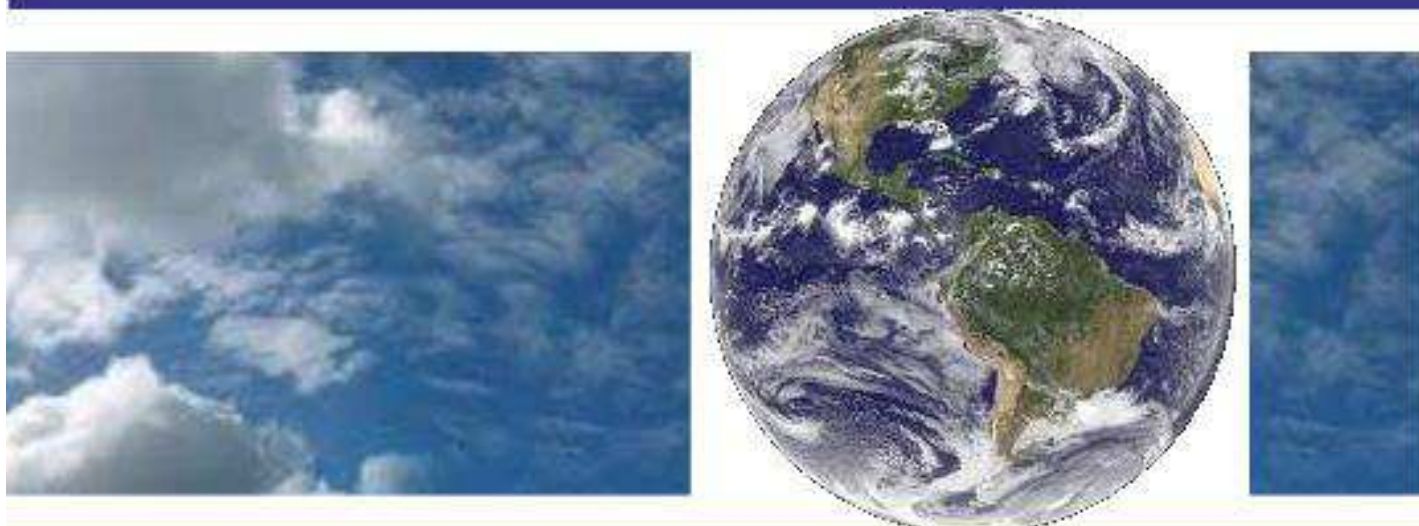


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lorena Conceição Paiva de Ataíde

**Impactos da Variabilidade Hidroclimática no
Semiárido Brasileiro**

Campina Grande, Fevereiro de 2021.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IMPACTOS DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

LORENA CONCEIÇÃO PAIVA DE ATAIDE

Campina Grande-PB

Fevereiro / 2021

LORENA CONCEIÇÃO PAIVA DE ATAIDE

**IMPACTOS DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Trabalho de dissertação de Mestrado, apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Hidrometeorologia

Orientador: Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Campina Grande-PB

Fevereiro / 2021

A862i Ataide, Lorena Conceição Paiva de.
Impactos da variabilidade hidroclimática no semiárido brasileiro
/ Lorena Conceição Paiva de Ataide. – Campina Grande, 2021.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".
Referências.

1. Submédio São Francisco. 2. Déficit Hídrico. 3.
Vulnerabilidade Hídrica. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU

556.18(282.281.5)(043)

LORENA CONCEIÇÃO PAIVA DE ATAIDE


**IMPACTOS DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 25/02/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. FABRÍCIO DANIEL DOS SANTOS SILVA
Instituto de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Alagoas



Dr. LEYDSON GALVÍNIO DANTAS
Grupo de Previsão Climática
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

*Dedico este trabalho ao meu filho,
César Fernando Ataide Serrão,
fonte de motivação em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde e força para alcançar meus objetivos e pelas graças concedidas.

Aos meus pais, Jorge e Dulce, por me conduzirem no caminho certo, me ajudarem nos momentos difíceis e sempre me apoiarem na jornada da vida.

Ao meu noivo, Edivaldo Serrão, por todo amor e companheirismo e pelo apoio incondicional em todas as circunstâncias.

Aos meus familiares, José Fernando (avô), Maria Batista (avó), Ieda Ataide, Leda Ataide, Bruno Ataide, Breno Ataide, Victor Ataide, Lidya Ataide, Raimundo Nonato, Antonia Julia, Bruno Amorim, Michele Pinheiro, Yasmin Pinheiro, Maria do Livramento, Maria Benedita, Thaianna Brito, Douglas Santos, Lívia Natalia, que me ajudaram ao longo da formação acadêmica.

Ao professor Dr. Madson Tavares pela orientação e esclarecimentos ao longo do projeto.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante todo o curso.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria desse trabalho.

Aos meus amigos, Ranieri Farias, Hugo de Paula, José Neto, Camila Borges, Débora Alencar, Aldilene Sousa, Joniel Saraiva, Soraia Brito, Rayane Sales, Jéssica Dantas, Renata Gonçalves, Manuel Jr, Ivo Souza, Thomás Ferreira e Jessica Delgado por me proporcionarem momentos felizes nessa trajetória.

E a todos que de alguma forma influenciaram para que eu chegasse até aqui.

Obrigada!

LISTA DE QUADROS E TABELAS

	Pág.
Quadro 1. Dados de entrada inseridos no SWAT.....	31
Tabela 1. Critério de Kaiser-Meyer-Olkin – KMO.....	34
Tabela 2. Classificação do IVH.....	36
Tabela 3. Classificação da seca baseada no SPEI.....	39
Tabela 4. Teste de Kaiser Meyer Olkin – KMO.....	45
Tabela 5. Variância total explicada pelos fatores na definição das dimensões.....	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco.....	26
Figura 2. Distribuição espacial média do (A) Escoamento Superficial, (B) Umidade do Solo, (C) Percolação, (D) Recarga do aquífero no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.....	40
Figura 3. Distribuição espacial média do (A) Precipitação, (B) Produção de água, (C) Evapotranspiração Potencial, (D) Evapotranspiração Real no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.....	42
Figura 4. Correlograma entre as variáveis.....	44
Figura 5. Scree plot: Curva da variância individual de cada fator.....	46
Figura 6. Aderência das variáveis aos fatores e suas variabilidades de explicação.....	47
Figura 7. Distribuição espacial do (A) Fator 1, (B) Fator 2 e (C) Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH na BHSRSF.....	49
Figura 8. Distribuição espacial de grupos homogêneos do Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH para a BHSRSF.....	51
Figura 9. Distribuição temporal das variáveis (A) Precipitação, (B) Evapotranspiração Potencial, (C) Evapotranspiração Real e (D) Umidade do solo por grupo durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para a BHSRSF.....	53
Figura 10. Relação estatística entre as variáveis hidrológicas: (A) Precipitação e Percolação, (B) Precipitação e Evapotranspiração real, (C) Precipitação e Umidade do Solo, (D) Precipitação e Produção de água.....	54
Figura 11. Distribuição temporal do SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12 para o grupo 3, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.....	56
Figura 12. Distribuição temporal do SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12 para o grupo 6, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.....	57
Figura 13. Distribuição temporal dos valores máximos anuais do IVHP e SPEI, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.....	59
Figura 14. Relação estatística entre SPEI e IVHP para os grupos homogêneos.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AF – Análise Fatorial

AA – Análise de Agrupamento

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BHRSF – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

BHSRSF – Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco

CBH – Comitê de Bacias Hidrográficas

CBHSF – Comitê de Bacia Hidrográfica do São Francisco

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

DPI – Dano Potencial de Inundação

DPQA – Deterioração Potencial da Qualidade da Água

ET – Evapotranspiração Real

ETP – Evapotranspiração Potencial

F1 – Fator 1

F2 – Fator 2

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

GEE – Gases do Efeito Estufa

GW – Recarga de Aquífero

HRU – Unidades de Resposta Hidrológica

IA – Índice de Aridez

IABH – Índice de Avaliação de Bacias Hidrográficas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSA – Instituto Nacional do Semiárido

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IVH – Índice de Vulnerabilidade Hídrica

IVHP – Índice de Vulnerabilidade Hídrica Padronizado

KMO – Kaiser-Meyer-Olkin

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República

NEB – Nordeste do Brasil

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OL – Ondas de Leste

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PDSI – Índice de Severidade de Seca de Palmer

PEF – Potencial Esgotamento do Fluxo

PER – Pressão-Estado-Resposta

PERC – Percolação

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PRP – Precipitação

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SPEI – Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração

SPI – Índice padronizado de precipitação

SURQ – Escoamento Superficial

SW – Umidade do Solo

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

UNIFESP – Universidade Federal de São Paulo

VCAN – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

WYLD – Produção de água

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

IMPACTOS DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Mudanças climáticas, alteração no uso da terra, crescimento populacional, dentre outros fatores, têm impactos diretos na disponibilidade de água e na vulnerabilidade dos recursos hídricos. Devido à irregularidade do regime pluviométrico, o nordeste do Brasil é uma das regiões mais sensíveis às mudanças climáticas, caracterizada por carência hídrica tanto para o sistema natural quanto para uso humano. Dada a necessidade de informações para auxiliar na gestão do risco climático e no planejamento do uso da água na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF), este trabalho avaliou quantitativamente a vulnerabilidade hidroclimática da BHSRSF por meio da técnica de Análise Fatorial (AF) para construção do Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVH). A escassez de água foi analisada através do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) em diferentes escalas temporais. Observou-se que, de modo geral, a bacia apresenta vulnerabilidade hídrica, sujeita ao aumento das restrições de água doce e verificou-se predominância de eventos secos. Na agricultura, os impactos do déficit hídrico são mais significativos, pois esta é altamente influenciada por fatores climáticos, comprometendo os produtores, os quais são mais vulneráveis às transformações econômicas e ambientais.

Palavras-chave: Submédio São Francisco, Déficit Hídrico, Vulnerabilidade Hídrica.

IMPACTS OF HYDROCLIMATIC VARIABILITY IN THE BRAZILIAN SEMIARID

ABSTRACT

Climate change, land use change, population growth, among other factors, have a direct impact on the availability of water and the vulnerability of water resources. Due to the irregularity of the rainfall regime, northeastern Brazil is one of the regions most sensitive to climate change, characterized by water shortages both for the natural system and for human use. Given the need for information to assist in the management of climatic risk and in the planning of water use in the Lower São Francisco River Basin (BHSRSF), this work quantitatively assessed the hydroclimatic vulnerability of the BHSRSF through the Factor Analysis (AF) technique for the construction of the Water Vulnerability Index (IVH). Water scarcity was analyzed using the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) at different time scales. It was observed that, in general, the basin presents water vulnerability, subject to the increase of fresh water restrictions and there was a predominance of dry events. In agriculture, the impacts of the water deficit are more significant, as this is highly influenced by climatic factors, compromising producers, who are more vulnerable to economic and environmental changes.

Keywords: Middle São Francisco River, Water Deficit, Water Vulnerability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Gestão de Bacias Hidrográficas	5
3.2 Modelagem Hidrológica	7
3.2.1 Modelo SWAT	10
3.3 Vulnerabilidade Ambiental	11
3.3.1 Vulnerabilidade no Semiárido	13
3.3.2 Riscos Hidroclimáticos	15
3.3.3 Índices de Vulnerabilidade	18
3.4 Análise Multivariada	21
3.4.1 Análise Fatorial	22
3.4.2 Análise de Agrupamento	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Área de estudo	26
4.1.1 Clima	27
4.1.2 Vegetação	27
4.1.3 Relevo	27
4.1.4 Geologia	28
4.1.5 Solo	28
4.1.6 Hidrografia	28
4.1.7 Aspectos Socioeconômicos	29
4.1.8 Saneamento	30
4.2 Banco de dados	30
4.3 Metodologia	33
4.3.1 Análise Fatorial	33
4.3.2 Índice de Vulnerabilidade Hídrica	35
4.3.3 Análise de Agrupamento	36
4.3.4 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Análise Fatorial	43
5.2 Índice de Vulnerabilidade Hídrica	48
5.3 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração	55
6. CONCLUSÃO	62
7. REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a manutenção da vida e desenvolvimento da sociedade. Ela pode ser vista como um recurso para uso doméstico, como um insumo na agricultura e indústria, um sustentador de ecossistemas, bem como um risco na forma de eventos extremos (Brown *et al.*, 2015). A água tem usos múltiplos e sua disponibilidade no futuro poderá ter restrições para a produção agropecuária, industrial, serviços e até abastecimento humano (Kang *et al.*, 2009; Anandhi *et al.*, 2016). Cada uso tem particularidades ligadas à quantidade ou à qualidade da água, e altera as condições naturais das águas superficiais e subterrâneas (ANA, 2020). Compreender o sistema de recursos hídricos e sua exposição a fatores que coloquem em risco a disponibilidade hídrica é vital para garantir um gerenciamento sustentável. Entre muitos fatores estressantes, mudanças no uso e cobertura da terra e no clima estão exercendo pressão sobre os sistemas de recursos hídricos, aumentando sua demanda e criando uma necessidade de avaliações de vulnerabilidade (Anandhi e Kannan, 2018).

