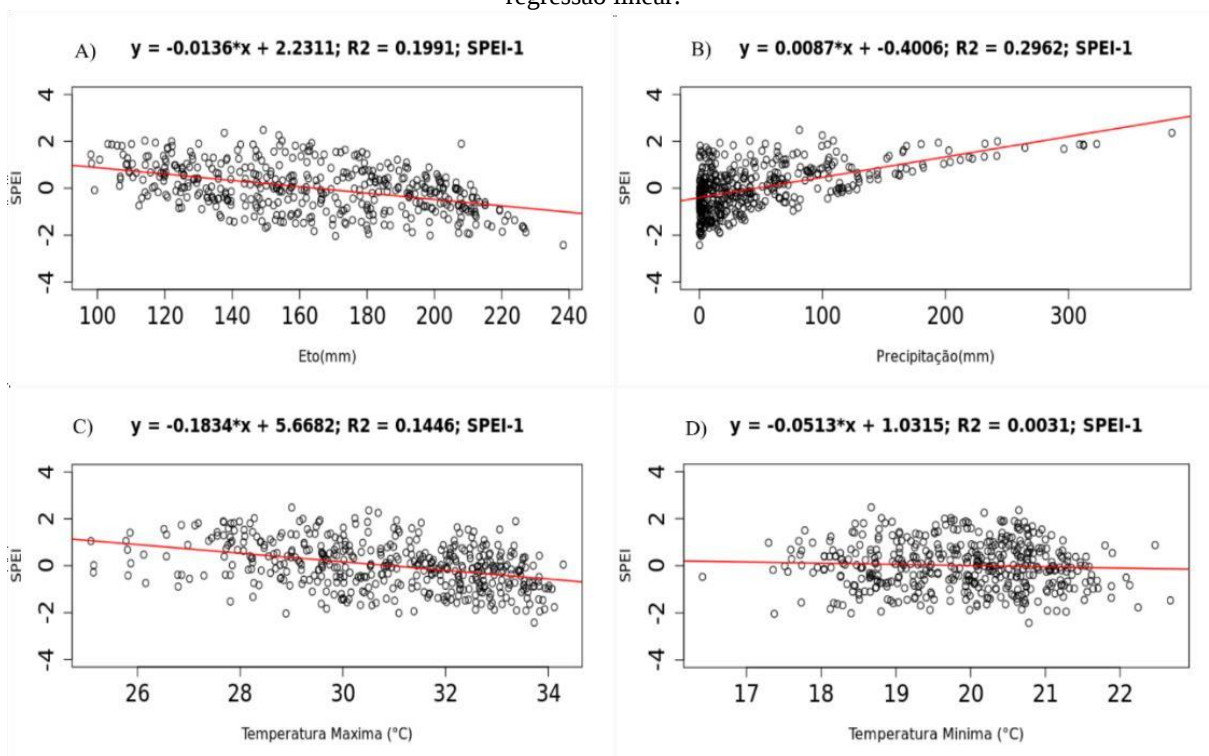
O cálculo do índice SPEI assim como para o SPI foi feito para um, três, seis e doze meses, assim na Figura 5.9 podemos observar a regressão linear entre o SPEI e as demais variáveis utilizadas, para médias mensais. O SPEI leva em consideração o balanço entre evapotranspiração potencial e a precipitação sendo esse o principal motivo de o mesmo obter um maior valor de R^2 quando comparado à precipitação e a evapotranspiração, seguidos pelas temperaturas máxima e mínima.

O mesmo padrão pode ser observado para a regressão com médias trimestrais, semestrais e anuais, porém com valores menores para as médias trimestrais e semestrais voltando a se elevar quando se utilizam as médias anuais. As Figuras mostram a maior correlação entre o índice e a precipitação e a evapotranspiração, chegando a alcançar um R^2 de até 65 %. Isso mostra que

mesmo sendo calculado utilizando-se do balanço entre esses dois dados o SPEI é mais sensível e dependente da precipitação local.

As Figuras 5.9A e C mostram que os valores do SPEI diminuem conforme os valores das variáveis aumentam, isso porém não acontece na Figura 5.9B pois o coeficiente angular da reta de regressão é positivo. A Figura 5.7D possui apenas um valor nulo para SPEI, isso se atribui a um R^2 igual a zero e um coeficiente angular negativo e de valor muito baixo.

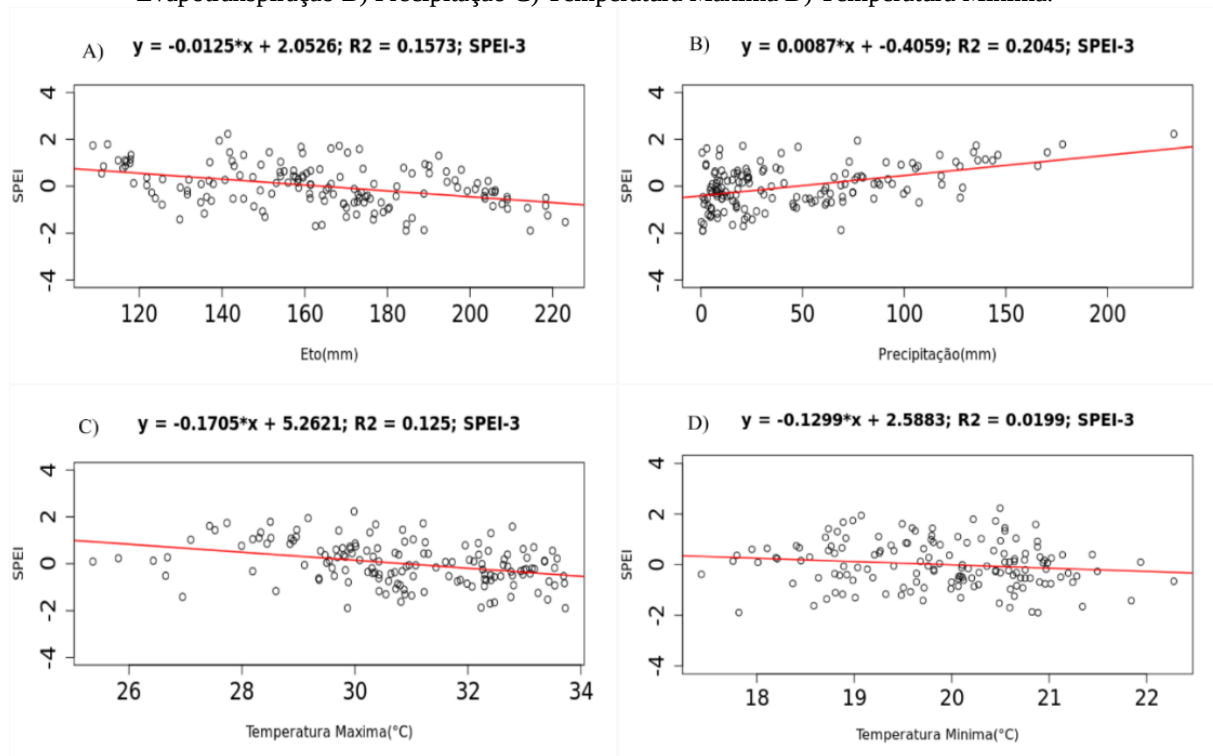
Figura 5.9. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias mensais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima. Em vermelho, a reta de regressão linear.



Fonte: AUTORA (2020).

Para médias trimestrais (Figura 5.10) o SPEI aumenta somente conforme aumenta a precipitação, e é inversamente proporcional as demais variáveis (evapotranspiração, temperaturas máximas e mínimas), ou seja, conforme os valores das variáveis aumenta o SPEI diminui. Isso é coerente, pois os valores dos coeficientes angulares são negativos na Figura 5.10A, C, D.

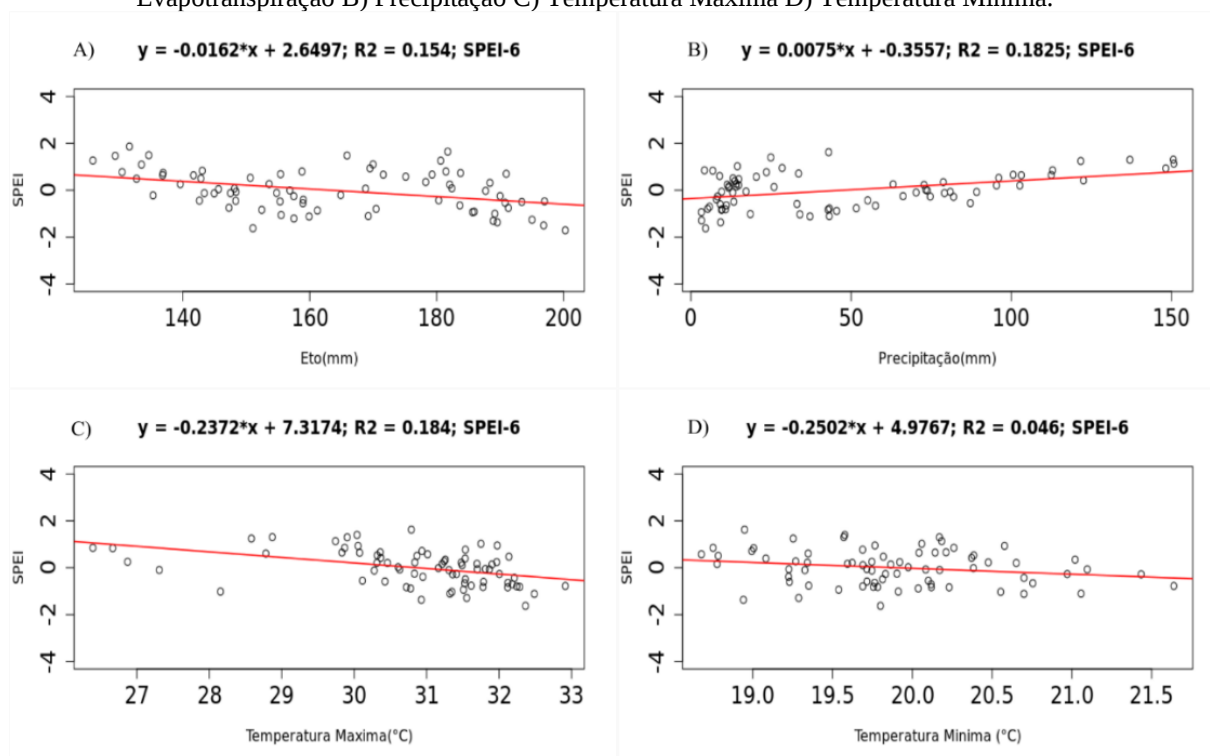
Figura 5.10. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias trimestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