A viabilidade dos recursos hídricos no futuro próximo e distante está relacionada por diversos fatores como alterações no uso e cobertura da terra (De Roo *et al.*, 2001; Sampaio *et al.*, 2007; Dosskey *et al.*, 2010; Nepstad *et al.*, 2014; Trumbore *et al.*, 2015; Pandey *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018; Op de Hipt *et al.*, 2019; Serrão *et al.*, 2020) e mudanças climáticas (Soares-Filho *et al.*, 2006; Malhi *et al.*, 2008; Lewis *et al.*, 2015; Sampaio *et al.*, 2017; Anandhi e Kannan, 2018; Chen *et al.*, 2019). De forma geral há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos do Brasil (Roland *et al.*, 2012). Além da mudança climática e alteração no uso da terra, outros fatores implicam na disponibilidade dos recursos hídricos, como crescimento populacional, desenvolvimento socioeconômico, avanço da agricultura irrigada e políticas de uso e conservação da água têm impactos diretos no aumento da demanda de água e na vulnerabilidade ao recurso (Al-Kalbani *et al.*, 2014; Žurovec *et al.*, 2017; Anandhi e Kannan, 2018; Chen *et al.*, 2019; Serrão *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade é um conceito teórico e difícil de ser estimado (Plummer *et al.*, 2012; Tonmoy *et al.*, 2014). Operacionalizar um conceito teórico consiste em fornecer um método ou procedimentos para mapear em conceitos observáveis (Kim, 2015; Kanakoudis *et al.*, 2016; Anandhi e Kannan, 2018). Em geral, vulnerabilidade é o grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças ambientais. A vulnerabilidade de um sistema natural e socioeconômico pode ser determinada pelo caráter, magnitude e taxa de desenvolvimento de uma ameaça, por um lado, e pela sensibilidade e capacidade de adaptação do sistema, por outro (Jun *et al.*, 2011; IPCC, 2019). As informações e conhecimentos científicos da metodologia se tornam parte de um processo em um sistema de

tomada de decisões muito mais amplo em que diversas ferramentas podem ser utilizadas como geoprocessamento (Crepani, 2001; Ribeiro e Campos, 2007, Preston *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014; Ceconi *et al.*, 2018.), modelagem ambiental e hidrológica (Scanlon *et al.*, 2007; Coe *et al.*, 2009; Trumbore *et al.*, 2015; Tolessa *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; Serrão *et al.*, 2020) e estatística multivariada (Sullivan, 2011; Jun *et al.*, 2011; Xenarios *et al.*, 2016; Žurovec *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Delpla *et al.*, 2020).

Muitos métodos e abordagens diferentes foram desenvolvidos e aplicados para avaliar quantitativamente a vulnerabilidade em diferentes escalas (Füssel *et al.*, 2007). Embora sem restrições, essas abordagens são práticas para os processos de tomada de decisão, pois fornecem uma imagem clara da localização geográfica das populações mais vulneráveis e permitem a implementação de medidas para suas políticas de proteção e adaptação (Gbetibouo *et al.*, 2010). Vários estudos sobre avaliação de vulnerabilidade/sustentabilidade, o desenvolvimento de indicadores de vulnerabilidade/sustentabilidade e avaliação de mitigação e ação foram concluídos ou estão em andamento em várias partes do mundo (Gleick, 1990; Lane *et al.*, 1999; Meigh *et al.*, 1999; Vogel, 2001; Adger *et al.*, 2004; Brooks *et al.*, 2005; Gbetibouo *et al.*, 2010; Jun *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2014; Pandey *et al.*, 2016; Žurovec *et al.*, 2017; Ceconi *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019; IPCC, 2019; Delpla *et al.*, 2020). Entre as vantagens que a compreensão da vulnerabilidade às mudanças climáticas oferece estão a melhoria da gestão do risco de desastres, exposição reduzida de ativos humanos e ecológicos, e identificação de populações particularmente vulneráveis (Preston *et al.*, 2011).

As condições de vulnerabilidade podem variar em função das características de cada território estudado - sociais, ambientais, infra estruturais, políticas públicas, entre outras (Menezes *et al.*, 2018). O estudo desenvolvido pelo Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (NAE, 2005) sugere que o nordeste do Brasil (NEB) é a região mais vulnerável às mudanças climáticas. Segundo Marengo *et al.* (2016) o NEB é vulnerável aos extremos observados de variabilidade climática interanual, em que cenários de mudanças climáticas globais e regionais indicam que a região será afetada pelo déficit de chuvas e aumento da aridez no próximo século. Este cenário deverá impor um stress sério aos já escassos recursos hídricos da região (PBMC, 2014).

O clima global está mudando, e os eventos climáticos extremos decorrentes (altas temperaturas, chuvas e secas) estão se tornando constantes. Dentre os fenômenos naturais adversos, a seca é o que mais afeta a sociedade por atuar em grandes extensões territoriais e por longos períodos (Marengo *et al.*, 2016). O NEB é a região seca mais populosa do mundo, com acentuada variabilidade climática que expõe a população ao risco de secas com fortes impactos

ambientais e sociais (Da Rocha Jr. *et al.*, 2020). Diversas pesquisas tratam sobre a temática da escassez hídrica no NEB (Hastenrath *et al.*, 1977; Rebouças, 1997; De Carvalho, 2012; Silva, 2014; Marengo *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018).

As secas são aparentes após um longo período sem precipitação, mas é difícil determinar seu início, extensão e fim (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). De acordo com suas características, geralmente ocorrem os seguintes tipos de secas - meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas (Tran *et al.*, 2019). Conforme Pei *et al.* (2020) dentre eles, a seca meteorológica é um evento climático extremo, em que a causa mais intuitiva é a redução da precipitação, e os outros três tipos de seca possuem aspectos humanos e sociais maiores. A gravidade e a duração dessas secas dependem de vários fatores e não necessariamente seguem o mesmo comportamento (Da Rocha Jr. *et al.*, 2020). Segundo Cunha *et al.* (2019) no geral, a seca é caracterizada como um período suficientemente longo de deficiência hídrica para impactar de forma significativa os aspectos edáficos, meteorológicos, hidrológicos e sociais. No NEB, encontram-se as maiores carências hídricas, tanto ao sistema natural quanto ao uso humano (PBMC, 2014).

Vários índices ambientais e de escassez de água são descritos na literatura, como o DPI (Dano Potencial de Inundação), PEF (Potencial Esgotamento do Fluxo) e DPQA (Deterioração Potencial da Qualidade da Água), desenvolvidos por Chung e Lee (2009). O IABH (Índice de Avaliação de Bacias Hidrográficas) com base na estrutura Pressão-Estado-Resposta (PER) desenvolvido pela OCDE (1993). Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) para caracterização da seca meteorológica. McKee *et al.* (1993) propuseram o índice padronizado de precipitação (SPI) visando avaliar as condições de seca para várias escalas de tempo. Vicente-Serrano *et al.* (2010) propuseram o índice padronizado de precipitação e evapotranspiração (SPEI). Anandhi e Kannan (2018) desenvolveram o WR-VISTA para avaliar os impactos das mudanças climáticas na agricultura.

Em síntese, o ciclo da água está diretamente ligado ao clima. Assim, mudanças no clima que alterem o regime de chuvas podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos (ANA, 2020). Dada a necessidade de mais informações para auxiliar na gestão do risco de seca e no planejamento do uso da água no semiárido brasileiro, este trabalho busca desenvolver um Índice de Vulnerabilidade Hídrica e associar seus valores aos resultados calculados do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração, como mostra os objetivos a seguir.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o risco hidroclimático na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF) utilizando dados hidrológicos e estatística multivariada.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a variabilidade espaço-temporal das componentes hidroclimáticas da BHSRSF;
- Diagnosticar o risco hidroclimático a partir da análise fatorial.
- Investigar o déficit hídrico a partir do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI);

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gestão de Bacias Hidrográficas

Um breve histórico sobre as normas que regem os recursos hídricos no Brasil mostra que a Legislação Federal de 1988 determina, em seu Art. 20, diz que são bens da União “quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais”. A Lei nº 9.433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), entre seus fundamentos tem-se a água como um bem de domínio público, dotado de valor econômico, sendo seus usos prioritários o abastecimento humano e a dessedentação de animais. A mesma lei define que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), integrado pelo Comitê de Bacias Hidrográficas (CBHs) onde participam União, estados, municípios, sociedade civil organizada e usuários de recursos hídricos.

A legislação nacional propõe uma política participativa aberta aos diferentes atores sociais na gestão dos recursos hídricos, fortalecendo a gestão descentralizada de cada bacia hidrográfica por meio dos Comitês de Bacias Hidrográficas - CBHs (Jacobi, 2011). Cabe aos CBHs promover debates sobre as questões de interesse local com a participação de todos os agentes envolvidos. Em 2001 foi criada a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), de forma a complementar a estrutura institucional da gestão de recursos hídricos do país, responsável pela implantação da política nacional de recursos hídricos e que detém o poder outorgante de fiscalização e de cobrança pelo uso da água.

Mascarenhas (2008) adverte que o exercício da prática da gestão compartilhada de recursos hídricos tem revelado conflitos de natureza diversa que pressupõe um processo permanente de negociação, fato que conduz à reflexão acerca dos princípios da democratização e descentralização. Nesta perspectiva, Carvalho (2020) cita como exemplo, questões relacionadas à captação de água em um manancial superficial para o abastecimento de uma população externa à sua área da bacia hidrográfica e, o lançamento de efluentes resultantes desse consumo hídrico. Assim, torna-se necessária a cogestão, em que todos aqueles que têm direito de uso da água podem opinar na forma que o recurso hídrico e ambiental possa ser utilizado (Bernardi *et al.*, 2012). Contudo, para que este fato ocorra, é necessário que a diversidade social seja representada e envolvida adequadamente nas ações e funções dos comitês (Martins e Lima, 2017).

Braga *et al.* (2005), Azevedo e Barbosa (2011) definem a bacia hidrográfica como a presença de um conjunto de drenagem que converge toda a água precipitada até o seu ponto mais baixo, conhecido como exutório. Entretanto, Schussel e Nascimento Neto (2015) argumentam que para entender a bacia hidrográfica como unidade territorial, não se pode adotar o conceito clássico que a define apenas como a rede de drenagem e suas conexões, sendo necessário entendê-la como uma porção de espaço formada por um conjunto de elementos físicos, biológicos, sociais e políticos que interagem entre si, modificando todo o sistema.

Gestão de recursos hídricos pode ser definida como a utilização e a administração racional, democrática e participativa das águas (Binotto, 2012). Tucci (2008) comenta que a gestão das ações dentro do ambiente urbano pode ser definida de acordo com a relação de dependência da água através da bacia hidrográfica ou da jurisdição administrativa do município, do estado ou da nação. Neste caso, Carvalho (2018) sugere que para o sucesso de sua aplicação, a utilização dos recursos hídricos e as intervenções nos cursos d'água precisam ser efetuadas tendo em vista a sustentabilidade, promovendo a gestão de recursos hídricos fundamentada em um conjunto de ações destinadas a regular o uso, o controle e a proteção desses recursos.

Ao implementar o sistema de monitoramento ambiental, acena-se para uma perspectiva positiva em direção à transformação dos gestores públicos, que passam a pautar sua atuação segundo os preceitos do desenvolvimento sustentável, reconhecendo a interdependência dos serviços setorializados e a inevitabilidade da integração (Schussel; Nascimento Neto, 2015). Dictoro e Hanai (2019) ressaltam que ao tratar questões relacionadas à água e às bacias hidrográficas, a educação ambiental assume uma postura crítica e um olhar holístico, interdisciplinar e complexo, destacando seu papel para o desenvolvimento e manutenção da vida e das sociedades, e, ao mesmo tempo discute sua função ecológica na biodiversidade e na evolução e integração com as cidades.

Vilaça *et al.* (2009) afirmam que a bacia hidrográfica pode ser considerada uma excelente unidade de gestão tanto de elementos naturais, quanto sociais, devido ao seu aspecto integrador, e ressaltam que se deve levar em consideração as relações que a sociedade e suas atividades têm com o meio em que se encontram. Conforme Carvalho (2020) a delimitação deste território elaborada a partir de divisores de águas, permite analisar de forma sistêmica, elementos, fatores e relações ambientais, sociais e econômicas a partir de demandas e ofertas existentes em sua área. As características físicas e geomorfológicas e, o uso e ocupação do solo apresentam forte influência nos processos hidrológicos produzidos nas bacias hidrográficas (Mao e Cherkauer, 2009; Jarsjö *et al.*, 2012). Em virtude desse uso variado, a gestão das águas

passou a ser integrada englobando águas atmosféricas, superficiais, subterrâneas e, assim, incluindo a bacia hidrográfica como suporte para planejamento (Tundisi, 2005).

Adicionalmente, a gestão de bacias hidrográficas precisa atender ao planejamento governamental considerando o valor intrínseco da proteção, conservação e utilização sustentável de seus recursos naturais (Tundisi, 2008). De acordo com o MMA (2020) este instrumento veio com o objetivo de “estabelecer um pacto nacional para a definição de diretrizes e políticas públicas voltadas para a melhoria da oferta de água, em quantidade e qualidade, gerenciando as demandas e considerando ser a água um elemento estruturante para a implementação das políticas setoriais, sob a ótica do desenvolvimento sustentável e da inclusão social”.

Porém, observa-se que apesar desta visão sistêmica, os recursos hídricos, como parte importante do meio físico, “são facilmente comprometidos, sejam no âmbito da qualidade e/ou quantidade, sejam por características como alteração de cursos d’água ou diminuição dos canais de drenagem, tornando o atual cenário de degradação e descaso preocupante” (Silva, 2003). Desse modo, esta gestão hídrica a partir do território da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, tem entre os seus objetivos a gestão sistemática adequada dos recursos hídricos, considerando as diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do Brasil (Carvalho, 2020).

Percebe-se, então, que a heterogeneidade dos processos envolvidos na bacia correlacionados com as características do meio ambiente (ciclo hidrológico e variabilidade climática) são bastante complexos, sendo necessário avaliar esses fatores através de modelos hidrológicos para um melhor entendimento qualitativo e quantitativo das variáveis e auxiliar no sistema de gestão.

3.2 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica é uma ferramenta científica desenvolvida com o intuito de se compreender e representar os fenômenos físicos de superfície e subterrâneos das bacias hidrográficas e ainda simular diferentes cenários de clima e de uso do solo (Almeida e Serra, 2017). De acordo com Beskow *et al.* (2016) com objetivo de descrever quantitativamente os componentes do ciclo hidrológico e a interação destes em uma bacia hidrográfica, os modelos estão sendo cada vez mais utilizados como ferramenta para gestão de recursos hídricos.

Segundo Maidment (1993) um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus componentes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo. Rematando, Silva (2007) diz que o modelo hidrológico abarca um sistema

de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais. Assim, estes modelos possibilitam simular a parte terrestre do ciclo hidrológico, e em alguns casos transformam a precipitação da bacia em vazão.

Segundo Tucci (2005) os modelos surgiram com a necessidade de se obter séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos. A modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários. Para Lou (2010) os modelos nasceram dentro da necessidade de dar resposta às diferentes questões científicas. Inicialmente, explicaram componentes da relação precipitação-vazão como a infiltração, a evaporação, o escoamento em rios, entre outros, para depois buscar integrar os diferentes componentes causais da natureza e dos fatores antrópicos.

A dificuldade de se modelar uma bacia devido a heterogeneidade dos processos envolvidos tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998). Lima (2010) ressalta que deve-se observar em primeira análise qual o objetivo de seu uso, o que se deseja do modelo, em seguida devem ser considerados a quantidade e disponibilidade dos dados, a precisão requerida, a existência de corpo técnico capacitado para utilizar e interpretar as saídas do modelo, o tempo gasto com a modelagem e a existência de equipamentos com capacidade para o processamento. Almeida e Serra (2017) explicam que outros fatores que devem ser levantados na seleção de um modelo hidrológico, como a variabilidade temporal e espacial, as características físicas e climáticas da bacia em estudo e a disponibilidade de informações, pois, em geral, quanto mais detalhado o modelo, maior exigência de dados este irá requerer.

De acordo com Moreira (2005) os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

- Modelos Determinísticos: São aqueles modelos que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório.
- Modelos Estocásticos: São aqueles modelos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem têm um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.
- Modelos Empíricos: Quando sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, podendo possuir uma característica regionalista.

- Modelos Conceituais: São baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético, não sendo necessariamente baseado no processo real.
- Modelos Concentrados: São aqueles que a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características físicas relacionadas ao solo, à vegetação e à chuva.
- Modelos Distribuídos: Estes modelos permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados.

Em relação à escala temporal, os modelos hidrológicos são classificados como “modelos baseados em eventos”, também denominados de “modelos discretos”, ou como “modelos contínuos” (Wheater, 2008). Os modelos baseados em eventos objetivam a modelagem de períodos isolados de uma série histórica, buscando, por exemplo, representar eventos de cheia ou de recessão; já os modelos contínuos objetivam a modelagem de longos períodos, geralmente contemplando diferentes comportamentos hidrológicos ocorrentes ao longo do ano hidrológico (Marinho Filho *et al.*, 2012).

Os modelos hidrológicos são indispensáveis para prever e quantificar os fenômenos físicos que ocorrem na natureza, visto a impossibilidade de se mensurar diretamente tais acontecimentos. Lou (2010) elenca as principais aplicações da modelagem hidrológica:

- Entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos no exutório - o detalhamento do modelo permite ao pesquisador separar os fenômenos e, em consequência, estudar a sensibilidade das variações para bacias com diferentes características.
- Análise de consistência e preenchimento de falhas - através do modelo, é possível, após o ajuste, estender a série de vazão com base na precipitação.
- Previsão de vazão - o controle de cheia, a operação de obras hidráulicas, a navegação, entre outros, depende do conhecimento antecipado da ocorrência da vazão. O modelo de previsão em tempo atual deve buscar utilizar ao máximo as informações disponíveis no momento da previsão, atualizando parâmetros e/ou variáveis.
- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: conhecida a precipitação, e o risco de sua ocorrência, é possível estimar a vazão resultante para cenários de uso e modificação da bacia, visando ao dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema.

- Efeitos resultantes da modificação do uso do solo: a análise do escoamento resultante da modificação do uso do solo é um dos problemas complexos, que requer uma metodologia mais sofisticada que as utilizadas para resolver os problemas anteriores.

Sendo assim, a modelagem é uma ferramenta importante de apoio à gestão e à tomada de decisões sobre o uso do solo e da água (Viana *et al.*, 2018). Em concordância Santos *et al.* (2013) entende que modelos hidrológicos representem de forma consistente os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas e podem de fato contribuir para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Maidment (1993) conclui que a hidrologia está estreitamente relacionada às condições climáticas e, portanto, modelos hidrológicos e atmosféricos deveriam estar acoplados, sendo que, na prática, um estreito acoplamento torna-se bastante difícil, uma vez que modelos atmosféricos trabalham com resoluções espaciais muito maiores que as utilizadas na modelagem hidrológica.

3.2.1 Modelo SWAT

O Soil and Water Assessment Tool – SWAT, foi desenvolvido no início de 1990 e constituiu em ser projetado para incorporar dados de entrada de origem numérica e vetorial com objetivos de permitir a análise dos processos hidrológicos em grande escala espacial (Arnold *et al.*, 1999). Segundo Silva *et al.* (2015) este é um modelo distribuído que pode ser acoplado a um ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas), que considera a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. A integração dos SIGs com modelos hidrológicos permite a realização de inúmeras operações relacionadas à modelagem hidrológica de forma fácil e eficiente, tais como a caracterização física da bacia hidrográfica, delimitação, geração da rede de drenagem, divisão da bacia hidrográfica em áreas homogêneas, etc (Silva, 2014). Viana *et al.* (2018) afirmam que esse modelo se destaca pela sua robustez, capacidade de análise e correlação que obtém entre elementos físicos de uma bacia hidrográfica.

O SWAT permite representar distintos processos físicos em uma bacia hidrográfica como, a evapotranspiração, infiltração, escoamento de água, entre outros, com o objetivo de analisar os impactos gerados por alterações no uso do solo sobre o escoamento (superficial e subterrâneo), produção de sedimentos e também qualidade de água, de forma espacializada em bacias hidrográficas grandes e complexas, não instrumentadas (Neitsch *et al.*, 2011). Além disso, o modelo propicia uma grande flexibilidade na configuração das áreas de estudo que contribui para a previsão das alterações no regime hídrico, qualidade da água, produção de sedimentos e cargas de poluentes em função das alterações no uso e ocupação do solo (Srinivasan; Arnold, 1994; Wigmosta *et al.*, 1994).

Este modelo tem sido bastante empregado nas simulações hidrológicas, como o projeto HUMUS (Modelo de Unidades Hidrológicas dos Estados Unidos), que dá suporte ao desenvolvimento agrícola e ambiental do governo americano, e o projeto África financiado pela ONU e União Europeia para identificar as Unidades Hidrológicas do continente africano. Entre outros trabalhos pode-se citar Silva *et al.* (2015) que realizaram a validação do modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco, bem como a análise de sensibilidade dos parâmetros associados a modelagem hidrossedimentológica. Viana *et al.* (2018) analisaram a modelagem hidrológica por meio do modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama-PE, e Serrão *et al.* (2019) simulou alguns processos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas e sua relação com os impactos induzidos pelo homem na região sudeste do Estado do Pará.

Dessa forma, é notório que o SWAT é uma ferramenta com potencial de utilização nos mais diversos campos de atuação da ciência e da pesquisa, e em várias partes do país e do mundo (Fernandes, 2015). Por fim, Serrão *et al.* (2019) entendem que o SWAT pode ser uma ferramenta para gerenciar os recursos hídricos e o meio ambiente e também servir de base para os tomadores de decisão melhorarem o gerenciamento.

3.3 Vulnerabilidade Ambiental

De acordo com a definição do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a vulnerabilidade às mudanças climáticas pode ser sintetizada como o "grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas incluindo variabilidade climática e extremos" (IPCC, 2001). A alteração climática pode advir de processos internos naturais ou forçamento externo, tais como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas e alterações antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou na utilização dos solos (IPCC, 2014a). Marengo (2008) afirma que uma mudança de variabilidade climática aumenta a vulnerabilidade de um sistema ecológico e aumenta as incertezas no processo de administração da água. As condições climáticas, a cobertura vegetal, o embasamento geológico e a ação antrópica são alguns dos fatores que podem contribuir para uma maior ou menor vulnerabilidade hídrica.

O IPCC (2014a) elucida que a vulnerabilidade às mudanças e variações climáticas é representada por três elementos: exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação.

- **Exposição:** A presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos, infraestruturas ou bens econômicos, sociais ou culturais em locais e cenários que poderiam ser afetados adversamente.

- Sensibilidade: nível em que um sistema é afetado, tanto negativa como benéficamente, pela variabilidade climática. O efeito pode ser direto ou indireto.
- Capacidade adaptativa: a combinação de habilidades, atributos e recursos disponíveis para um indivíduo, comunidade, sociedade ou organização que pode ser usada para se preparar e agir de forma a reduzir impactos adversos, moderar danos ou explorar oportunidades.

Esses três componentes são capazes de influenciar a vulnerabilidade e podem aumentá-la ou diminuí-la de acordo com características inerentes ao sistema humano ou natural de interesse (Menezes *et al.*, 2018). Conforme Massmann e Wehrhahn (2014) vulnerabilidade é a capacidade adaptável do meio ambiente a partir da exposição, da suscetibilidade e da resiliência. Em outras palavras, maior capacidade adaptativa sinaliza um potencial para menor vulnerabilidade, enquanto maior exposição e sensibilidade sinalizam um maior grau de vulnerabilidade (Deressa *et al.*, 2011; Fellmann, 2012). Em geral, vulnerabilidade é o grau em que um sistema é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das mudanças ambientais (Jun *et al.*, 2011).

Vasconcelos (2019) explica que a análise de problemas complexos como é o caso da vulnerabilidade socioambiental, se deve pensar na utilização de indicadores que possam estar interligados e que agreguem várias informações que possam retratar o mais próximo possível uma realidade. Segundo UNIFESP (2016) a vulnerabilidade socioambiental é fruto de dois fatores: Processos sociais que resultam na precariedade das condições de vida e proteção social (renda, saúde, educação e acesso a serviços), assim como aspectos ligados à infraestrutura (habitações precárias, falta de acesso ao saneamento e água), o que torna determinados grupos populacionais mais vulneráveis aos desastres; Mudanças ambientais resultantes da degradação ambiental (áreas de proteção ambiental ocupadas, desmatamento de encostas e leitos de rios, uso e tipo do solo, poluição de águas, solos e atmosfera, entre outros), que tornam determinadas áreas vulneráveis devido à ocorrência de ameaças e seus eventos subsequentes.