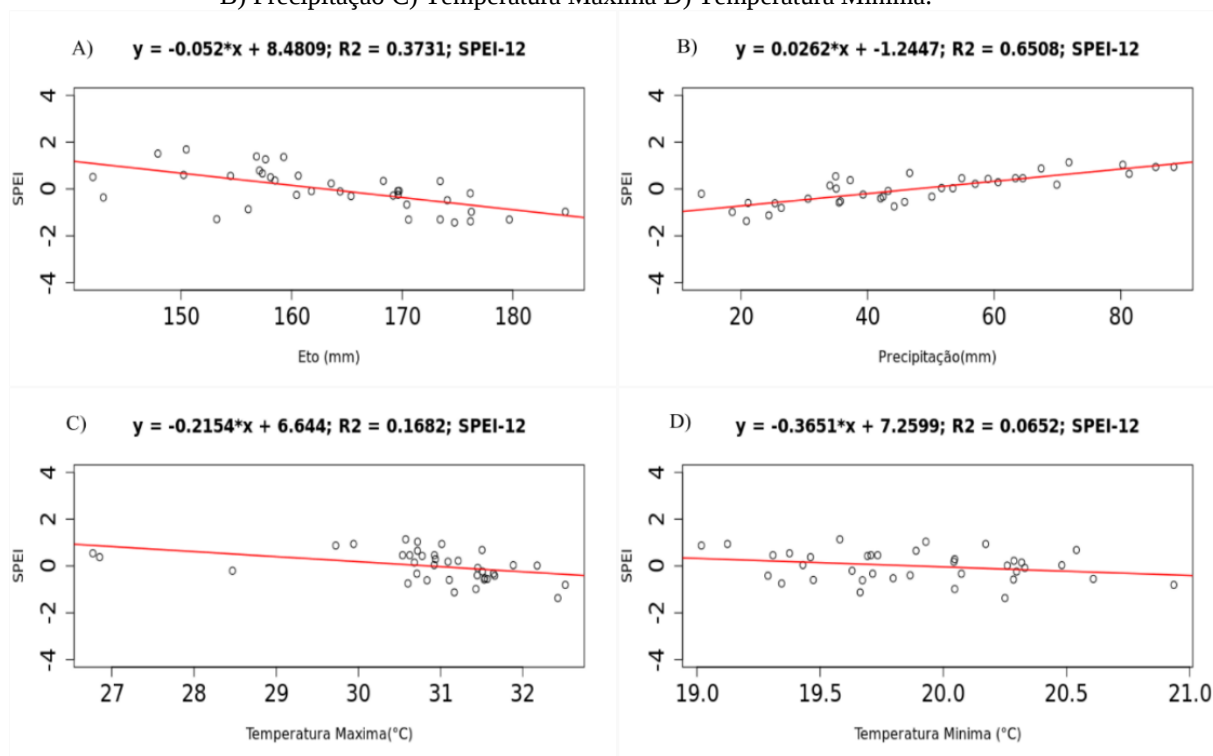
As Figuras 5.10A, C, D e 5.11A, C, D apresentam retas com coeficientes angulares negativos o que explica a diminuição dos valores do SPEI enquanto as Figuras 5.11B e 5.12B possuem valores positivos assim as retas mostram um aumento nos valores do índice.

Figura 5.11. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias Semestrais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

Figura 5.12. Relação entre SPEI e Variáveis considerando médias anuais. A) Evapotranspiração B) Precipitação C) Temperatura Máxima D) Temperatura Mínima.



Fonte: AUTORA (2020).

A tabela 5.1 é o comparativo dos valores de coeficiente e da correlação, nela é possível observar melhor como ocorre a variação dos valores em relação aos índices e as variáveis. Por fim é perceptível que a precipitação, é a variável que mais influencia o comportamento dos índices, mesmo o SPEI.

Tabela 5.1. Comparativo dos valores de coeficientes angulares e correlação (R^2) dos índices SPI e SPEI para médias mensais, trimestrais, semestrais e anuais em relação a precipitação, evapotranspiração, temperaturas máxima e mínima.

SPI		1 Mês	3 Meses	6 Meses	1 ano
Precipitação	Coeficiente Angular	0,0088	0,0095	0,0092	0,0424
	R^2	0,3117	0,2582	0,1951	0,8496
Evapotranspiração	Coeficiente Angular	-0,0083	-0,0077	-0,0097	-0,0277
	R^2	0,0769	0,0623	0,0732	0,1942
Temp. Máxima	Coeficiente Angular	-0,0876	-0,0551	-0,0357	0,0144
	R^2	0,0341	0,0137	0,0042	0,0007
Temp. Mínima	Coeficiente Angular	0,0052	-0,0472	-0,1515	-0,2645
	R^2	0	0,0028	0,012	0,0171
SPEI		1 Mês	3 Meses	6 Meses	1 ano
Precipitação	Coeficiente Angular	0,009	0,0087	0,0075	0,0262
	R^2	0,3183	0,2045	0,1825	0,6508
Evapotranspiração	Coeficiente Angular	-0,0136	-0,0125	-0,0162	-0,052
	R^2	0,1991	0,1573	0,154	0,3731
Temp. Máxima	Coeficiente Angular	-0,1834	-0,1705	-0,2372	-0,2154
	R^2	0,1446	0,125	0,184	0,1682
Temp. Mínima	Coeficiente Angular	-0,0513	-0,1299	-0,2502	-0,3651
	R^2	0,0031	0,0199	0,046	0,0652

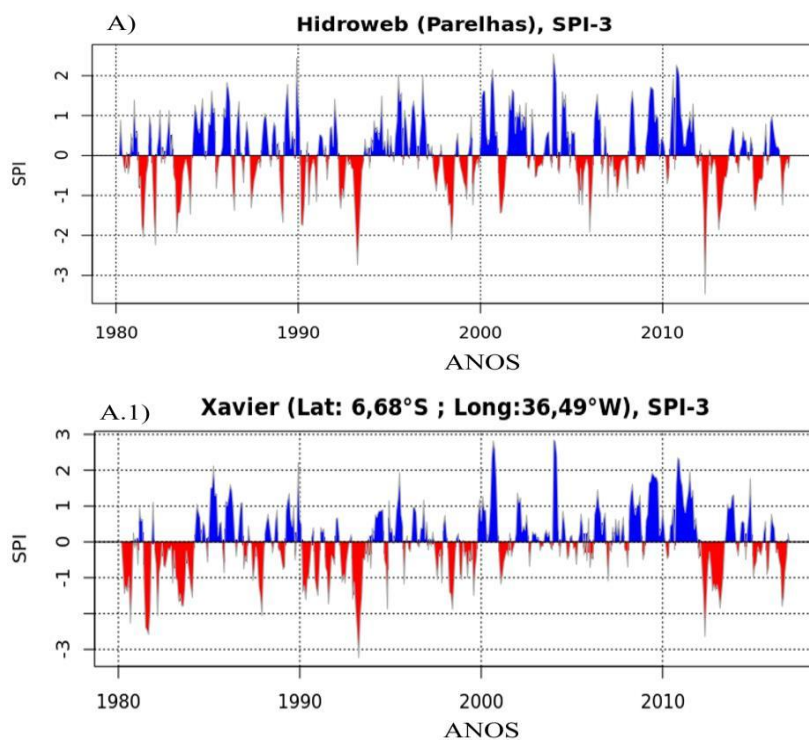
Fonte: AUTORA (2020).

5.3 Validação dos Dados do Xavier para aplicação do SPI/SPEI

Utilizando dados observados obtidos através do Portal Hidroweb para a estação Parelhas, dados interpolados do XAVIER *et al.* (2016) e o pacote SPEI foi gerado gráficos do SPI para fins de validar o uso dos dados do XAVIER *et al.* (2016) para o cálculo do índices SPI. Como se observa nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 os valores do SPI obedece o mesmo padrão quando calculado tanto com dados do Portal Hidroweb quanto dados do XAVIER *et al.* (2016).

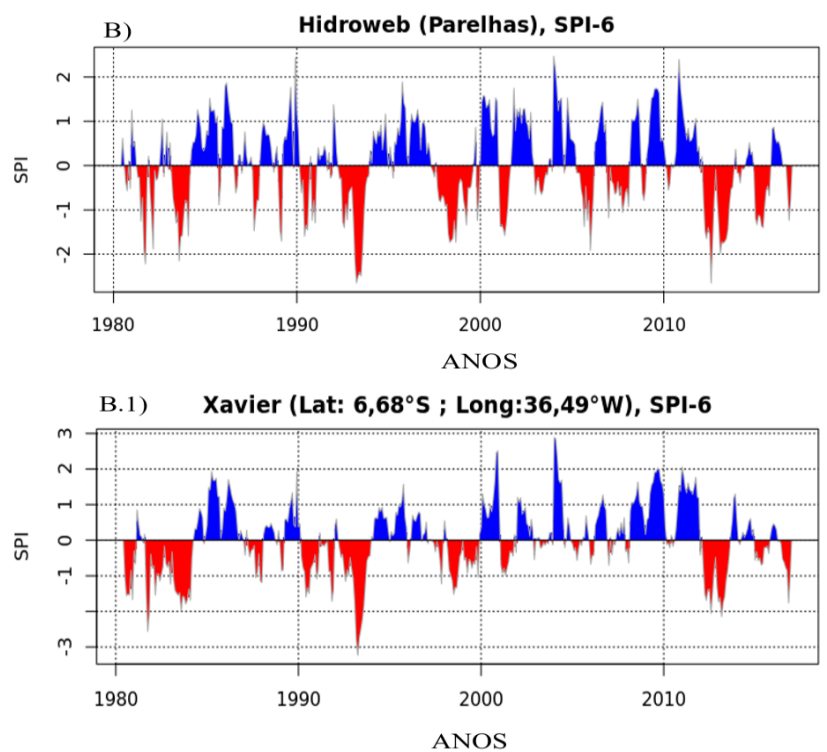
A Figura 5.13A mostra valores para o SPI com médias trimestrais de precipitação utilizando os dados do Hidroweb e a Figura 5.13A.1 mostra o SPI com dados do XAVIER *et al.* (2016) e pode-se observar que os valores não se diferem de maneira significativa.

Figura 5.13. Índice SPI considerando médias trimestrais. A) Dados do Portal Hidroweb A.1) Dados do Xavier.



Fonte: AUTORA (2020).

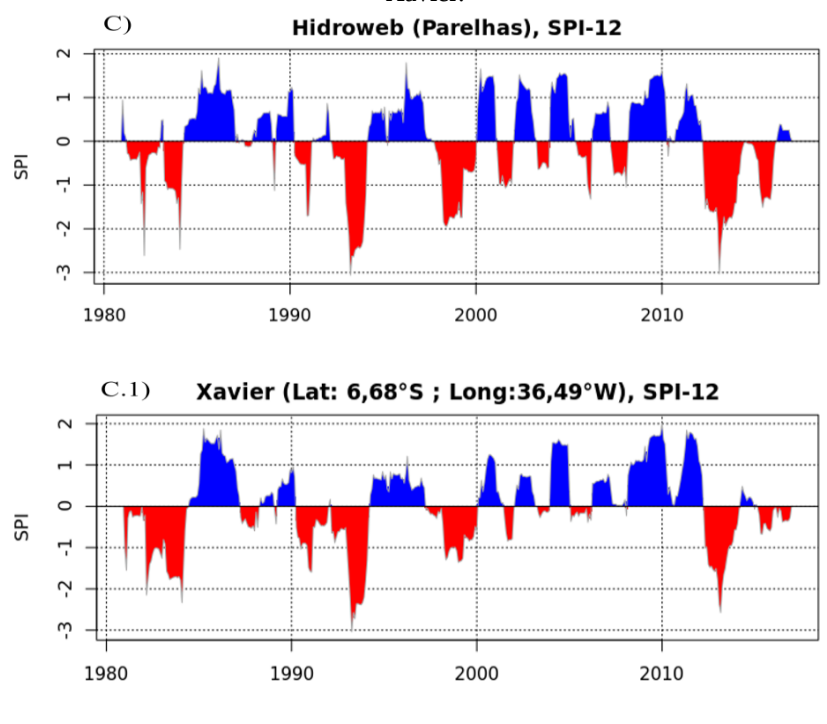
Figura 5.14. Índice SPI considerado médias semestrais. B) Dados do Portal Hidroweb B.1) Dados do Xavier.