Em síntese, a vulnerabilidade socioambiental, resultado de estruturas socioeconômicas que produzem, simultaneamente, condições de vida precárias e ambientes deteriorados, também é responsável por uma menor capacidade de gestão do risco de desastres e pela baixa resiliência local a esses eventos (Natenzon, 2002; Narváez *et al.*, 2009). Mesquita *et al.* (2010) relatam que cada elemento físico-natural contribui de uma maneira para a estabilidade/vulnerabilidade do ambiente, sendo vulnerabilidade o quanto uma determinada região é suscetível a efeitos adversos, como ações antrópicas ou próprias ações naturais. No Brasil, a região mais vulnerável, do ponto de vista social à mudança de clima, seria o semiárido (ou simplesmente o “sertão”) (Marengo, 2008).

Segundo Xenarios *et al.* (2016) a avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas é uma ferramenta promissora que pode auxiliar na identificação e melhoria de estratégias de adaptação em várias escalas geográficas. Preston *et al.* (2009) expõem que a avaliação da vulnerabilidade espacial realizada em nível local pode, portanto, ser uma ferramenta útil, que permite o engajamento entre pesquisadores e partes interessadas locais através da visualização da vulnerabilidade climática e da integração de seus determinantes biofísicos e socioeconômicos. Portanto, os indicadores escolhidos devem captar os aspectos biofísicos das mudanças climáticas, o estado atual do ambiente exposto às mudanças climáticas e a situação socioeconômica que define a capacidade adaptativa (Zurovec *et al.*, 2017).

3.3.1 Vulnerabilidade no Semiárido

A região NEB é a de maior densidade demográfica dentre as regiões semiáridas do mundo, o que acentua a pressão humana sobre o meio ambiente (Araújo *et al.*, 2014). Conforme Lindoso *et al.* (2013), o semiárido aparece como uma das regiões mais sensíveis à alteração do clima pois as bacias hidrográficas semiáridas, historicamente têm déficit de precipitação e nas últimas décadas têm sido degradadas devido à extensiva atividade antrópica como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e pecuária. Segundo INSA (2012) a escassez da água em regiões áridas e semiáridas tem sido tema de debates, políticas e pesquisas com o objetivo principal de subsidiar as ações capazes de permitir o seu aproveitamento racional, permitindo a convivência da população com os períodos de seca ou reduzida precipitação. Assim, Marengo (2008) conclui que se fazem necessários estudos de vulnerabilidade do semiárido a mudanças dos usos da terra, clima, aumento populacional e conflito de uso de recursos naturais.

Para ANA (2012) os impactos da seca dependem da vulnerabilidade das pessoas, das atividades econômicas e do meio ambiente. As pessoas pobres são, naturalmente, as mais vulneráveis, porque não dispõem de meios para enfrentar crises de qualquer natureza e a situação se agrava com as expectativas crescentes dos efeitos do clima, associados a reduzida disponibilidade, seja quantitativa ou qualitativa, de água superficial e subterrânea (INSA, 2012). Dentre as populações mais vulneráveis nesse contexto, encontram-se os produtores familiares rurais, cujas atividades produtivas estão intimamente relacionadas às oscilações do clima (Morton, 2007), de modo especial a agricultura de sequeiro e a pecuária que forma o conjunto econômico e social mais vulnerável à seca, visto que a evapotranspiração potencial média atinge 2.500mm/ano, gerando elevados déficits hídricos e limitando os cultivos agrícolas. Ou seja, o aumento das temperaturas em função da mudança do clima resultará no

aumento do consumo de água pelas culturas agrícolas e a redução da disponibilidade de água, colocando em risco a capacidade de produção (ADAPTACLIMA, 2020).

As projeções do IPCC (2014a) apontam para a intensificação das secas em escala global, tanto em intensidade quanto em frequência, trazendo sérios riscos de conflitos e vulnerabilidades cada vez mais complexas. A seca se origina de uma deficiência de precipitação durante um longo período de tempo resultando em escassez de água para alguma atividade, grupo ou setor ambiental. Marengo (2008) explica que as chuvas do semiárido apresentam enorme variabilidade espacial e temporal e o aumento de temperatura associado à mudanças de clima já seriam suficientes para causar maior evaporação dos lagos, açudes e reservatórios e maior demanda evaporativa das plantas. Spinoni *et al.* (2014) mostram que as áreas áridas aumentaram em todo o NEB entre 1951 e 2010, e destacam essa região como sob risco de desertificação.

As grandes cidades da região semiárida do NEB estão sofrendo com a escassez de água potável para a população e de abastecimento de energia nas áreas urbanas (Marengo *et al.*, 2016). Da Rocha Jr. *et al.* (2020) avaliaram que as secas mais severas e frequentes observadas na região NEB, em média, concentram-se na porção norte (3 à 5 meses). Por outro lado, o setor que experimentou as secas mais severas observadas durante o período 1961–2017 foi o NEB oriental (14 à 24 meses). A seca que se intensificou em 2012 e se estendeu até 2015 é considerada a mais severa das últimas décadas e teve impacto em muitos distritos das regiões semiáridas dos estados do NEB, afetando quase 9 milhões de pessoas (Marengo *et al.*, 2016).

A combinação de topografia diversificada e a influência de sistemas meteorológicos variados causam grande variabilidade climática no NEB, que possui três grandes áreas de variabilidade pluviométrica quase homogênea: o Centro-Oeste, o Norte e o Leste (Da Rocha Jr. *et al.*, 2019). Marengo (2008), ANA (2012) e da Rocha Jr. *et al.* (2020) definem que esta região possui basicamente três regimes chuvosos, sendo:

1. No norte da Região Nordeste, abrangendo a maior parte do Semiárido, o principal período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro e maio. O período chuvoso no norte é marcado pela ação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).
2. No Leste do Nordeste ou Zona da Mata, o principal período chuvoso ocorre de abril a agosto e as chuvas são ocasionadas principalmente pelos contrastes entre a temperatura do mar junto à costa e a temperatura do continente. A estação chuvosa no setor leste e parte da porção central

é marcada pela ação de VCAN e pela propagação de Ondas de Leste (OL) vindas do oceano atlântico.

3. No sul-sudoeste da Região Nordeste, o principal período chuvoso é de outubro a fevereiro. As chuvas são ocasionadas principalmente pela passagem de frentes frias que vêm do sul do país. VCAN e Frentes Frias são os principais geradores de chuva no setor sul da NEB durante o verão austral, e OL no outono / inverno.

No semiárido é frequente a ocorrência de períodos secos durante a estação chuvosa que, dependendo da intensidade e duração, provocam fortes danos nas culturas de subsistência (NAE 2005). Conforme concluído por Gutiérrez *et al.* (2014), além da necessidade de melhorar a coleta de dados e a organização das informações, é necessária uma articulação do papel da preparação para a seca no contexto das áreas de gestão de bacias hidrográficas nos níveis estadual e federal.

3.3.2 Riscos Hidroclimáticos

Os riscos se relacionam diretamente com o meio ambiente, ameaças físicas e naturais e com as condições sociais em que as pessoas vivenciam a situação de vulnerabilidade socioambiental presente no território (UNIFESP, 2016). Muitos dos principais riscos constituem desafios específicos para os países menos desenvolvidos e comunidades vulneráveis, dada a sua capacidade limitada de adaptação (IPCC, 2014b). Para Adger *et al.* (2007) a avaliação da vulnerabilidade é uma das principais ferramentas usadas para aprender mais sobre o grau de impacto dos riscos climáticos nos sistemas humanos e ecológicos e como esses sistemas respondem e lidam com essa ameaça em potencial.

O IPCC (2014a) define risco climático como o risco de impactos relacionados ao clima, ou seja, é o resultado da interação de perigos climáticos, com a exposição de sistemas naturais e humanos aos mesmos e sua vulnerabilidade. O risco diz respeito às consequências que podem ocorrer em determinado local em que algum atributo de valor está exposto e quando o resultado é incerto. É comumente representado como a probabilidade de ocorrência de um evento (perigo) multiplicada pelos impactos por ele causados.

O Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas do PBMC (2014) explica os fatores que ocasionam as alterações do clima: Em termos ecológicos, as projeções climáticas para o futuro sugerem uma redução dos já baixos volumes de chuva e do aumento de temperatura, levando a um aumento na evapotranspiração. Em termos de atribuição de causa física, sugere-se que essa mudança climática de redução na pluviometria associa-se

aos padrões oceânicos tropicais anormalmente mais aquecidos sobre o Pacífico e Atlântico (esperados num clima futuro de aquecimento global), os quais modificam o regime de vento de forma a induzir diminuição no transporte de umidade e prevalência de circulação atmosférica descendente (células de Hadley e Walker) sobre o Brasil tropical, inibindo a formação de nuvens convectivas e explicando assim as condições de chuva abaixo do normal (PBMC, 2014).

Em virtude do alto grau de vulnerabilidade das regiões norte e nordeste do Brasil, ressalta-se que as projeções mais preocupantes para o final do século são para os biomas Amazônia e Caatinga, cujas tendências de aquecimento na temperatura do ar e de diminuição nos padrões regionais de chuva são maiores do que a variação média global (PBMC, 2014). O Relatório do Clima do Brasil, produzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) avalia as mudanças climáticas no Brasil até o final do século XXI. Como consequências de tais cenários de mudanças no clima do NEB, o relatório do INPE lista aos seguintes impactos:

- A caatinga pode dar lugar a uma vegetação mais típica de zonas áridas, com predominância de cactáceas. O desmatamento da Amazônia também afetará a região.
- Um aumento de 3°C ou mais na temperatura média deixaria ainda mais secos os locais que hoje têm maior déficit hídrico no semiárido.
- A produção agrícola de subsistência de grandes áreas pode se tornar inviável, colocando a própria sobrevivência do homem em risco.
- O alto potencial para evaporação do NEB, combinado com o aumento de temperatura, causaria diminuição da água de lagos, açudes e reservatórios.
- O semiárido nordestino ficará vulnerável a chuvas torrenciais e concentradas em curto espaço de tempo, resultando em enchentes e graves impactos socioambientais. Porém, e mais importante, espera-se uma maior frequência de dias secos consecutivos e de ondas de calor decorrente do aumento na frequência de veranicos.
- Com a degradação do solo, aumentará a migração para as cidades costeiras, agravando os problemas urbanos.

O Quinto Relatório de Avaliação (WGII AR5) do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), analisa a forma como os padrões de risco e potenciais benefícios estão a mudar devido às alterações climáticas. A avaliação considera de que forma os impactos e riscos relacionados com as alterações climáticas podem ser reduzidos e geridos através da adaptação e mitigação. Dentre os riscos de vulnerabilidades descritos, pode-se destacar:

- Ecossistemas podem estar em risco de mudanças abruptas e irreversíveis: Muitas espécies e sistemas com capacidade limitada de adaptação estão sujeitos a riscos muito elevados com um aquecimento adicional de 2°C.
- Risco de insegurança alimentar e do colapso dos sistemas alimentares relacionados com o aquecimento, seca, inundação e variabilidade da precipitação e eventos climáticos extremos, principalmente para as populações mais pobres em ambientes urbanos e rurais.
- Risco de perda dos meios de subsistência e rendimentos rurais devido ao acesso insuficiente a água para consumo e para irrigação e produtividade agrícola reduzida.
- Aumento das restrições de água doce: Redução significativa na disponibilidade da água proveniente de extração fluvial e dos recursos hídricos subterrâneos, juntamente com o aumento da procura de água (ex.: para irrigação, energia e indústria, uso doméstico) e com a redução da drenagem e escoamento da água como resultado do aumento da procura evaporativa.
- Aumento das perdas económicas e das pessoas afetadas por eventos de calor extremo: impactos na saúde e no bem-estar, produtividade laboral, produtividade agrícola, qualidade do ar e aumento do risco de incêndios florestais.

A ANA (2016) afirma que saber como os sistemas de recursos hídricos passam por situações de estresse ou excesso hídrico sem grandes prejuízos aos usuários e à população é uma condição imprescindível no contexto de mudança climática. O IPCC (2014b) relata que gerir os riscos das alterações climáticas envolve decisões de adaptação e mitigação, pois a resiliência face aos impactos da mudança climática são as trajetórias de desenvolvimento sustentável que incluem processos interativos para garantir que a gestão de riscos eficaz possa ser implementada e mantida.

Para avaliar os riscos, devemos buscar informações sobre as condições físicas (ameaças da natureza ou da sociedade), ambientais e sociais (principais vulnerabilidades sociais e ambientais) do território (UNIFESP, 2016). A correta avaliação do risco é um ponto importante para que se alcance a segurança hídrica (Porto e Porto, 2014). Segundo ANA (2016) trata-se de uma abordagem sistêmica para identificar, avaliar e controlar o risco e priorizar ações. O conhecimento do risco possibilita adotar políticas e ações para reduzir a ocorrência dos desastres e suas consequências. A adoção dessas políticas e/ou medidas exige acurada avaliação dos riscos, a identificação das ameaças e o reconhecimento das condições de vulnerabilidade do local (UNIFESP, 2016).

3.3.3 Índices de Vulnerabilidade

Uma abordagem quantitativa comumente usada para avaliar a vulnerabilidade é a construção de um índice de vulnerabilidade com base em conjuntos ou combinações específicas de indicadores, que servem como *proxies* (Adger *et al.*, 2004). Cutter (2011) esclarece que a ciência da vulnerabilidade fornece a base para a construção de métricas que incluem o cálculo de índices para medição da vulnerabilidade social, assim como modelos geoespaciais para a intersecção dos processos sociais e físicos. A soma de múltiplos indicadores (variáveis) para o desenvolvimento de índices sem unidade tem sido cada vez mais aplicada nas avaliações de vulnerabilidades (Pritchett, 2001; Adger, 2006; Filmer e Usaid, 2014).

Conforme Menezes *et al.* (2018) os indicadores têm sido comumente usados como ferramentas para avaliar a vulnerabilidade de populações e territórios. O conjunto de indicadores utilizados para compor a análise da vulnerabilidade socioambiental deve ser absolutamente transparente, de fácil entendimento, capaz de gerar comunicação na sociedade e fornecer informações adequadas para a tomada de decisão (Vasconcelos, 2019). Füssel e Klein (2006) perfazem que os indicadores, além de permitirem comparações entre os sistemas avaliados, facilitam a visualização de informações sobre o que precisa ser adaptado de forma simples e objetiva.

O grande desafio da identificação e utilização dos fatores de avaliação está na escolha de variáveis apropriadas que representem os aspectos de interesse (como a seca, a pobreza, a desertificação, a vulnerabilidade, etc.), pois as mesmas podem não os refletir na íntegra, especialmente a nível local, e podem não ser relevantes em outras regiões e setores (Shiferaw *et al.*, 2014). Segundo Lindoso *et al.* (2013) alguns dos primeiros desafios dessa nova concepção consiste em:

- Identificar vulnerabilidades regionais – e locais – à mudança climática;
- Compreender como as populações vulneráveis respondem ao estresse climático e;
- Contextualizar o processo de adaptação/mitigação dentro da proposta do desenvolvimento sustentável.

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos sobre a criação de índices de vulnerabilidade. Alessa *et al.* (2008) propuseram um Índice de Vulnerabilidade de Recursos Hídricos do Ártico como uma ferramenta que as comunidades do Ártico podem usar para avaliar sua vulnerabilidade relativa - resiliência a mudanças em seus recursos hídricos a partir de uma variedade de processos biofísicos e socioeconômicos, que pode ser usado pelas comunidades para avaliar sua vulnerabilidade ou resiliência relativa a fatores que influenciam os recursos de água doce na escala da bacia hidrográfica. Jun *et al.* (2011) desenvolveram quatro

índices de vulnerabilidade hidrológica que inclui os impactos das mudanças climáticas - dano potencial por inundação, dano potencial por seca, deterioração potencial da qualidade da água e índice de avaliação de bacias hidrográficas. Enquanto Zurovec *et al.* (2017) criaram índices para explorar as diferentes dimensões da vulnerabilidade, usando um conjunto de 20 indicadores para avaliar quantitativamente a vulnerabilidade da população rural às mudanças climáticas no nível local em Bósnia e Herzegovina. E Busman *et al.* (2017) exibe métodos de elaboração da vulnerabilidade social e aplica a três municípios costeiros nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, por meio de quatro índices de vulnerabilidade social como subsídio à gestão costeira integrada dessas regiões.

Existem vários índices criados para estudar quantitativamente a seca em função dos dados meteorológicos. O primeiro índice desenvolvido para essa finalidade foi o Índice de Severidade da Seca de Palmer (PDSI), muito importante para incorporar os efeitos da evapotranspiração (Palmer, 1965). Posteriormente foi definido o PDSI autocalibrado (Sc-PDSI), estimando seus parâmetros com base nas características inerentes da série, que é espacialmente comparável e relata eventos extremos de umidade e seca em frequências esperadas para condições raras. (Wells *et al.*, 2004). Ele permite a medição de umidade (valor positivo) e seca (valores negativos), com base no conceito de oferta e demanda da equação do balanço hídrico, no entanto, o PDSI possui uma lacuna, isso está relacionado à sua escala temporal fixa (entre 9 e 12 meses) e a uma característica autorregressiva, em que os valores do índice são afetados pelas condições de até quatro anos no passado (Guttman, 1998).

Para fazer face ao problema de caracterização temporal das secas, foi desenvolvido o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). O cálculo do SPI é baseado em uma abordagem probabilística de precipitação, com em séries de longo prazo em diferentes escalas de tempo, como 1, 3, 6 ou 12 meses (Mckee *et al.*, 1993). Conforme da Rocha Jr. *et al.* (2020) a principal premissa do SPI é assumir que a precipitação é a variável chave para a classificação da seca, tornando-o adequado para classificar secas que vão desde o tipo edáfico de 1 mês até as hidrológicas que podem durar anos. Todavia, Vicente-Serrano *et al.* (2010) criticam o SPI, pois seu cálculo se baseia apenas em dados de precipitação, o índice não considera outras variáveis que podem influenciar as secas, como temperatura, evapotranspiração, velocidade do vento e capacidade de retenção de água no solo. A baixa necessidade de dados e a simplicidade explicam o amplo uso desse índice, sendo altamente correlacionado com o PDSI em escalas de tempo de 6 a 12 meses.

Vicente-Serrano *et al.* (2010) propuseram o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), um índice de seca multiescalar simples que combina dados de

precipitação e temperatura, como alternativa para estimativa da umidade do solo para períodos curtos e, para longo prazo, o armazenamento de água subterrânea. O SPEI permite a determinação da severidade da seca em diferentes escalas temporais, o que é essencial para avaliar as diferentes respostas à seca em diferentes sistemas hidrológicos, ambientais e socioeconômicos (Buguería *et al.*, 2014). Passos (2015) explana que uma vantagem do SPEI sobre os outros índices de seca amplamente utilizados é o fato de considerar o efeito da temperatura e a evapotranspiração potencial (ETP) na severidade da seca. Além disso este adapta os variados tempos de resposta das variáveis hidrológicas à variabilidade climática e facilita a identificação da complexidade da resposta do ecossistema a várias escalas de tempo de seca (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Beguiría *et al.* (2014) esclarece que o SPEI tem a sensibilidade do PDSI na medição da demanda de evapotranspiração (causada por flutuações e tendências em variáveis climáticas diferentes da precipitação), é simples de calcular e é multiescalar, como o índice de precipitação padronizado (SPI). As teorias do SPI e do SPEI são semelhantes, mas existem diferenças óbvias entre os parâmetros de cálculo do SPI e do SPEI (Pei *et al.*, 2020). O SPI considera apenas a precipitação, que é fácil de calcular e tem grande adaptabilidade no tempo e no espaço, mas o SPEI é calculado com base na diferença acumulada entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETP), que pode refletir de forma abrangente a mudança no balanço hídrico superficial (Zhang *et al.*, 2015). Vicente-Serrano *et al.* (2012) realizaram uma análise em escala global e mostraram que o SPEI se correlaciona melhor com anomalias em diferentes variáveis hidrológicas, agrícolas e ambientais do que o SPI.

Segundo Botai *et al.* (2016) o SPEI é o índice mais utilizado para definir anos chuvosos, secos e normais e monitorar secas. Azevedo *et al.* (2019a) avaliaram as características espaço-temporais das secas na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (BHRPA) com base no SPEI, este apresentou potencial para monitoramento de seca na BHRPA, devido à sua simplicidade e característica multiescalar para quantificar períodos úmidos e períodos secos. Bohn e Picollo (2018) aplicaram o SPEI para as planícies centrais da Argentina, durante os anos 1980-2016, onde foi possível definir ciclos climatológicos. Os resultados revelaram que o SPEI é um indicador adequado de flutuações hidrológicas na área de estudo devido à possibilidade de aplicá-lo em diferentes escalas de tempo (Bohn e Picollo, 2018). Assim, o SPEI pode explicar os possíveis efeitos da variabilidade climática e temperaturas extremas fora a conjuntura de aquecimento global, permitindo avaliar a gravidade da seca conforme sua intensidade e duração, e identificar o início e fim dos episódios ao longo do tempo e do espaço.

3.4 Análise Multivariada

Os métodos de análise multivariada são ferramentas que vem sendo amplamente utilizada nas diversas áreas do conhecimento (Engenharia, Ciências Ambientais, Psicologia, Educação, Geologia, Ciências Sociais, etc.). No campo das Ciências Humanas e Sociais, Matos e Rodrigues (2019) explicam que frequentemente é necessário mensurar fenômenos que não são diretamente observáveis, que chamamos de variáveis latentes ou construtos, como inteligência, personalidade, motivação, nível socioeconômico, democracia e vulnerabilidade social. Essas variáveis são inferidas, por meio de um modelo matemático, de outras variáveis que são observáveis (medidas diretamente). De acordo com Bakke *et al.* (2008) a estatística multivariada permite o estudo de fenômenos complexos, pois realiza o tratamento de diversas variáveis simultaneamente, mesmo quando não se conhece o modelo teórico das relações entre as variáveis.

A análise multivariada tem sua origem da análise univariada e bivariada, onde a extensão para o domínio multivariado introduz conceitos adicionais na qual todas as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas, assim seus diferentes efeitos não podem ser interpretados de forma expressiva separadamente. Guilhermino Neto (2013) defende o uso dos métodos multivariados, pois quanto maior o número de variáveis consideradas, mais ineficazes são os métodos univariados, devido ao aumento da dimensionalidade dos dados e dos problemas advindos de múltiplas comparações. Escofier e Pages (1992) afirmam que os métodos de análise de dados multivariados têm comprovado amplamente sua eficácia no estudo de grandes massas de informação complexas.

Técnicas multivariadas se referem a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre indivíduos ou objetos de investigação (Hair *et al.*, 2009). Fávero *et al.* (2009) definem a análise multivariada como uma técnica utilizada para estudar modelos em que todas as variáveis sejam aleatórias e inter-relacionadas, de modo que seus diferentes efeitos não possam ser interpretados de forma isolada. Para Mingoti (2005) a estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos aplicados em situações em que várias variáveis são medidas simultaneamente em cada elemento amostral.

A estatística multivariada permite a extração de um conjunto de dados originais considerando apenas as variáveis capazes de explicar uma parte significativa da variância total dos dados, por meio de combinações lineares (Silva *et al.*, 2016). A finalidade de sua aplicação pode ser de reduzir dados ou de simplificação estrutural, de classificar e agrupar, de investigar a dependência entre variáveis, de predição e de elaborar hipóteses e testá-las (Johnson; Wichern, 1992). Santos (2017) conclui que o propósito de uma análise multivariada de dados

incide em mensurar, explicar e prever o grau de relacionamento entre variáveis estatísticas quando uma diversidade de dados estão relacionados. Sendo assim, poucas variáveis precisam ser interpretadas, resumidas em apenas duas dimensões (Freitas *et al.*, 2015).

3.4.1 Análise Fatorial

A metodologia de Análise Fatorial (AF) foi criada no início do século anterior por Spearman (Spearman, 1904) com finalidade de obter um índice geral de inteligência (fator “g”), buscando encontrar uma forma de condensar a informação contida em um determinado número de variáveis originais em um conjunto menor, com perda mínima de informação. Lattin *et al.* (2011) definem a análise fatorial como o método que busca a identificação de fontes subjacentes de variação comum a múltiplas variáveis, de forma a reduzi-las a um subconjunto de fatores representativos das variáveis originais. A AF é uma técnica de interdependência que avalia todas as variáveis concomitantemente, relacionadas entre si.

A análise fatorial, uma das técnicas da estatística multivariada, é citada em diversos trabalhos. Para Bakke *et al.* (2008) ela pode ser aplicada quando há uma grande quantidade de dados e busca-se a sua sumarização com fatores latentes, que são definidos através de comportamento semelhantes entre as variáveis. Segundo Cruz e Topa (2009) este é um método estatístico que descreve a estrutura de dependência de um conjunto de variáveis, através da criação de fatores ou variáveis latentes, variáveis estas que teoricamente, medem aspectos comuns. Johnson e Wichern, (1992) completam que esses fatores são combinações lineares em que a estrutura de pesos foi estimada por componentes principais. Conforme Mingoti (2005) a análise fatorial é aplicada quando há um número grande de variáveis e correlacionadas entre si, com o objetivo de identificar um número menor de novas variáveis alternativas, não correlacionadas e que, de algum modo, sumarizem as informações principais das variáveis originais encontrando os fatores ou variáveis latentes.