Fonte: AUTORA (2020).

As Figuras 5.14 e 5.15 seguem o mesmo padrão visto na Figura 5.11 e com maior espessura dos gráficos, isso se dá devido ao aumento da janela temporal das médias.

Figura 5.15. Índice SPI considerando médias anuais. C) Dados do Portal Hidroweb C.1) Dados do Xavier.

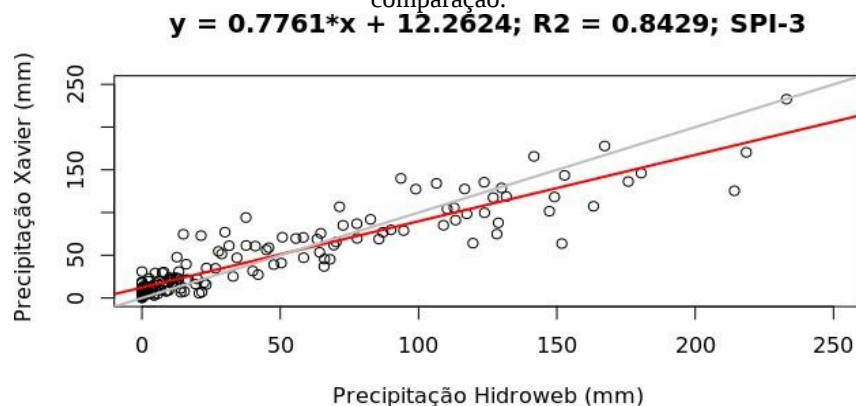


Fonte: AUTORA (2020).

Além dos gráficos do SPI foram gerados gráficos de dispersão a fim de obter valores de correlação entre os dados de precipitação obtidos pelo Portal Hidroweb e pelo XAVIER *et al* (2016).

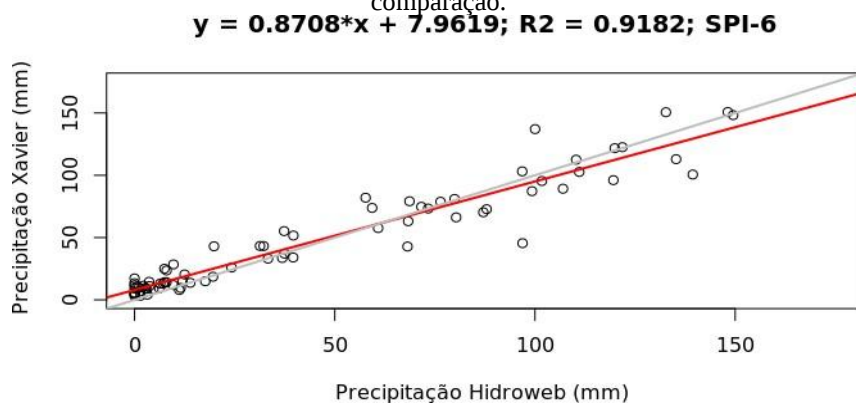
Na Figura 5.16 a correlação (R^2) entre os dados é de 84,3% com médias trimestrais, e para médias semestrais tem uma correlação de 91,8% e na Figura 5.18 para médias anuais a correlação tem uma diminuição do seu valor.

Figura 5.16. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias trimestrais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.



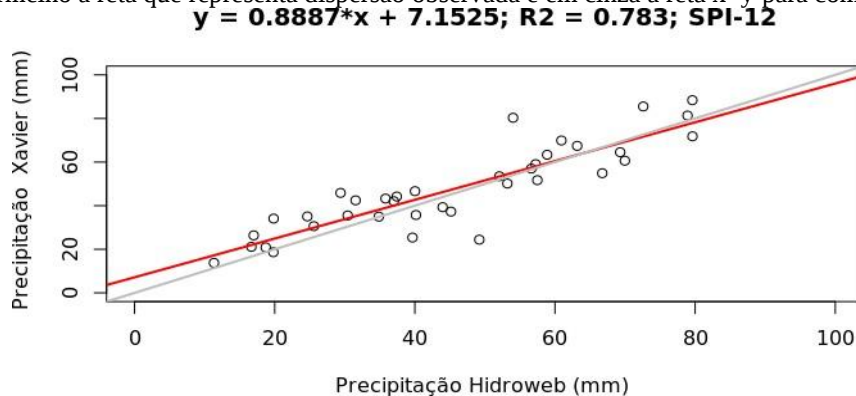
Fonte: AUTORA (2020).

Figura 5.17. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias semestrais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.



Fonte: AUTORA (2020)

Figura 5.18. Gráfico de Dispersão entre dados do Portal Hidroweb e Xavier para médias anuais. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação.

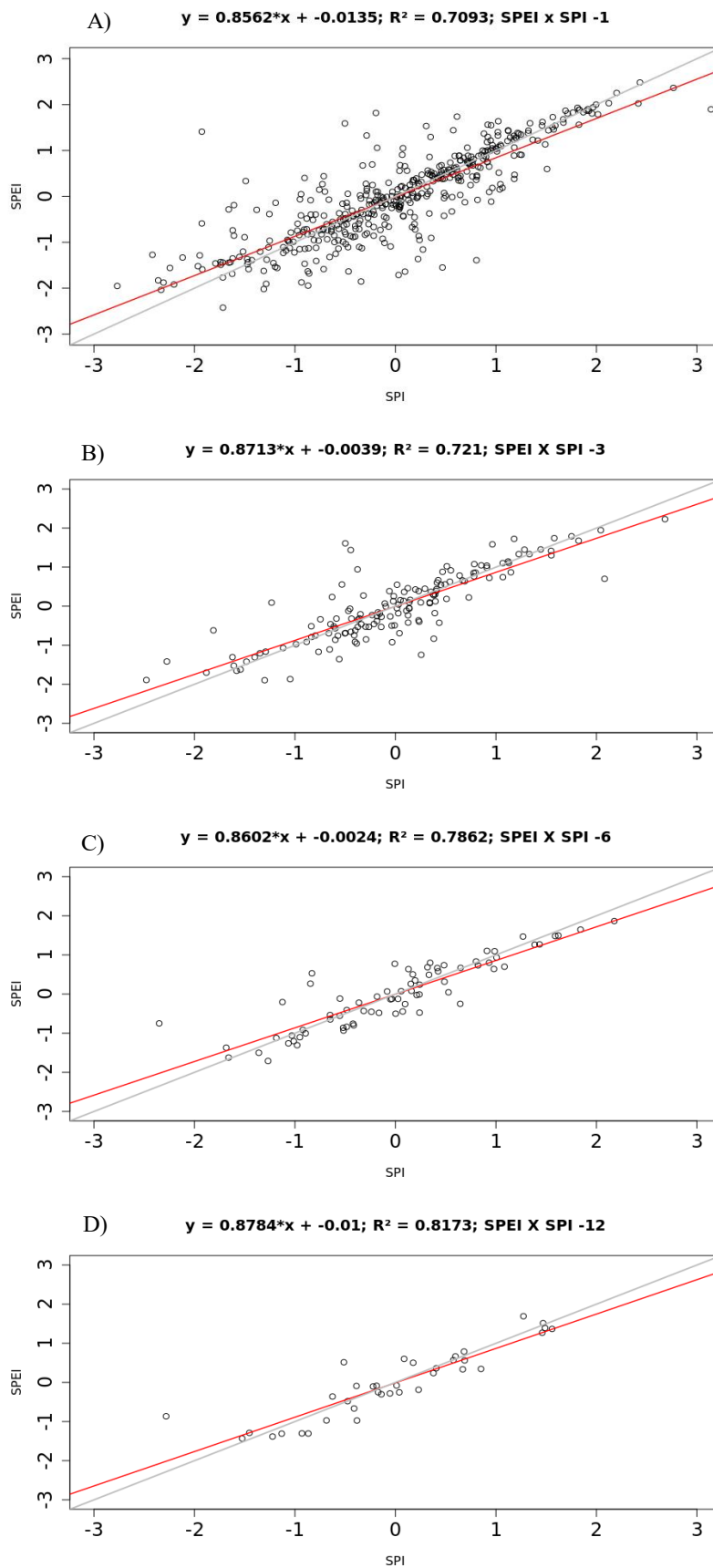


Fonte: AUTORA (2020).

Ao se analisar os gráficos observa-se que os dados do XAVIER *et al.* (2016) são suavizados, visto que diminuem maiores precipitações e acentua precipitações menores.

Por último a figura 5.19 mostra a correlação entre os índices SPI e SPEI, é possível observar que apesar de utilizarem entradas de variáveis diferentes os índices possuem uma correlação maior que 70% para todas as janelas temporais. Conforme se aumenta a janela temporal ocorre um aumento nos valores de correlação, sendo o maior valor de R^2 obtido para as médias anuais demonstrando que conforme a janela temporal aumenta os índices tendem a apresentarem valores mais próximos, é possível observar também uma diminuição na suavização dos valores pois os a reta de dispersão se aproxima da reta $x=y$.

Figura 5.19. Gráfico de Dispersão entre os índices SPI e SPEI. Em vermelho a reta que representa dispersão observada e em cinza a reta $x=y$ para comparação. A) Médias mensais. B) Médias trimestrais. C) Médias semestrais. D) Médias anuais.