A AF é exploratória, pois é utilizada com o objetivo de reduzir a dimensão dos dados, podendo, também, ser confirmatória, se for utilizada para testar uma hipótese inicial de que os dados poderão ser reduzidos a uma determinada dimensão e de qual a distribuição de variáveis, segundo essa dimensão (Reis, 1997). Nesse sentido, uma técnica exploratória “deixa os dados falarem por eles mesmos”, não existe uma intervenção do pesquisador predeterminando uma estrutura (Matos e Rodrigues, 2019), portanto, o pesquisador precisa ter clareza da análise que fez e de como ela foi calculada, inclusive para relatar eventuais limitações dos resultados.

Segundo Singh *et al.* (2004) a análise fatorial é uma técnica poderosa aplicada para reduzir a dimensão do conjunto de dados constituído por um grande número de variáveis

interrelacionadas, enquanto retém o máximo possível de variabilidade presente no conjunto. Conforme Matos e Rodrigues (2019) a AF é utilizada para investigar os padrões ou relações latentes para um número grande de variáveis e determinar se a informação pode ser resumida a um conjunto menor de fatores. Ao resumir os dados, a análise fatorial capta as dimensões latentes que representam o conjunto de dados em um número menor de conceitos do que as variáveis individuais originais (Hair *et al.*, 2005). Gontijo e Aguirre (1988) descrevem os seguintes objetivos da análise fatorial:

- Harmonizar ou condensar um grande número de observações em grupos;
- Obter o menor número de variáveis a partir do material original e reproduzir toda a informação de forma resumida;
- Obter os fatores que reproduzam um padrão separado de relações entre as variáveis;
- Interpretar de forma lógica o padrão de relações entre as variáveis.

O objetivo principal deste tipo de análise é descrever as relações de covariância entre as variáveis em alguns fatores ocultos e inobserváveis (Bakke *et al.*, 2008). Isso pode ser obtido identificando as variáveis que apresentam correlações altas com um grupo de variáveis específicas, mas que não se correlacionam (ou possuem correlações baixas) com as variáveis fora daquele grupo. Através do novo conjunto de variáveis criado, a carga fatorial será o meio de interpretar o papel que cada variável tem na definição de cada fator, sendo que as maiores cargas fatoriais representam a variável de maior representatividade do fator (Cruz e Topa, 2009). Obtém-se, então, grupos com todas as variáveis correlacionadas entre si, porém com baixa correlação com variáveis de um grupo distinto. Assim, Johnson e Wichern (1992) afirmam que cada grupo de variáveis representa um único constructo ou fator, que é responsável pelas correlações observadas.

Em resumo, a AF é um método para determinar o número de fatores existente em um conjunto de dados, e serve para determinar quais testes, ou variáveis, pertencem a quais fatores (Vicini, 2005). Deste modo, Matos e Rodrigues (2019) concluem que os dois principais usos da análise fatorial são resumo e redução dos dados, que podem ser muito úteis à medida que o número de variáveis utilizadas em técnicas multivariadas aumenta.

Estudos recentes mostram que este tipo de análise é eficaz para avaliar questões ambientais e sociais. Lima *et al.* (2019) utilizaram estatística multivariada para identificar os tipos de seca que ocorrem no Estado do Rio Grande do Norte, onde destacou-se a maior ocorrência das secas suave e moderada. Outrossim, Azevedo *et al.* (2019b) aplicaram a AF para determinar a vulnerabilidade socioeconômica e ambiental (IVSA) nos municípios do Estado da

Paraíba, onde verificou-se apenas 22 (10%) dos municípios apresentaram baixa vulnerabilidade, em que a composição se encontra no geral atrelada às variabilidades climáticas e as desigualdades sociais. Do mesmo modo, Sousa *et al.* (2019) usaram a AF para analisar a variabilidade da velocidade do vento nas microrregiões do Estado da Paraíba, onde o primeiro fator correlaciona-se com período de menor variabilidade de vento para a região, já o segundo com o intervalo de maior variabilidade de velocidade do vento.

Logo, percebe-se que utilizando as ferramentas de AF é possível criar um índice de vulnerabilidade hídrica e a partir dos resultados obtidos subsidiar instrumentos para a gestão de recursos hídricos no semiárido brasileiro, ambiente que apresenta riscos às mudanças climáticas devido à escassez de água.

3.4.2 Análise de Agrupamento

O termo Análise de Agrupamento (Cluster Analysis) foi introduzido por Tryon em 1939. Trata-se de uma análise que identifica grupos em objetos de dados multivariados (BAKKE *et al.*, 2008). O agrupamento das variáveis estudadas de acordo com suas características comuns ajuda na interpretação dos dados (Singh *et al.*, 2004). Conforme Linden (2009) esta técnica pode ser usada para reduzir a dimensão de um conjunto de dados, reduzindo uma ampla gama de objetos à informação do centro do seu conjunto. Para Hair *et al.* (2010) o desígnio principal da Análise de Agrupamento (AA) é situar as observações homogêneas em grupos, a fim de definir uma estrutura para os dados.

De acordo com Cruz e Topa (2009) o objetivo é alcançar homogeneidade dentro dos grupos e heterogeneidade entre os grupos. Devem-se buscar grupos mais homogêneos possíveis e que as diferenças entre os eles sejam as maiores possíveis (Härdle e Simar, 2007), as distâncias são analisadas com base na similaridade ou dissimilaridade. Segundo Colhiado (2017) qualquer medida de similaridade pode ser transformada numa medida de dissimilaridade e vice-versa, e a escolha da medida de similaridade/dissimilaridade é de fundamental importância, pois, diferentes coeficientes geram diferentes agrupamentos. Os coeficientes de similaridade capturam as características medidas e propiciam a construção dos agrupamentos. Em termos de variabilidade, no estágio inicial, tem-se que a variância de cada agrupamento é igual a zero e, no estágio final, tem-se a maior dispersão interna possível (Albuquerque, 2013). Quanto mais próximo de 1, melhor é qualidade estrutural do agrupamento (Colhiado, 2017).

As técnicas de agrupamento podem ser classificadas em hierárquicas e não-hierárquicas (Cormack, 1971). Os métodos hierárquicos aglomerativo ou divisivo não requerem o conhecimento, a priori, do número de grupos ou da partição inicial. Apresentam, no entanto,

uma desvantagem, uma vez que uma parcela que foi designada a um grupo não pode ser realocada em um outro grupo (Lattin *et al.*, 2011). Os métodos não hierárquicos de agrupamento foram desenvolvidos para agrupar objetos, parcelas, ou itens, ao invés de variáveis, sobre os dados originais, em k grupos, que podem ser definidos antecipadamente, ou determinados durante a execução do procedimento (Johnson; Wichern, 2007). Segundo Hair *et al.* (2010) diferente dos métodos hierárquicos, os procedimentos não hierárquicos designam objetos a agrupamentos, assim os números de agregados a serem formados são especificados.

Essa técnica sumariza dados para interpretação, e utiliza métodos que procuram grupos excludentes, ascendentes, reduzindo as informações de um conjunto de n parcelas para informações de um novo conjunto de k grupos, onde k é significativamente menor que n , e aplicando a técnica hierárquica, resultando em um dendrograma de exclusão (Ludewing *et al.*, 2009). A análise de agrupamentos utiliza o valor das variáveis para montar um dendrograma que agrupa amostras e/ou variáveis em classes, destarte, objetos semelhantes se encaixam na mesma classe reduzindo, então, os dados (Manly, 2008). Os nós do dendrograma representam agrupamentos, e cada um deles é composto pelos grupos e/ou parcelas (grupos formados apenas por ele mesmo) ligados a eles (nós).

Albuquerque (2013) explica que as técnicas de análise de agrupamento exigem, de seus usuários, a tomada de uma série de decisões independentes que, por sua vez requerem o conhecimento de suas propriedades, da escolha da similaridade ou dissimilaridade, dos diversos algoritmos e de um método de validade, que podem representar diferentes agrupamentos. O critério baseia-se normalmente em uma função de dissimilaridade: Os grupos determinados por uma métrica de qualidade devem apresentar alta homogeneidade interna e alta separação (heterogeneidade externa) (Linden, 2009). Tendo em vista que clustering é uma técnica de aprendizado não supervisionado pode servir também para extrair características escondidas dos dados e desenvolver as hipóteses a respeito de sua natureza.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco (BHSRSF), que abrange 59,4% de Pernambuco, 39,5% da Bahia e 1,1% de Alagoas. A região do Submédio São Francisco é a segunda maior da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF), com 110.446,00 km², ou 17% da área da BHRSF (CBHSF, 2020). Estende-se da cidade de Remanso, constituindo-se na divisa natural entre os estados da Bahia e de Pernambuco, onde o rio inflexiona o seu curso para o leste, até alcançar o limite com Alagoas, compreendendo 440 km de extensão (Figura 1).

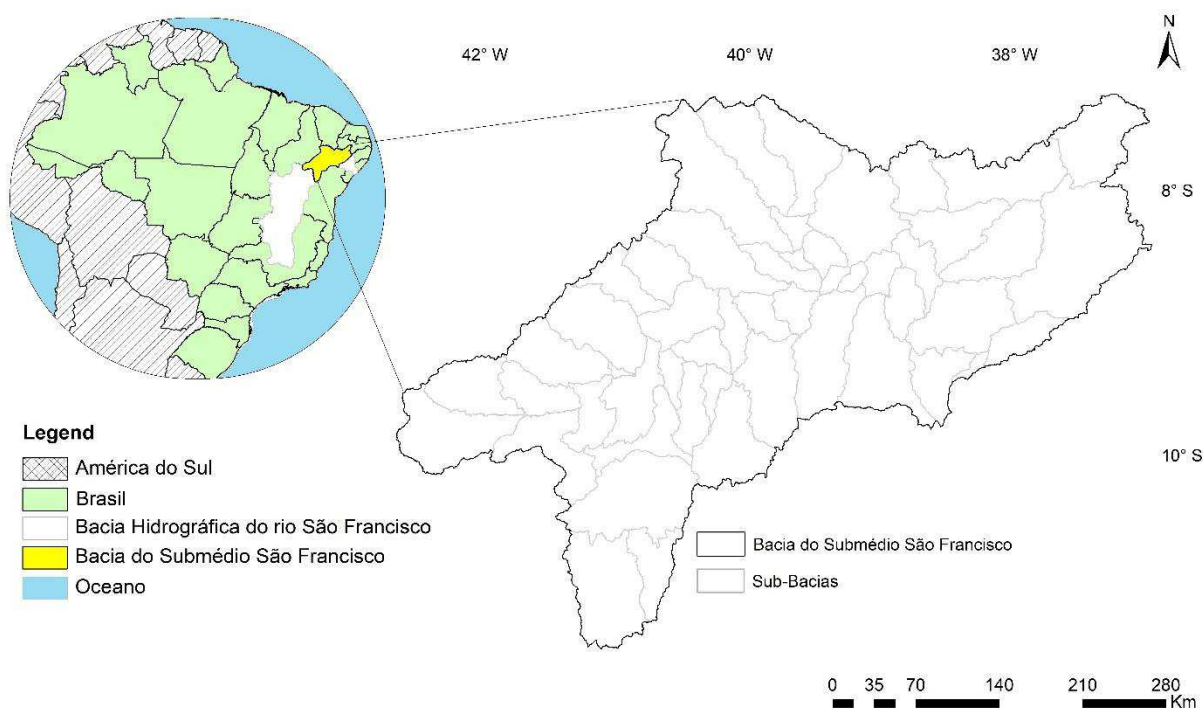


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco.