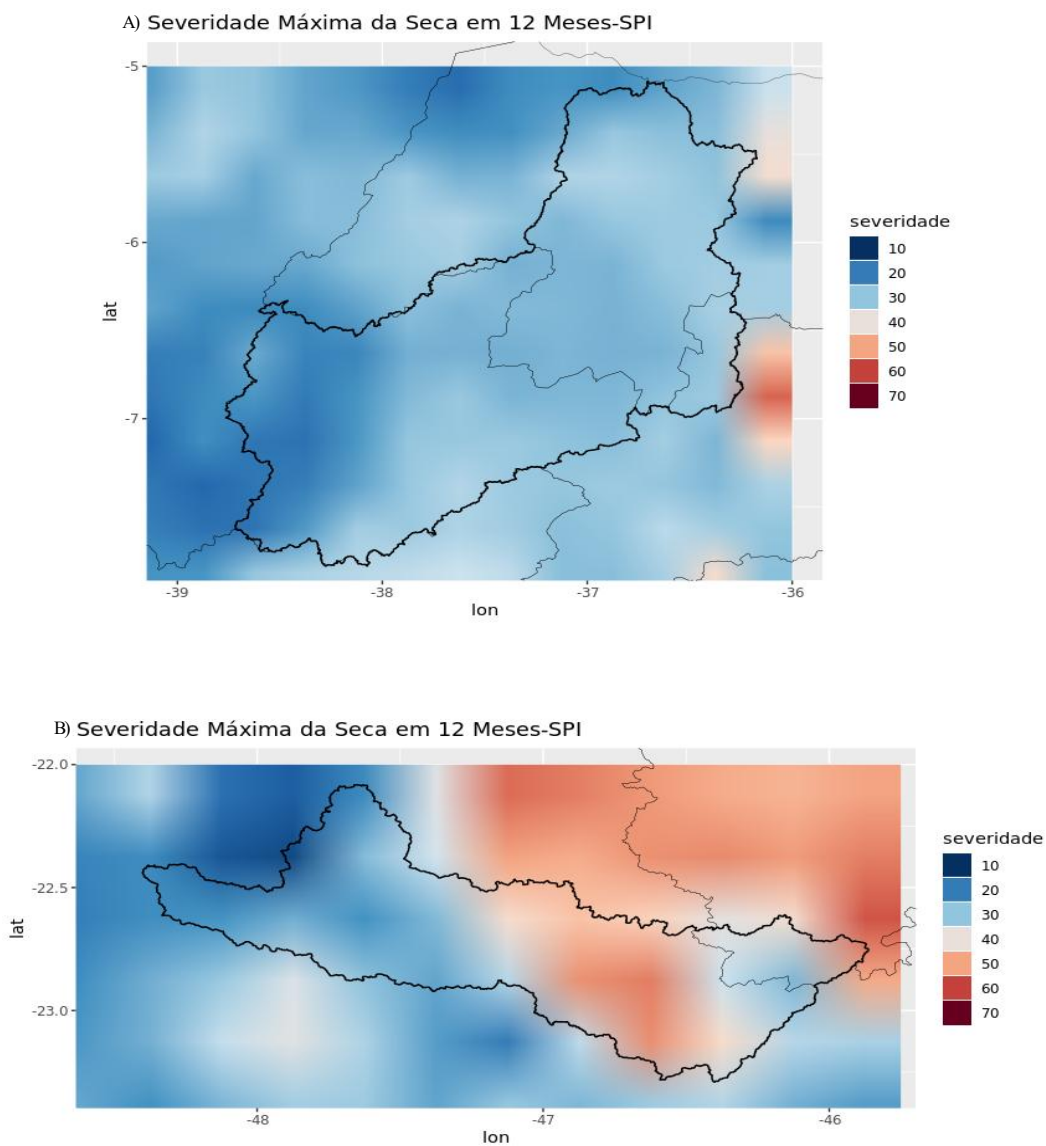


Fonte: AUTORA (2020).

5.4 Análise Espacial da Série Histórica

A Figura 5.20 mostra os resultados do cálculos da severidade máxima da seca para a bacia do Piancó-Piranhas-Açú e para a bacia do Piracicaba feitos utilizando o SPI com dados do Xavier, para a média de dozes meses (anuais) durante todo o período estudado (1980 a 2016). É possível observar que a bacia do Piancó-Piranhas-Açú (figura 5.20A) apresenta os valores mais altos na parte baixa da bacia (ao norte). Enquanto a figura 5.20B mostra a variação para a bacia do Piracicaba, onde os maiores valores de severidade se apresentam na parte média da bacia, tendo valores menores na parte mais alta da bacia onde se encontra a região da Serra da Mantiqueira. A bacia do Piracicaba apresenta maiores valores de severidade em comparação a bacia do Piancó-Piranhas-Açú, apesar das características da região semiárida.

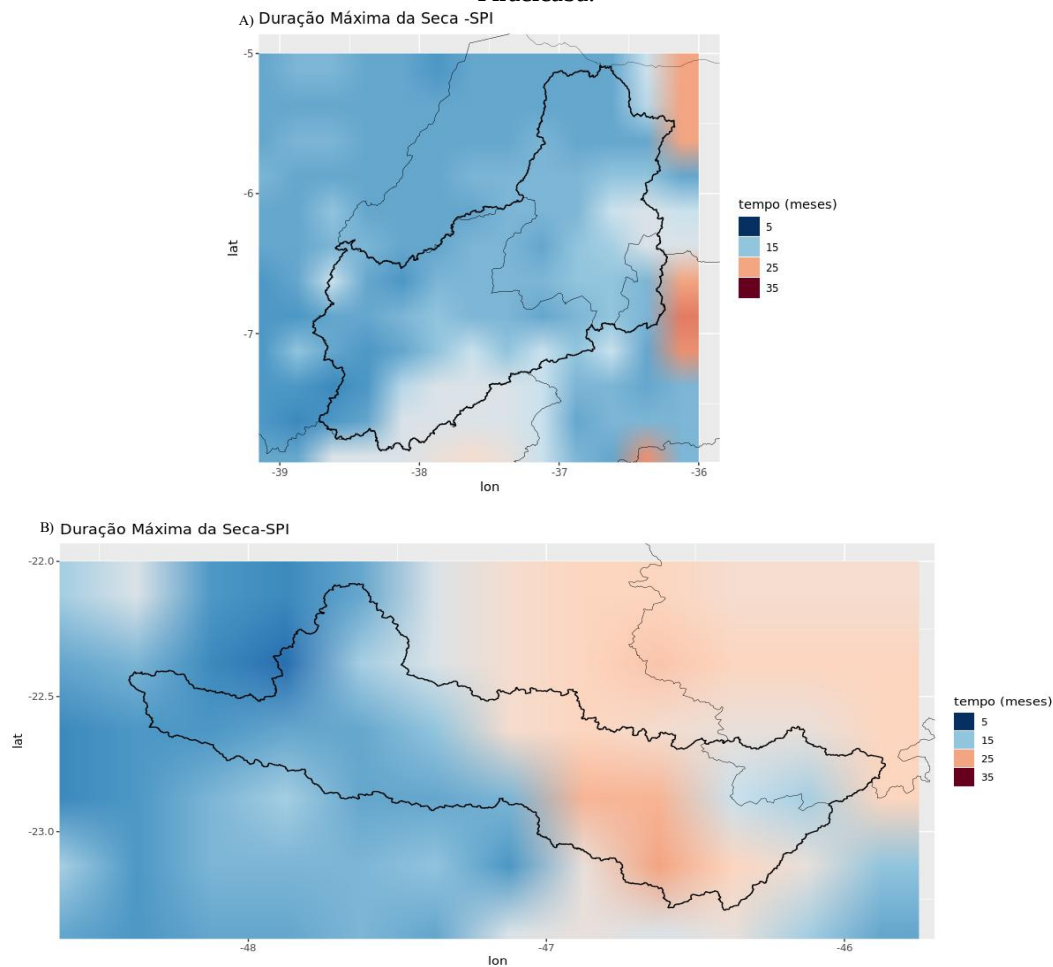
Figura 5.20. Severidade Máxima da Seca em 12 meses para o SPI. A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açu. B) Bacia do Piracicaba



Fonte: AUTORA (2021).

A figura 5.21A apresenta a duração máxima da seca na bacia do Piancó-Piranhas-Açu, que segue o mesmo padrão da severidade máxima, com valores maiores na região mais baixa da bacia e também na parte de sul. No que diz respeito a bacia do Piracicaba, figura 5.21B, o SPI apresenta as secas mais duradouras ocorrendo na parte média da bacia.

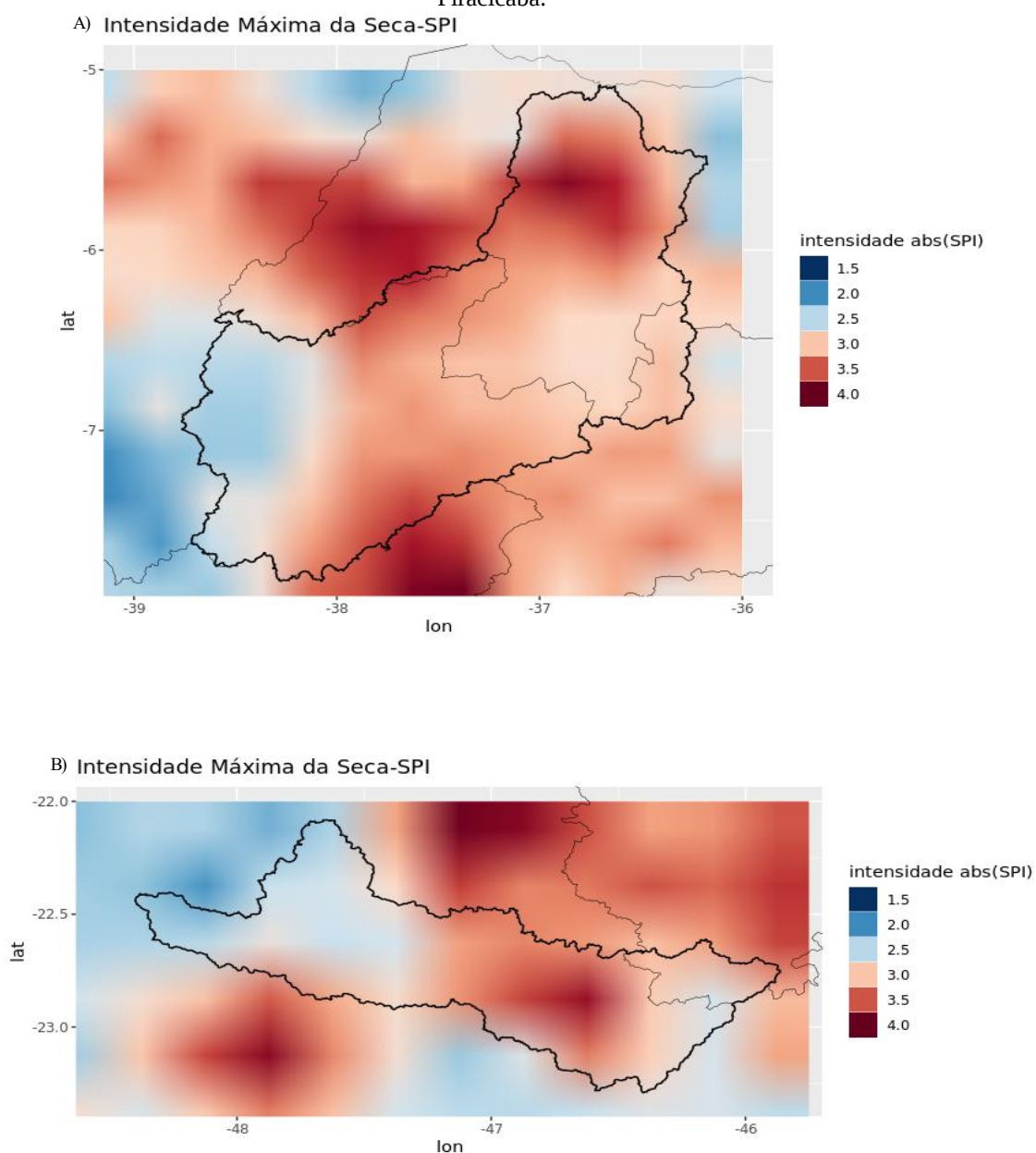
Figura 5.21. Duração Máxima da Seca para o SPI. A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. B) Bacia do Piracicaba.



Fonte: AUTORA(2021).

A intensidade máxima da seca é observada na figura 5.22A para a bacia do Piancó-Piranhas-Açú, e 5.22B para a bacia do Piracicaba. A intensidade foi calculada de acordo com o SPI, e apresenta valores altos em quase toda a bacia do semiárido, tendo seus menores valores na parte mais alta da bacia que possui os maiores índices pluviométricos da mesma. A bacia do Piracicaba apresenta secas com maior intensidade na região média da bacia, se aproximando da região mais alta.

Figura 5.22. Intensidade Máxima da Seca. A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. B) Bacia do Piracicaba.



Fonte: AUTORA (2021).

Os valores de severidade médios e máximos (percentil de 90%) na tabela 5.2 mostram como as secas que atingem a bacia do Piracicaba são mais severas e duradouras que as que atingem a bacia do Piancó-Piranhas-Açú, porém a intensidade das secas que atingem a bacia do semiárido é maior, o que se deve ao clima da região em que a mesma se encontra.

Tabela 5.3. Valores Médias e Máximos de Severidade Duração e Intensiade da Seca para as bacias do Piancó-Piranhas-Açú e Piracicaba.

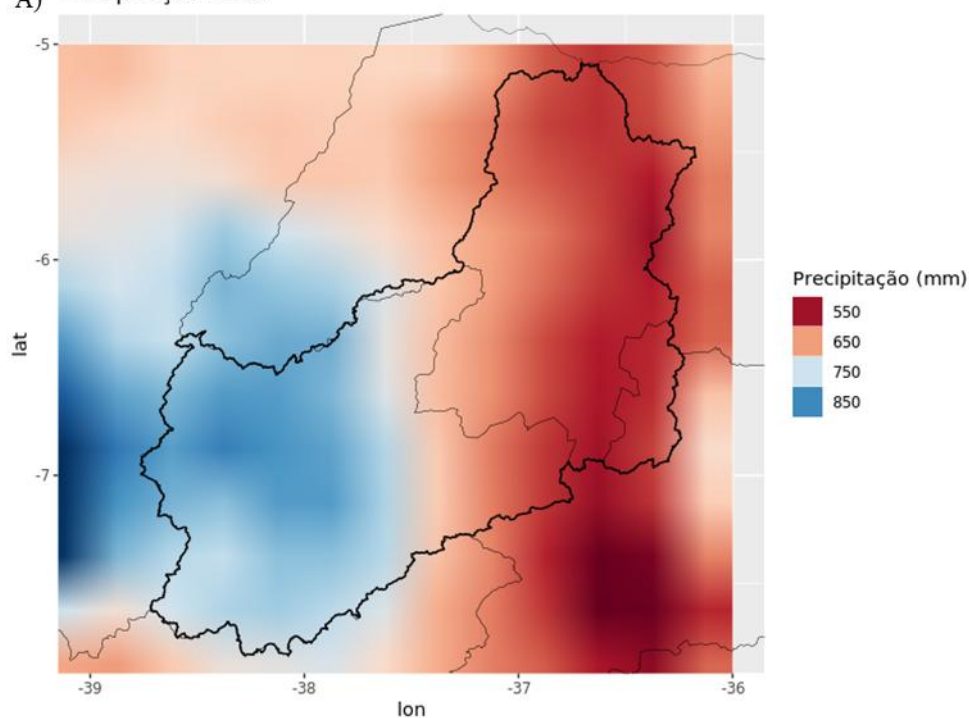
Valores Médios	Severidade	Duração	Intensidade
Bacia do Piancó-Piranhas-Açú	28	14	3
Bacia do Piracicaba	34	16	2
Valores Máximos	Severidade	Duração	Intensidade
Bacia do Piancó-Piranhas-Açu	33	19	3
Bacia do Piracicaba	52	22	3

Fonte: AUTORA (2021).

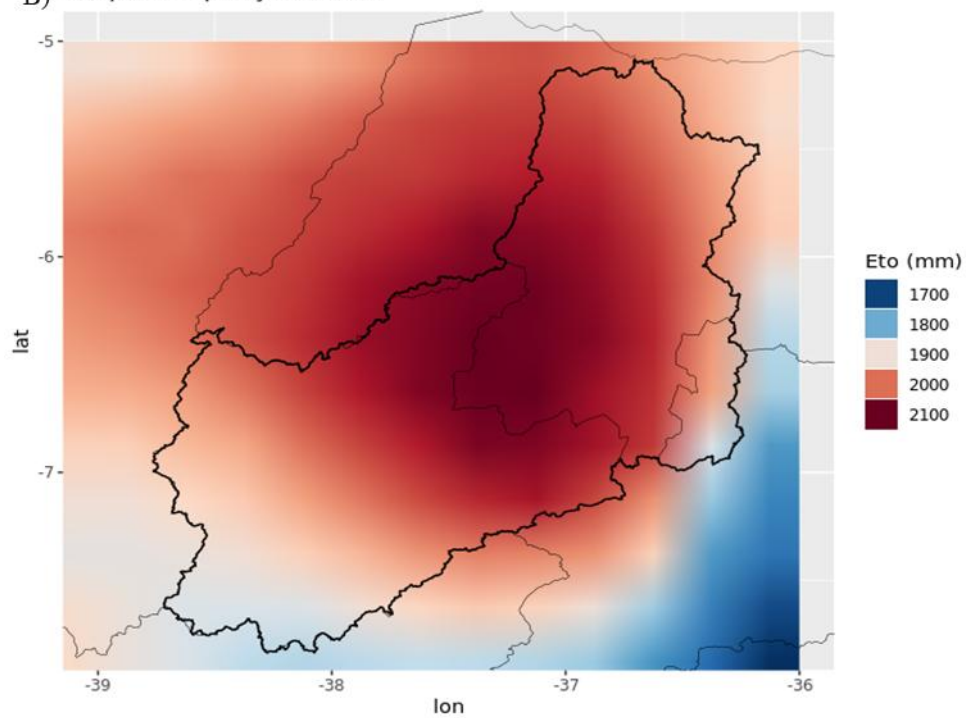
A figura 5.23 mostra os mapas com as médias anuais de precipitação, evapotranspiração potencial, temperatura máxima e mínima para a bacia do Piancó-Piranhas-Açú. E a figura 5.24 apresenta os mapas de médias anuais para a bacia do Piracicaba.

Figura 5.23. Médias Anuais para a Bacia do Piancó-Piranhas-Açú. A) Precipitação Anual. B) Evapotranspiração Anual. C) Temperatura Mínima Anual. D) Temperatua Máxima Anual.