Está localizado entre os paralelos 07°0'0'' e 10°30'0'' de Latitude e entre os meridianos 37°0'0'' e 41°0'0'' de Longitude. As principais sub-bacias inseridas na área de estudo são as dos rios Pontal, Garças, Brígida, Pajeú, Moxotó e Xingó, pela margem esquerda; enquanto na margem direita ficam as sub-bacias de Tourão, Salgado, Vargem, Curaçá, Macuru e Poço Comprido, como descrito pela CODEVASF (1999). Para avaliar as vulnerabilidades associadas aos recursos hídricos, é necessária uma análise dos diferentes tipos de usos e das demandas de recursos hídricos que prevalecem na BHSRSF (ANA, 2005). A seguir apresentam-se as principais características e atividades desenvolvidas nesta região:

4.1.1 Clima

O clima é BSh segundo classificação Köppen, caracterizado como tropical semiárido, com temperatura média anual em torno de 26°C. Os meses mais quentes são outubro e novembro e os mais frios junho e julho. As médias mensais de temperatura média do ar variam de 24,1°C a 28°C, ocorrendo uma pequena amplitude térmica anual, atribuída à proximidade da região em relação ao equador terrestre, com desvio padrão menor que 2°C (Teixeira, 2010). Apresenta regime de chuvas de outono-inverno com total anual de cerca de 550 mm concentradas, principalmente, entre os meses de novembro a março (Sá *et al.*, 2009). Mascarenhas (2008) observa que é inexpressiva a contribuição hídrica dos tributários da bacia, assim como é elevado o grau de susceptibilidade à desertificação.

4.1.2 Vegetação

A vegetação de caatinga é predominante em quase toda a área do Submédio do Vale do São Francisco, constituída principalmente por formações xerófilas, lenhosas, decíduais, normalmente espinhosas, com presença de plantas suculentas, tanto com padrão arbóreo como arbustivo, de pouco densa a densa e com estrato herbáceo estacional (Andrade Lima, 1992). Sá *et al.* (2009) complementa que a depender do grau de xerofitismo, a Caatinga pode ser hiperxerófila - associada a climas áridos e semiáridos - e hipoxerófila, relacionada a um tipo climático semiárido menos seco que o precedente.

Também nessa região predomina a Savana Estépica (Caatinga) nas suas diversas gradações (Florestada, Arborizada, Parque), com pequenos trechos de Tensão Ecológica (Savana, Savana Estépica e Floresta Estacional). O uso antrópico é intenso, em especial ao longo do Vale do Rio Moxotó (AL) (MMA, 2006).

4.1.3 Relevo

Topograficamente, a região de estudo se caracteriza por apresentar relevo plano a ondulado com vales muito abertos. A maior parte da área se encontra sobre superfície sertaneja, apresentando um grau de entalhamento variado ligado às flutuações eustáticas do nível de base do Rio São Francisco durante o quaternário, com feições de relevo diversas, indo de suave ondulado a forte ondulado (Sá *et al.*, 2009) A altitude varia de 200 a 800m na Chapada Cretácea do Araripe, que se prolonga para leste através da Serra dos Cariris, esculpida em rochas graníticas e gnáissicas de idade pré-cambriana.

Do lado sul, ressaltam-se as formas tabulares do Raso da Catarina, esculpidas em sedimentos da bacia de Tucano, com altitude variando de 200 a 300m (CODEVASF, 1999).

Não são observados grandes inselbergues, sendo as fases mais movimentadas do relevo observadas em encostas onde a formação geológica parece ser mais rica em quartzo e quartzito, mais resistentes à erosão (Silva *et al.*, 2000). Trentin e Robaina (2005) observaram que o mapa hipsométrico tem fundamental importância na análise da energia do relevo, indicando condições mais propícias à dessecação para as áreas de maior altitude e de acumulação para as áreas de menor altitude. E assim quanto mais longo for o comprimento da bacia e mais íngreme a topografia, maior será o poder erosivo do escoamento (Azevedo *et al.*, 2020).

4.1.4 Geologia

Está constituída por várias unidades litoestratigráficas e estruturais, que compõem a geologia da região, desde o Pré-Cambriano Indiferenciado até os sedimentos e coberturas inconsolidadas do Quaternário. Com base no MMA (2006) nesta região, compreendida entre o reservatório de Sobradinho (Remanso) e Paulo Afonso, o domínio é das rochas ígneas e metamórficas do Pré-Cambriano Indiferenciado com algumas áreas de ocorrências dos calcários do Grupo Bambuí (PEAb) e dos calcários Quaternários da Formação Caatinga na margem direita do São Francisco. Já nas proximidades de Paulo Afonso, na margem direita do São Francisco, observa-se uma grande área de Formação Mariza, constituída de arenitos Cretácicos que fazem parte da região conhecida como o “Raso da Catarina”.

4.1.5 Solo

Segundo o MMA (2006) no submédio predominam solos com aptidão para a agricultura irrigada: latossolos e argilossolo vermelho e alissolo crômico. Além desses solos, nessas regiões também ocorrem cambissolos háplico, areias quartzosas e litossolos. Os solos potencialmente irrigáveis são proporcionalmente pouco extensos, predominando solos de menor aptidão para a agricultura: (1) os luvisolos crômicos são rasos e suscetíveis à erosão; (2) as areias quartzosas e os regossolos apresentam textura grosseira com taxas de infiltração muito altas e fertilidade baixa; e (3) os planossolos háplicos e os planossolos nátricos contêm elevados teores de sódio. Sá *et al.* (2009) mostra que a grande maioria dos solos da região apresenta potencial de fertilidade natural médio. As limitações para o manejo estão mais ligadas aos de profundidade, pedregosidade, declive e regime hídrico.

4.1.6 Hidrografia

A hidrografia é orientada no sentido SO - NE, sendo voltada para o Rio São Francisco, cuja calha encontra-se a 370m de altitude média (Sá *et al.*, 2009). No submédio São Francisco,

ocorrem diversos rios intermitentes, que apresentam baixas vazões e, conseqüentemente, baixa capacidade de diluição de poluentes. São escassos e esparsos os dados sobre qualidade de água destes corpos de água. A vazão média anual máxima (m^3/s) é de 4.660 em fevereiro e a mínima 1.507 em setembro, ambas medidas no município Pão de Açúcar (AL) e tem como reservas dos aquíferos $1.575m^3/s$ (MMA, 2006).

São precárias as condições atuais de navegabilidade do rio São Francisco, pois este sempre foi navegado sem maiores restrições entre Pirapora e Petrolina–Juazeiro (1.312 km) no médio curso, e entre Piranhas e a foz (208 km) no baixo curso (MMA, 2006). A navegação vem enfrentando deficiência tanto na entrada do lago de Sobradinho, onde um intenso assoreamento multiplica os bancos de areia e altera as rotas, e no trecho imediatamente a jusante da eclusa de Sobradinho, onde a instabilidade de operação da usina hidroelétrica altera frequentemente as profundidades disponíveis (ANA, 2005). Os grandes trechos regularizados do São Francisco acarretaram alterações nas oscilações da vazão natural do rio, quebrando o ciclo natural da desova dos peixes. Apesar dessas dificuldades, o potencial pesqueiro da bacia é expressivo (MMA, 2006).

4.1.7 Aspectos Socioeconômicos

A população residente no submédio é de 2.239.414 hab. (IBGE, 2010), o que representa 15,2% do total da BHRSF. Na esfera econômica, a região está fortemente contemplada com a presença de indústrias e agroindústrias, a exemplo da cana-de-açúcar em Juazeiro na Bahia, para atender programas como o álcool combustível e o biodiesel (CBHSF, 2020). O Submédio São Francisco também é um importante produtor de energia elétrica através de suas hidrelétricas: Sobradinho (1.050 MW), Luiz Gonzaga – anteriormente denominada Itaparica (1.480 MW) Paulo Afonso (4.282 MW) (MMA, 2006).

Com base em informações obtidas em MMA (2006) e ANA (2005) a irrigação é uma atividade social e econômica dinâmica, geradora de emprego e esta é a atividade mais importante e estratégica para redução da pobreza e promoção do desenvolvimento regional. A BHRSF apresenta 342.712ha irrigados, onde 27,2% são referentes ao Submédio, constituindo 93.180ha. A exploração das terras em sequeiro é determinante para o crescimento das atividades agropecuárias, sobretudo considerando-se a relativa limitação dos recursos hídricos. A ocupação das áreas extensivas se deu pela pecuária bovina, caprina e ovina, podendo-se afirmar, que todo o bioma Caatinga e o Cerrado estão antropizados por essas atividades.

4.1.8 Saneamento

Segundo o MMA (2006) pela grande deficiência nos serviços de saneamento na região do Semiárido, tanto a população urbana quanto a rural requerem atenção especial. Os resultados apresentados no caderno da região hidrográfica mostram que o total de coleta de resíduos de ambas as áreas é de 80,4%. No que se refere ao abastecimento de água, a ausência de fontes hídricas, com garantia de qualidade e quantidade, dificulta o atendimento à população, cerca de 88% é abastecida por sistemas de água potável (ANA, 2005). Em relação à qualidade da água subterrânea para consumo humano e irrigação é considerada própria e de boa qualidade nas bacias sedimentares de Araripe e Tucano-Jatobá (CBHSF, 2016).

No tocante ao tratamento de esgotos sanitários, a presença de rios intermitentes dificulta a diluição dos efluentes (ANA, 2005). A coleta de esgotos no Submédio consiste em 57,8%. Considerando os parâmetros monitorizados, o efeito de fontes poluentes de origem doméstica e agrícola é moderado, e a qualidade da água mantém um padrão geral aceitável, com uma tendência geral de evolução positiva comparativamente a 2004. Contudo, há referências a situações de degradação que passam despercebidas pela análise dos dados das redes de monitoramento instaladas (CBHSF, 2016).

4.2 Banco de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa são disponibilizados por Silva (2014), os quais foram extraídos a partir da modelagem com SWAT para a Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco. O trabalho de Silva (2014) objetivou calibrar e validar o modelo SWAT para a simulação do escoamento superficial e aporte de sedimentos na BHSRSF. O resultado das simulações para diferentes usos do solo possibilitou a identificação de áreas que apresentam o maior potencial a erosão hídrica, pedológica e associada ao relevo, como também toda a interação da interface do sistema solo-planta-atmosfera (Silva, 2014).

De acordo com Silva (2014) o processo de modelagem com o SWAT se dá inicialmente através da inserção de dados relacionados às características físico-climática da bacia. Os dados de entrada no modelo SWAT correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs) e a dados alfanuméricos. No estudo foram utilizadas séries históricas de dados mensais de vazões oriundos de três estações fluviométricas e dados meteorológicos diários provenientes de nove estações climatológicas distribuídas na área de estudo (Silva, 2014). O Quadro 1 apresenta um esquema com os dados de entrada do modelo.

Quadro 1. Dados de entrada inseridos no SWAT.

Parâmetros climáticos do modelo	Utilizando 9 estações meteorológicas distribuídas na área de estudo para o período de 1970 a 2010, que compõem a rede de monitoramento meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) obteve-se dados diários de precipitação (PCP), temperatura máxima (TMP _{máx}) e mínima do ar (TMP _{mín}), radiação solar (SLR), velocidade do vento (WND) e umidade relativa (HMD). Os dados mensais necessários para o gerador climático são valores médios e desvios dos registros climatológicos da área de estudo.
Vazão	Os dados de vazão para a BHSRSF foram adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA) obtidas por meio de 11 estações fluviométricas. Foram utilizadas séries históricas distintas para cada estação fluviométrica tendo em vista que a disponibilidade e consistência dos dados observados.
Parâmetros de solo do modelo	As informações que subsidiaram esta avaliação foram basicamente do mapa de solos na escala 1:5000000 fruto da parceria entre a EMBRAPA e o IBGE, permitiu uma visualização espacial dos principais tipos de solos. Foi possível adicionar as classes de solos presentes na BHSRSF e seus respectivos parâmetros que foram obtidos após a coleta de amostras de solos na área de estudo.
Análise Morfométrica	Foram coletados 38 pontos de controle na área de estudo através de GPS (GARMIN E-TREX 10) e inseridos no SIG ArcGis 9.3. Com base no MDE foi obtida a rede de drenagem e assim foi possível realizar a delimitação e discretização da bacia em sub-bacias. Utilizando recursos do SIG foram calculados alguns parâmetros físicos: área, perímetro, comprimento das redes de drenagens e número de segmentos dos rios.
HRU	A bacia foi dividida em sub-bacias. Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológicas, as quais correspondem a uma única combinação de uso da terra, declividade e tipo de solo.
Reservatórios	O SWAT possibilita a inserção de reservatórios na configuração da bacia hidrográfica, tendo em vista o impacto que os mesmos propiciam a vazão natural e as condições locais do ambiente, para realização desse estudo foram incorporadas duas principais barragens ao longo do curso do Rio São Francisco: Sobradinho e Itaparica-Luiz Gonzaga.
Análise de Sensibilidade	A análise de sensibilidade é um instrumento para previsão dos parâmetros que possuem maior impacto sobre as simulações hidrológicas e sedimentológicas elaboradas diretamente pelo modelo ArcSWAT.
Calibração	A calibração é uma ferramenta que permite ao usuário editar o desempenho global das variáveis de entrada do modelo. Essa calibração foi efetuada por meio da rotina de autocalibração existente no próprio modelo, considerando-se as faixas de valores de cada parâmetro.
Validação	A etapa de validação consistiu na análise dos hidrogramas observados e simulados para três estações fluviométricas inseridas na área de estudo e dos dados observados e estimados pelo SWAT de ETP para nove estações meteorológicas e a verificação da acurácia dos dados através dos índices estatísticos.