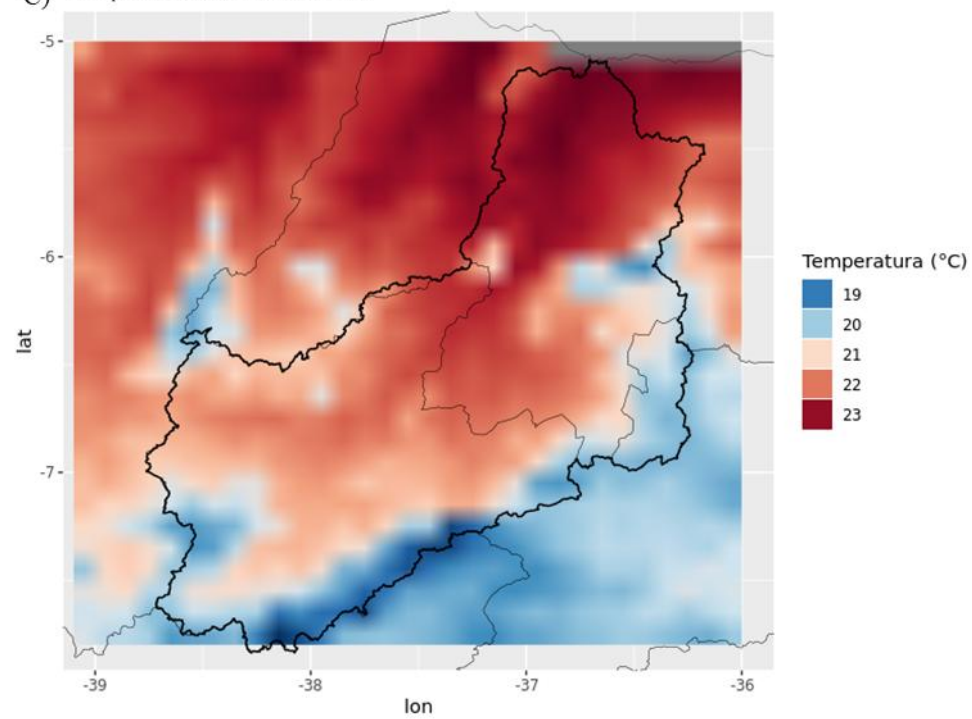
A) Precipitação Anual

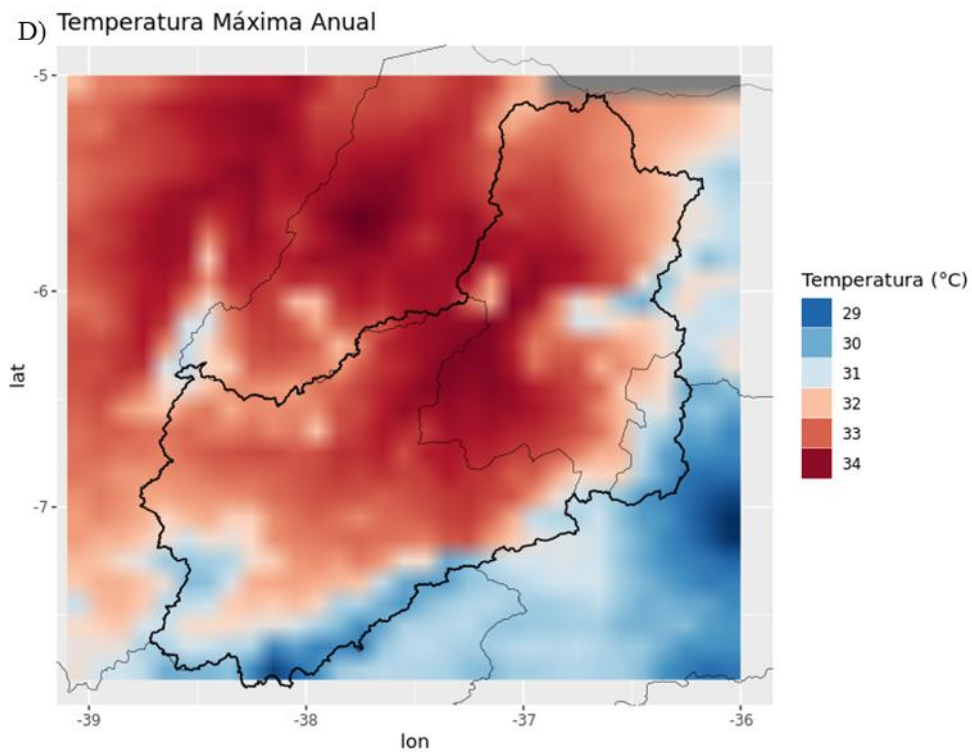


B) Evapotranspiração Anual



C) Temperatura Mínima Anual

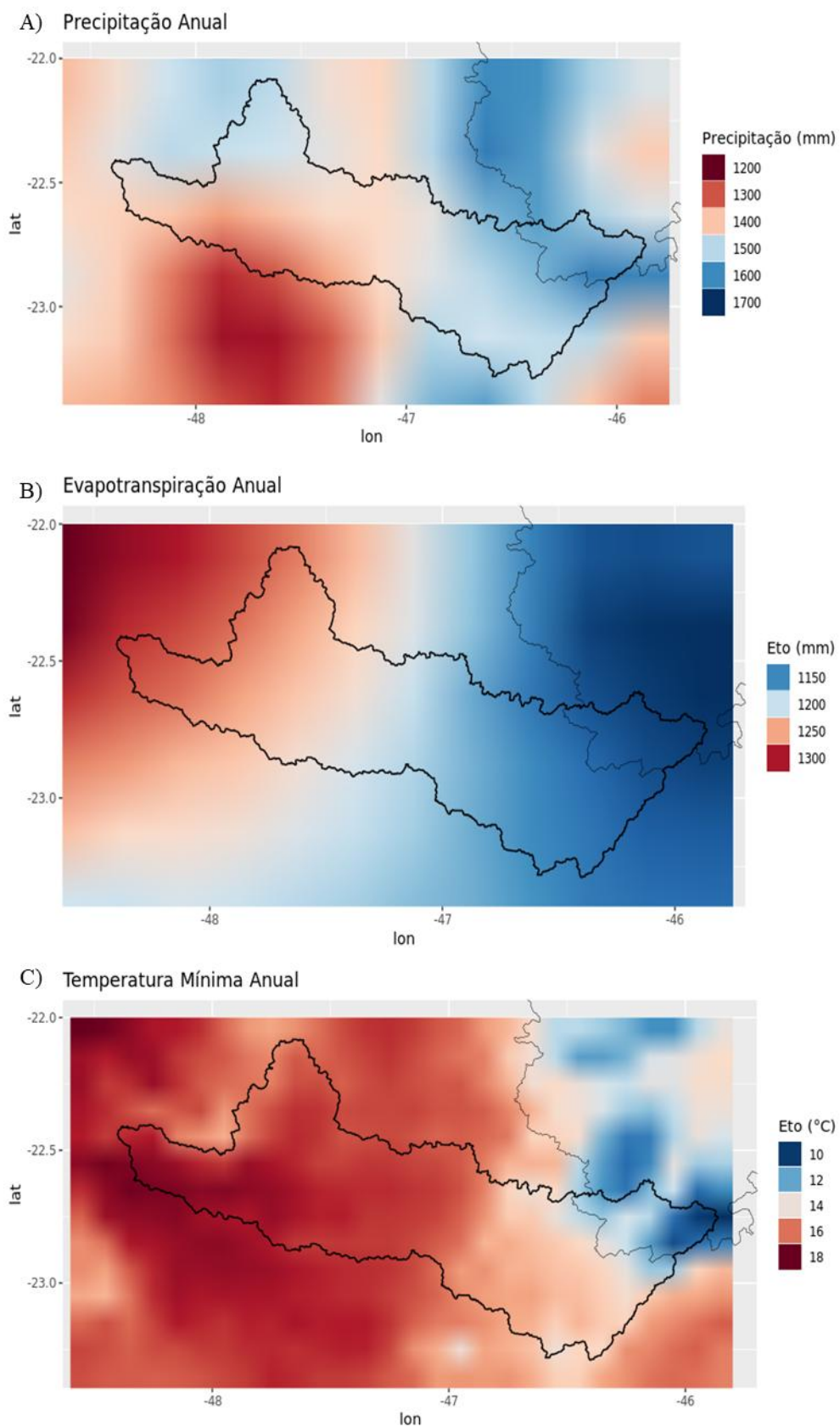


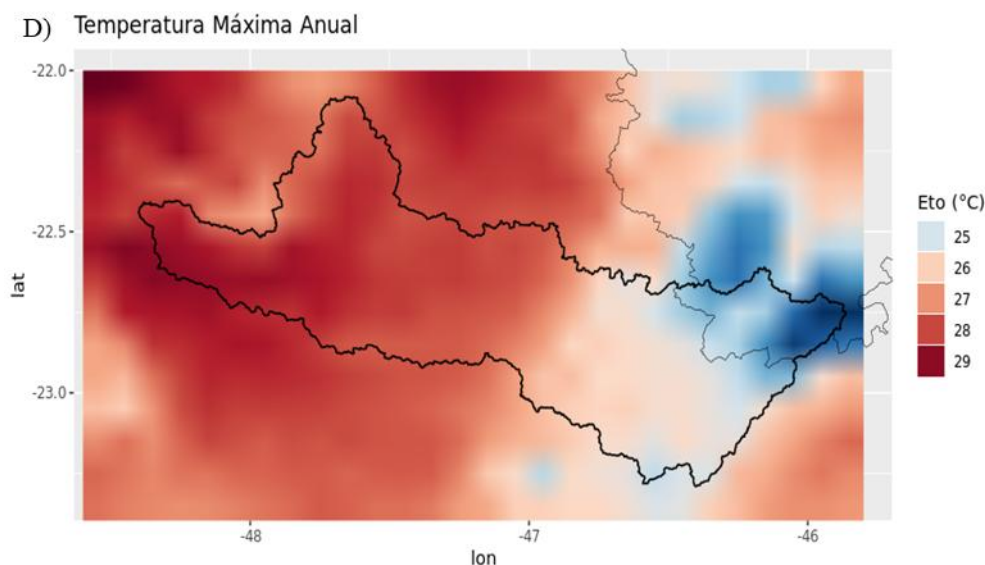


Fonte: AUTORA(2021).

Nos mapas é possível visualizar que a região mais alta da bacia, é onde se concentram os menores valores para as quatro variáveis. Na figura 5.23.A os valores da precipitação são maiores na parte alta da bacia, e diminuem na parte central e baixa. A figura 5.23.B tem os valores da evapotranspiração potencial onde observa-se que a região central da bacia concentra a maior taxa de evapotranspiração que diminui nos entornos da bacia. Também na região central encontram-se os maiores valores de temperaturas, que diminuem no entorno da bacia.

Figura 5.24. Médias Anuais para a Bacia do Piracicaba. A) Precipitação Anual. B) Evapotranspiração. C) Temperatura Mínima Anual. D) Temperatura Máxima Anual.





Fonte: AUTORA(2021).

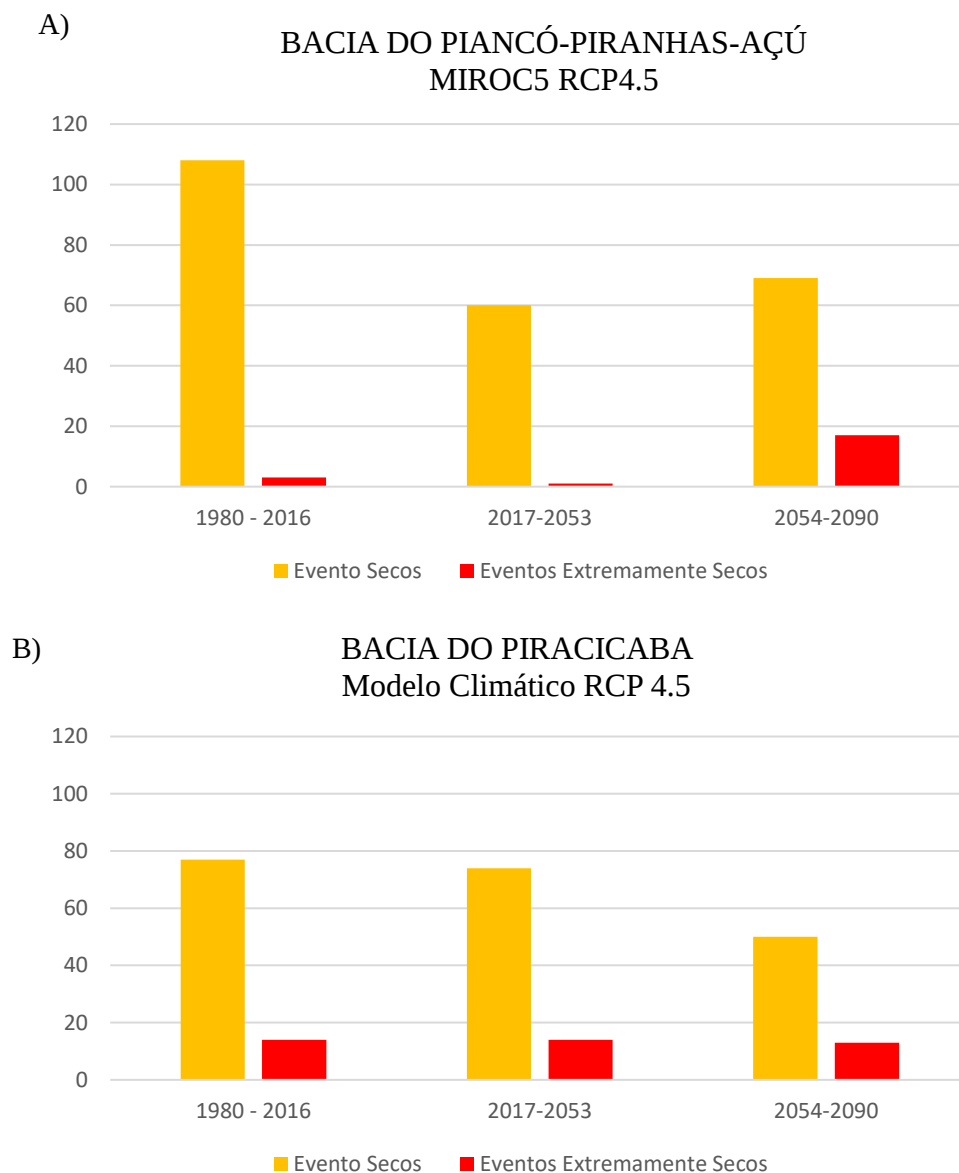
É possível observar que os valores de temperaturas e evapotranspiração potencial na bacia do Piracicaba (figuras 5.24B, C, D) possuem seus menores valores na região mais alta, enquanto sua precipitação possui seus maiores valores nessa mesma região, características de regiões altas (Serra da Mantiqueira). É importante ressaltar as diferenças entre os valores apresentados entre as duas bacias, pois o que na bacia do Piancó-Piranhas-Açú é considerado como altos valores de precipitação na bacia do Piracicaba é um valor considerado baixo.

As médias pluviométricas de cada bacia influencia os resultados de maneira diferente, visto que esse é o único fator que o SPI considera em seu cálculo, assim a bacia do Piancó-Piranhas-Açú por possuir menores valores de precipitação apresenta as secas mais intensas.

5.5 Alteração das Secas para o Futuro

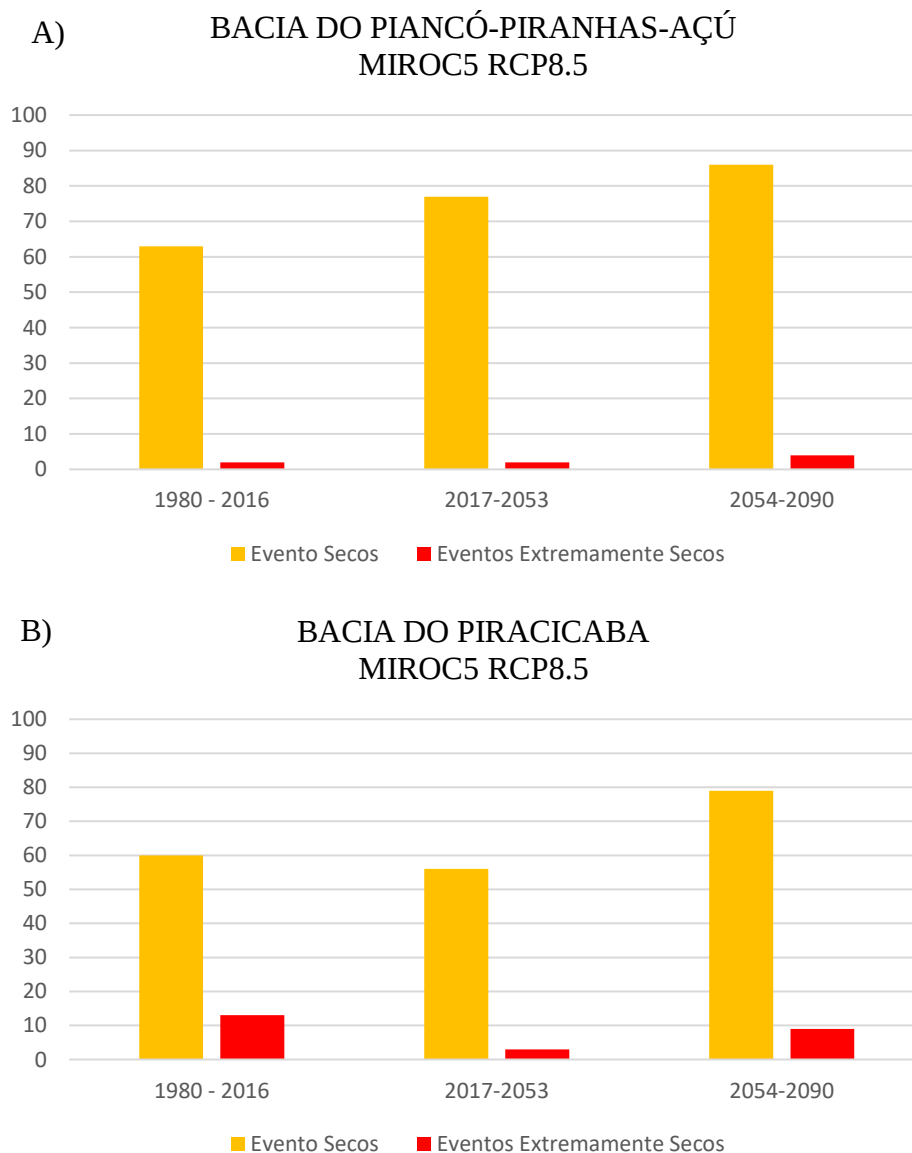
A figura 5.25 mostra as frequências nos eventos de seca e seca extrema para o período histórico e futuro com o cenário RCP4.5(intermediário para as emissões de gases causadores do efeito estufa) nos pontos de máxima severidade encontrada para as bacias do Piancó-Piranhas-Açú e Piracicaba. A Figura 5.26 mostra as frequências de eventos de seca e seca extrema para as série histórica e o futuro com o cenário RCP 8.5 (pessimista para emissões de gases causadores do efeito estufa).

Figura 5.25 Número de Eventos Secos (SPI <-1) e Extremamente Secos (SPI <-2) no período histórico e futuro na perspectiva do Cenário RCP4.5 Para: (A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú (Lat: 5,62°S; Long: 36,87°W). (B) Bacia do Piracicaba (Lat: 22,87°S; Long: 46,62°W).



Fonte: AUTORA (2021).

Figura 5.26 Número de Eventos Secos (SPI <-1) e Extremamente Secos (SPI <-2) no período histórico e futuro na perspectiva do Cenário RCP8.5 Para: (A) Bacia do Piancó-Piranhas-Açú (Lat: 5,62°S; Long: 36,87°W). (B) Bacia do Piracicaba (Lat: 22,87°S; Long: 46,62°W).



Fonte: AUTORA (2021).

O cenário RCP4.5 mostra para a bacia do Piancó-Piranhas-Açú maior frequência de eventos secos do que para a bacia do Piracicaba, no período de futuro próximo (2017–2053), enquanto os eventos secos extremos para esse mesmo período serão mais frequentes para a bacia do Piracicaba. No futuro distante (2054–2090) a bacia do Piancó-Piranhas-Açú apresenta maior frequência de eventos secos e eventos extremamente secos que a bacia do Piracicaba.

É possível observar que no cenário RCP8.5 a bacia hidrográfica que se encontra no semiárido tem o maior número de eventos secos, para os futuros

próximos (2017–2053) e distante (2054–2090), porém os eventos extremamente secos são mostrados com maior frequência para a bacia do Piracicaba, mesmo está sendo localizada em uma região com maiores índices pluviométricos.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar características das secas no período histórico e no futuro a partir dos índices SPI e SPEI nas Bacias do Piracicaba (São Paulo e Minas Gerais) e Piancó-Piranhas-Açu (Paraíba e Rio Grande do Norte). Este trabalho se baseou em dados interpolados, que se mostraram eficientes na estimativa dos índices SPI e SPEI, apesar da suavização que tendem a fazer. Os índices utilizados por sua vez apresentaram boa representatividade em diferentes escalas temporais, e as correlações mostraram que o SPI apresentou maior sensibilidade em relação as variáveis trabalhadas. As bacias se encontram em regiões diferentes e com diferentes climas, assim a severidade da seca não afeta de maneira igual as mesmas, visto que as necessidades hídricas de cada bacia são diferentes. Assim o que se mostra severo e intenso para a bacia do Piancó-Piranhas-Açu não é o mesmo para a bacia do Piracicaba, que mesmo possuindo maiores índices pluviométricos apresentou maior severidade máxima das secas que a bacia do semiárido de acordo com a série histórica. Em particular para a Bacia do Piracicaba, notou-se a concordância entre os três parâmetros da seca severidade máxima, duração máxima e intensidade máxima, ocorrendo na parte média da Bacia e durante a seca de 2014, que mostrou valores de SPI marcadamente menores do que o restante da série.

Para o futuro, as projeções do modelo MIROC mostraram um aumento dos eventos secos e extremamente secos na Bacia do Piancó-Piranhas-Açu, no cenário mais pessimista de emissão de gases estufa (RCP85). No cenário intermediário (RCP45), apenas os eventos extremamente secos aumentaram e no período mais distante (2054–2090). A Bacia do Piracicaba aumentou os eventos secos somente no período mais distante e no cenário de maior emissão.

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para continuidade de trabalhos nessa área:

- Utilização de outros modelos climáticos fornecidos pelo IPCC para estudo das mudanças climáticas em escala de bacias e comparação com os resultados obtidos pelo MIROC.
- A aplicação do índice SPEI para estudo das mudanças climáticas, visto que o mesmo pode fornecer informações que levam em consideração efeitos de variação da temperatura.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul. Primeira aproximação. 1977.
- Agência das Bacias PCJ. **CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS**. 2017. Fonte: Diagnóstico Primeira revisão do Plano de Bacias PCJ 2010-2020. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/caracteristicas-climaticas-bacias-pcj/>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- AHMADALIPOUR, A.; MORADKHANI, H.; SVOBODA, M. Centennial drought outlook over the CONUS using NASA-NEX downscaled climate ensemble. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2477–2491, 2017.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S. AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELOS MODELOS ETA/HADGEM2-ES E ETA/MIROC5 PARA O BRASIL. **71ª Reunião Anual da SBPC, Campo Grande/MS**, p. 4, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Tarso-Oliveira/publication/337985267_AVALIACAO_DA_PRECIPITACAO_SIMULADA_PELOS_MODELOS_ETAHADGEM2-ES_E_ETAMIROC5_PARA_O_BRASIL/links/5df8f7664585159aa484d0cf/AVALIACAO-DA-PRECIPITACAO-SIMULADA-PELOS-MODELOS-ETA-HADGEM2-ES-E-ETA-MIROC5-PARA-O-BRASIL.pdf. Acesso em 17 mar 2021.
- ALTAMIRANO, R. J. A. **Climatologia dos eventos chuvoso e secos severos, extremos e muito extremos usando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil.

ANDRADE, AYSLANN TÔDAYOCHY SIQUEIRA DE. **SALINIZAÇÃO SECUNDÁRIA EM SOLOS DO DISTRITO IRRIGADO DO BAIXOAÇU, EM ALTO DO RODRIGUES/RN**. Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Água e Solo) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5177/2/AyslannTSA_DISSERT.pdf. Acesso em: 8 mar. 2021.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE - 14056-TDI/1067, 2007.

ARAÚJO JÚNIOR, L. M. *et al.* ANÁLISE DAS PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA DO IPCC-AR5 PARA OS CENÁRIOS RCP4.5 e RCP8.5 PARA O SÉCULO XXI PARA A AMAZÔNIA. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013. p. 1-8. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/6a11473a07e6822030cc731dbfad5e8b_68881512928148f_13c0a232a3b4f0ab7.pdf. Acesso em 15 de junho de 2020.

ARAUJO RODRIGUES, J.; SILVA, A. P. C. M.; DOS SANTOS FILHO, J.. Uso de distribuições de probabilidade na modelagem de intensidade de secas ocorridas em Laranjeiras do Sul, PR. **Rev. Bras. Biom**, v. 32, n. 4, p. 570-583, 2014. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v32/v32_n4/A7_JailsonAnaJaime.pdf. Acesso em 25 jun. 2020.

BARRA, T. da S. *et al.* Caracterização climatológica da severidade de secas do estado do Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 266-272, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v6n2/v6n2a15.pdf> . Acesso em 21 jan 2021.

BATISTA JÚNIOR, W. **Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do rio Guandu – Espírito Santo**. 2012. Doutorado em Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, M. S. Package ‘spei’. 2017.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 Anos de Dados Mensais do Índice Padronizado de Precipitação: Série Meteorológica de Campinas, Estado e São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 137-148, 2011.

BLAIN, G. C. Revisiting the probabilistic definition of drought: strengths, limitations and an agrometeorological adaptation. **Revista Bragatina**, v. 71, p. 132-141, 2012.

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 1, p. 58-72, 2008.

BRAGA, M F S; KRUSCHE, N. Padrão de Ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. **Revista Atlântica**, Rio Grande, v. 22, p. 27-40, 2000.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. **Plano de Recursos Hídricos Piancó-Piranhas- Açu**: Resumo Executivo. Brasília: 2016. p. 167.

CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 233-242, 2020.

CARVALHO, L. M. V; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with

intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.

COELHO, C. a. S.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. D. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, vol. 45, p. 1–16, 2015. DOI 10.1007/s00382-015-2800-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00382-015-2800-1>. Acesso em: 27 fev 2021.

COMITÊS PCJ – COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Diagnostico Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 a 2020. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/caracteristicas-climaticas-bacias-pcj/>. Acesso em 22 fev. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIANCÓ PIRANHAS ACÚ (CBHRPPA). A bacia. Disponível em: <http://www.cbhpiancopiranhasacu.org.br/portal/a-bacia/>. Acesso em: 08 mar. 2021.

COVELE, P. A. Aplicação de índices das condições de vegetação no monitoramento em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA_AVHRR- NDVI. **Revista GEOUSP – Espaço Tempo**, n. 29, p. 85 - 95, 2011.

CUNHA, R. L. A. **DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS DE REFERÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS SECAS**. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil,, Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58023/1/000129128.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2020.

FARIAS, A. A. **Caracterização e análise das secas na sub-bacia hidrográfica do Rio Taperoá e avaliação dos impactos e ações de convivência com a seca de 2012-2014 no município de Taperoá - PB**. 2016. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

FARIA, S. M.; ASSUNÇÃO, H. F. O Fenômeno Seca e a Produtividade Agrícola do Estado de Goiás. **Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Jataí - UFG**, v. 7, p. 178 – 180, 2012.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 771-779, 2010.

FERNANDES, D. S. *et al.* Índices para a quantificação da seca. Embrapa **Arroz e Feijão-Documents (INFOTEC-A-E)**, 2009. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/663874/1/doc244.pdf>. Acesso em 21 fev 2021.

FERRAZ, S. E. T. **Variabilidade Intrasazonal da Precipitação sobre o Sudeste Brasileiro**. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 2004.

FIGUEIREDO, J. C.; SCOLAR, J. O Tempo de Vida Médio dos Sistemas Convectivos de Mesoescala na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9, 1996, **Anais ...** Campos de Jordão, SP, p. 984-986.

GIBBS, W. J., MAHER, J. V. **Rainfall Deciles as Drought Indicators**. Bureau of Meteorology Bulletin, nº 48, Commonwealth of Australia, Melbourne, 1967. IPCC. **Climate change 2001: working group II: Impacts, adaptations and vulnerability**. Disponível em: Acesso em: nov. 2004.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge, p.18, 2007a.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge, p.23 , 2007b.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. United Kingdom and New York, p.1535, 2013.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

IWABE, C. M. N.; da ROCHA, R. P. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, D09101, doi:10.1029/2008JD011119, 2009.

JUSTINO, F. B. Avaliação da Relação Seca/Produtividade Agrícola em Cenário de Mudanças Climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 321-321, 2011.

KAITO, C. *et al.* **Topotactical growth of indium sulfide by evaporation of metal onto molybdenite**. [s.l: s.n.]. v. 218.

KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, p. 813–835, 1992.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v.107, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 3, p. 217-231, 1988.

LIMA, R. P. C. AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE SEVERIDADE DE SECA NA BACIA DO RIO DOCE VISANDO AO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE **CLASSIFICAÇÃO DE SECAS**. 2016. 98 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/10393/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jun. 2020.

LIRA, V. M.; SILVA, B. B.; NETO, J. D.; AZEVEDO, C. A. V.; FRANCO, E. S. Variação Sazonal da Cobertura Vegetal em Áreas do Submédio São Francisco a partir de Dados NDVI e Imagens TM-LANDSAT 5. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v. 7, p. 1 – 9, 2011.

LUCENA, Clara Yasmim De Souza et al. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 1-17, 2018.

MACEDO, Maria José Herculano et al. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010.

MALVEZZI, R. Semi-árido. **Uma Visão Holística–Brasília: Confea**, 2007.

MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; COSTA, H. C. Sazonalidade e Distribuição Espaço-Temporal das Chuvas no Bioma do Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 77-85, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, 2011.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2016.

MARQUES, R.F.C.; RAO; V.B. A diagnosis of a long-lasting blocking event over the Southeast Pacific Ocean. **Monthly Weather Review**, vol. 127, p. 1761-1776, 1999.

MARTINS, E. S. P.r. *et al.* **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. Brasília: Banco Mundial, 2015. (Água Brasil). Disponível em:
http://f3.funceme.br:9000/msne/data/publicacoes/Serie_Agua_10_-_Monitor_Secas_do_Nordeste.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

MCNAB, A.L.; KARL, T.R. **Climate and droughts**. In: Paulson, R. W.; Chase, E.B.; Roberts, R.S.; Moody, D.W. (eds.) *Compilers, national water summary 1988-89 Hydrologic events and floods and droughts*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 1991. p.89-98.

MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J., KLEIST, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Proceedings of the 8th Conference On Applied Climatology**. AMS, Boston, MA, p. 179–184, 1993.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **Drought monitoring with multiple time scales**. Preprints, In: 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, TX, p. 233-236, 1995.

MEDEIROS, F.J.; Lucio, P.S. & Silva, H.J.F. 2017. Análise de métodos de krigagem na estimativa da precipitação no estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 10 (5): 1668 - 1676.

MELO, E. T.; SALES, M. C.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para Análise da Degradação

Ambiental da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-ce. **Revista RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, n. 23, p. 520 - 533, 2011.

MIKY FUNATSU, B., GAN, M. A.; CAETANO, E. A case study of orographic cyclogenesis over South America. **Atmosfera**, v. 17, n. 2, p. 91-113, 2004.

MORGADO, M. C. N. O Litoral Semiárido Brasileiro. **Geografia**. UEPB/Brasil. 2011. Disponível em: <http://www.webartigos.com/autores/BIOGEO/>. Acesso em: em: 08 mar. 2021.

NASCIMENTO, E. L.; AMBRIZZI, T. The Influence of Atmospheric Blocking on the Rossby Wave Propagation in Southern Hemisphere Winter Flows. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 80, n. 2, p. 139-159, 2002.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, v. 12, p. 239–258, 2001.

NOGUÉS-PEAGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. **Monthly Weather Review**, vol. 125, p. 279-291, 1997.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE-4008-TDL/239, 134 p., 1986.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. Research Paper, n.45, U. S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D. C. 1965. 58p.

PALHARINI, R.S.S. & VILA, D.A. 2017. Climatological behavior of precipitating in the Northeast Region of Brazil. **Advances in Meteorology**, 2017: 1-12.

PBMC. **Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de**

Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasil, Volume Especial para a Rio+20, 34p, 2012.

PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz et al. Análise espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, SP. **Rev. Bras. Agrometeorologia**, v. 9, n. 1, p. 125-135, 2001.

Plano Estadual de Recursos Hídricos: primeiro plano do Estado de São Paulo. São Paulo, DAEE, 1990. 140p. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/perh90/Perh9000Sumario.htm>. Acesso em 22 de fev. 2021.

PORTO, M. FA; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-401420080000200004&script=sci_arttext. Acesso em 27 fev 2021.

QUADRO, M. F. de L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul ZCAS sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 1994.

RAGHAVAN, S. V.; HUR, J.; LIONG, S. Y. Evaluations of NASA NEX-GDDP data over Southeast Asia: present and future climates. **Climatic Change**, v. 148, n. 4, p. 503–518, 2018.

RAO, V.B; HADA K. Characterstcs of Rainfall over Brazil Annual Variations and Connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, p. 81-91, 1990.

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade.** Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG–USP, 359 pg., 2008.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 185 - 204, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a04v25n2.pdf>. Acesso em 08 mar 2021.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de Frentes Frias no Litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n. 2, p. 135-151, 2004.

SAAD, S. I. **Modelagem e valoração dos serviços ambientais hidrológicos na recuperação da vegetação no Ribeirão das Posses, Extrema, MG**. 2015. 165 f. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/SandraIsaySaad.pdf>.

SALIO, P., NICOLINI, M.; ZIPSER, J. Mesoscale convective systems over southeastern South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1290-1309, 2007.

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A.; SANTOS, M. S. *et al.* Definição de Liminares de Secas e Cálculo do Índice de Precipitação Padronizada por Meio de Análise Regional de Frequências na Bacia do Alto São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 95-105, jun. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcus_Santos14/publication/301648812_Definicao_de_Limiares_de_Secas_e_Calculo_do_Indice_de_Precipitacao_Padronizada_por_Meio_de_Analise_Regional_de_Frequencias_na_Bacia_do_Alto_Sao_Francisco/links/571f929f08aefa64889a7af9.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

SANTOS, S. R. Q. *et al.* Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 111-122, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778632120160013>.

SALATI, T., SCHINDLER, W., VICTORIA, D.C., SALATI, E., SOUZA, J.C.S., NOVA, N.A.V. Economia das Mudanças Climáticas no Brasil. Estimativas da Oferta de Recursos Hídricos no Brasil em Cenários Futuros de Clima. *Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável*, p80 ,2008.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.

SOUZA, R. M. D. et al. Projeções Climáticas Regionalizadas Para O Estado Do Tocantins, Brasil, Nos Cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/57052>. Acesso em 08 mar. 2021.

SILVA, F. *et al.* Avaliação da ocorrência de secas na Bahia utilizando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). **Bahia Análise & Dados**, v. 23, n. 2, p. 461-473, 2013. Disponível em: researchgate.net/profile/Wilton_Aguiar/publication/274082609_Avaliacao_da_ocorrencia_de_secas_na_Bahia_utilizando_o_Indice_de_Precipitacao_Padronizada_SPI/links/5515a10d0cf2b5d6a0eaa7d6/Avaliacao-da-ocorrencia-de-secas-na-Bahia-utilizando-o-Indice-de-Precipitacao-Padronizada-SPI.pdf. Acesso em 18 jun. 2020.

SILVA, Francisca de Fátima Nascimento *et al.* ESTUDO DE CASO:: TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DE REGIÕES DO LITORAL E SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO (NOTA DE PESQUISA). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], ano 11, v. 17, p. 282-299, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/28834/1/EstudoDeCasoTemperaturaM%c3%a9diaNordesteBrasileiro_SantoseSilva_2015.pdf. Acesso em: 8 mar. 2021.

SILVA, V.P.R. 2004. On climate variability in northeast of Brazil. **Journal Arid Environ**, 58: 575-596.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Performance assessment of CMIP5 models concerning the representation of precipitation variation patterns in the twentieth century on the northeast of Brazil, Amazon and Prata Basin and analysis of projections for the scenery RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317–330, 2013.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416– 428, 2016.

STROMMEN, N., KRUMPE, P., REID, M., STEYAERT, L. **Early warning assessments of droughts used by the U.S. agency for international development**. In: Pocinki, L.S., Greeley, R.S., Slater, L. (Eds.), *Climate and Risk*. The MITRE Corporation, McLean, VA, p. 8–37, 1980.

TITLOW, J. K.. **A precipitation-based drought index for the Delaware river basin**. Publications in Climatology 40. C.W. Thornthwaite Associates, Centerton, NJ, 1987.

THORNTHWAITE, C. W., 1948: An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev.**, 38, 55–94.

TRINDADE, J. C. D. **Paisagem e desenvolvimento econômico da bacia do Rio Piracicaba**. 154p. Monografia: Graduação em Geografia. FCESI/MG, 2007.

VALADÃO, C. E. A.; SILVA, B. K. N.; TELLES, P. T.; SCHMIDT, D. M.; ANDRADE, R. L.; CORREIA FILHO, W. L. F.; BARRETO, N. J. C.; MATA M. V. M.; LOPO, A. L. B.; SPYRIDES, M. H. C. LUCIO, P. S. **Uma Análise Comparativa de Alguns Índices de Aridez Aplicados às Capitais do Nordeste do Brasil**. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém – PA, 2010.

VERA, C.; W. HIGGINS; T. AMBRIZZI; J. AMADOR; R. GARREAUD; D. GOCHIS; D. GUTZLER; D. LETTENMAIER; J. MARENGO; C. R. MECHOSO; NOGUES-PAEGLE; P. L. SILVA DIAS; C. ZHANG. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *J. Climate*, v. 19, p. 4977-5000, 2006.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index, **Journal of Climate**, v. 23 ,p. 1696-1718, 2010.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/23/2010jcli3679.1.xml>. Acesso em 28 fev. 2021.

World Meteorological Organization, 2019: WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018, No. 15, <https://reliefweb.int/report/world/wmo-greenhouse-gas-bulletin-state-greenhouse-gases-atmosphere-based-global-0>. Acesso em 18 nov de 2020.