O modelo SWAT foi concebido para simular fisicamente os processos de fluxo de água no rio, escoamento de água na superfície, percolação e infiltração, recarga de aquíferos rasos e profundos bem como o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (Arnold *et al.*, 1998). É um modelo de larga-escala que divide a bacia hidrográfica em sub-bacias conectadas por uma rede de drenagem (Oliveira *et al.*, 2018; Serrão *et al.*, 2020). Com relação aos dados de entrada, Machado e Vettorazzi (2003) relata que eles podem ter origem das mais diversas fontes (imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solo, hidrografia, etc) e em diferentes escalas e cujos resultados são gerados comumente em forma de mapas.

O ciclo hidrológico no modelo SWAT tem como base a Equação (1), também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

Em que:

SW_T : é o conteúdo final de água no solo (mm);

SW_0 : é o conteúdo de água no solo disponível para as plantas (mm);

P: é a precipitação pluvial (mm);

Q_{sup} : é o escoamento superficial (mm);

ET: é a evapotranspiração (mm);

W_a é a percolação (mm) e;

Q_{sub} : é o fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

É importante ressaltar que para gerar resultados consistentes, os dados de entrada do modelo devem possuir o maior número de observações possíveis mesmo esse recurso sendo limitado por condições de disponibilidade de informações ou de orçamento, pois a construção do banco de dados é a principal ferramenta para estudos que utilizam o SIG como sistema de gerenciamento de informações (Silva, 2014).

Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados (Silva, 2014). Neste estudo foram delimitadas 52 sub-bacias e as variáveis obtidas consistem em valores mensais, expressos em milímetros de: Precipitação (PRP), Evapotranspiração potencial (ETP), Evapotranspiração real (ET), Umidade do solo (SW), Percolação (PERC), Escoamento Superficial (SURQ), Recarga de Aquífero (GW) e Produção de água (WYLD), para o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010.

4.3 Metodologia

4.3.1 Análise Fatorial

Realizou-se a análise fatorial (AF) para identificar as relações existentes entre o conjunto de variáveis, definidas como dependentes, e uma variável latente ou fatores (Corrar *et al.*, 2007; Hair *et al.*, 2009). Tal técnica possibilitou identificar as dimensões isoladas da estrutura dos dados para então determinar o grau em que cada variável é explicada por cada dimensão ou fator (Manly, 2008). A composição do modelo de análise fatorial foi calculada com base na Equação (2):

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que:

X_i : variável analisada padronizada (média zero e desvio padrão);

a_i : é uma constante (carga fatorial);

F : Fator (com média zero e desvio-padrão) comum a todas as variáveis e;

ε_i : erro (que é específico de cada variável).

De acordo com Härdle e Simar (2007), a correlação é uma medida mais adequada para avaliar o grau de relacionamento linear entre variáveis estatísticas. As correlações entre os pares de variáveis podem ser organizadas em uma matriz de correlações (Matos e Rodrigues, 2019). O triângulo inferior da matriz exibe as correlações simples entre todos os pares possíveis de variáveis. Os elementos da diagonal, que são todos igual a 1, em geral são omitidos. O cálculo da matriz de correlação é feito através do coeficiente de Spearman (Equação 3).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (3)$$

em que:

d_i : é a diferença entre cada posição de x e y ;

n : é o número de observações.

O critério de Kaiser-Meyer-Olkin é outra forma para identificar se o modelo de análise fatorial que está sendo utilizado está adequadamente ajustado aos dados, isto se dá testando a consistência geral dos dados (Cruz e Topa, 2009). O grau das correlações simples com as correlações parciais foi estimado utilizando-se a estatística proposta pelo teste Kaiser Meyer Oklin (KMO) de acordo com a Equação (4).

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (4)$$

em que:

r_{ij}^2 : para todo $i \neq j$ é o coeficiente de correlação original entre variáveis e ;

a_{ij}^2 : é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

Para interpretação do critério de KMO podemos utilizar a seguinte referência, pequenos valores de KMO indicam que o uso da análise fatorial não é adequado, e quanto mais próximo de 1, mais adequada é a aplicação da análise fatorial nos dados, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Critério de Kaiser-Meyer-Olkin.

Valor	Grau da Adequação da Amostra
> 0,90	Ótima
De 0,80 à 0,90	Boa
De 0,70 à 0,80	Razoável
De 0,60 à 0,70	Baixa
De 0,50 à 0,60	Ruim
< 0,50	Inadequado

Fonte: Hair *et al.* (2005).

De acordo com o número de observações que fazem parte do conjunto de dados analisados torna-se necessário a delimitação ou a seleção das dimensões que possam descrever com maior grau a variabilidade presente na análise. Neste estudo foi utilizada a técnica de raiz latente como método restritivo para limitar a quantidade de fatores. Tal técnica parte do princípio que autovalores considerados insignificantes devem ser descartados da análise, como critério de exclusão toma-se valores inferiores a 1, e, portanto os autovalores selecionados podem explicar assim a variância de pelo menos uma variável para que seja mantida a interpretação (Hair *et al.*, 2009), ou seja, representa a variância total explicada por cada fator.

Um conceito introduzido pela Análise Fatorial é comunalidade, quantia total de variância que uma variável original compartilha com todas as outras variáveis incluídas na análise, que pode ser entendida também como a quantia de variância explicada pela solução fatorial para cada variável (Trindade, 2013). A comunalidade foi utilizada como critério para validação das variáveis no ajuste do modelo fatorial e foi determinada pela estimativa da variância de X_i explicada através dos fatores comuns e foi determinada seguindo a Equação (5).

$$h_i^2 = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{im}^2 \quad (5)$$

A rotação *Varimax*, comumente usada, distribui as cargas dos Fatores de forma que sua dispersão é maximizada através da minimização do número de coeficientes grandes e pequenos (Singh *et al.*, 2004). Com intuito de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais e atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo foi utilizado a técnica de rotação dos fatores a partir do método *Varimax* normalizada (Hair *et al.*, 2009), pois estas mantem os eixos perpendiculares entre si, ou seja, ortogonais. Logo, quanto maior o valor absoluto da carga fatorial, mais importante é a carga na interpretação (rotulação) do Fator (Hair *et al.*, 2005).

4.3.2 Índice de Vulnerabilidade Hídrica

O Escore Fatorial é uma medida composta criada para cada variável observável, sobre cada fator extraído na análise fatorial (Cruz e Topa, 2009). Para a construção do Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVH) foi realizada a combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem as principais características hidroclimáticas da área de estudo a partir da Equação (6). Por isso, os escores fatoriais são padronizados para que tenham média zero e desvio padrão igual a 1 (Velicer; Jackson, 1990).

$$F_{ij} = b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_p x_{ip} \quad (6)$$

em que:

F_{ij} : é a variável dependente não observável, mas que pode ser estimada por intermédio da técnica de análise fatorial fazendo uso da matriz do vetor X de variáveis observáveis.

A matriz F_{ij} de regressão a ser estimada a partir dos n escores fatoriais pode ser prejudicada devido à magnitude e/ou devido às unidades de medida das variáveis dependentes x . Neste caso, torna-se necessário substituir a matriz original x_{is} pela matriz de variáveis padronizadas W_{ij} e estimados seguindo a Equação (7):

$$W_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s} \quad (7)$$

em que:

x_i : é o valor observado;

\bar{x} : é o valor médio e;

s : é o desvio padrão das observações.

Assim, o IVH foi obtido de acordo com a Equação (8):

$$IVH = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\lambda_j}{\sum_j \lambda_j} \times FP_{ij} \right), 0 \leq IVH \leq 1 \quad (8)$$

em que:

λ_i : representa a variância explicada por cada fator;

$\sum_j \lambda_j$: é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e;

FP_{ij} : é o escore padronizado para se obter os valores positivos dos escores originais essenciais para hierarquizar as observações.

Com intuito de classificar a incidência da vulnerabilidade hídrica na BHSRSF a partir do resultado do IVH foi utilizada a técnica estatística dos percentis que divide o número de observações por ordem crescente de frequência, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação do IVH.

Vulnerabilidade	Intervalo	Percentil
Inexistente	0,40 - 0,69	100%
Baixo	0,34 - 0,40	75%
Médio	0,28 - 0,34	50%
Moderado	0,20 - 0,28	25%
Alto	0,18 - 0,20	10%
Extremo	0 - 0,18	5%

Fonte: Autora (2021).

4.3.3 Análise de Agrupamento

A análise de agrupamento foi utilizada para agrupar as sub-bacias que obtiveram características semelhança quanto a distribuição dos valores de IVH. Foi empregado o método de K-means da Cluster Analysis, o qual possui um parâmetro de entrada, k, que corresponde à quantidade de grupos a serem identificados pelo algoritmo. O K-means é baseado na distância euclidiana, tendo como critério de agregação o centroide (Jinyin *et al.*, 2017).

Este método é o não-hierárquico que consiste em um procedimento onde, dado um número de clusters previamente determinado, calcula pontos que representam os “centros” destes clusters e que são espalhados homoganeamente no conjunto de respostas obtidas heurísticamente, até alcançar um equilíbrio estático (Hair *et al.*, 2005). O critério de agrupamento K-means é descrito pela Equação (9).

$$E = \sum_{k=1}^k \sum_{x_i \in C_k} d(x_i, x_{0k}) \quad (9)$$

em que:

x_{0k} é o centroide do cluster C_k e;

$d(x_i, x_{0k})$ é a distância entre os pontos x_i, x_{0k} .

O centroide pode ser a média ou a mediana de um grupo de pontos.

4.3.4 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração

Com base nos dados advindos do SWAT foi calculado o índice padronizado de precipitação e evapotranspiração SPEI desenvolvido por Vicente-Serrano *et al.* (2010), seu cálculo permite comparar a severidade da seca através do tempo e do espaço, uma vez que pode ser calculado em uma ampla variedade de climas.

O SPEI é obtido pela diferença entre a precipitação (PRP) e evapotranspiração potencial (ETP), estimando, assim, a descrição da severidade das condições de seca em determinadas regiões (Lee *et al.*, 2017). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda a equação de Penman-Monteith (PM-FAO 56) (Equação 10), como padrão para calcular ETP, pois os resultados apresentam estimativas mais seguras comparadas aos dados de lisímetros (Allen *et al.*, 1998).

$$ETP = \frac{0,408\Delta (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (10)$$

em que:

ETP: Evapotranspiração Potencial (mm.d⁻¹);

G: densidade do fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².d⁻¹);

Δ : declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa.°C⁻¹);

U_2 : velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo (m.s⁻¹);

T: temperatura do ar (°C);

e_s : pressão de saturação do vapor (kPa);

e_a : pressão real do vapor (kPa) e;

γ : fator psicométrico (MJ.kg⁻¹).

Dessa maneira, a medida simples do excedente ou déficit de água para o mês em análise foi expressa pela diferença (D_i) entre a precipitação (PRP_i) e a evapotranspiração potencial (ETP_i) para o mês i , podendo ser obtida a partir da Equação (11):

$$D_i = PRP_i - ETP_i \quad (11)$$

Os valores de D_i calculados foram agregados em diferentes escalas de tempo para detecção de padrões temporais da seca (Equação 12). Sendo assim, os valores SPEI são calculados para as escalas mensal, trimestral, semestral e anual, especificados como SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12, respectivamente, podendo representar os diferentes tipos de secas.

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1} - ETP_{n-i}), \quad n \geq k \quad (12)$$

em que: n é a frequência de cálculo e k é a escala de tempo.

O balanço hídrico, expresso por D_i é então normalizado usando a função densidade de probabilidade da distribuição log-logística para calcular a série temporal do SPEI, como segue a Equação (13):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right)^{-2} \quad (13)$$

em que: α , β e γ são parâmetros de escala, forma e origem, respectivamente, para valores de D no intervalo ($\gamma > D < \infty$).

A função de distribuição de probabilidade $F(x)$ da série temporal do índice D_i é então definida como Equação (14):

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (14)$$

O SPEI (Equação 15) pode ser facilmente obtido como os valores padronizados de $F(x)$ segundo (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015) como:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (15)$$

em que: $W = (-2\ln(p))^{0,5}$, para $p \leq 0,5$, sendo p a probabilidade de exceder um valor D determinado, $p = 1-F(x)$. Se $p > 0,5$, p é substituído por $1-p$ e o sinal do SPEI resultante é invertido. As constantes são: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$.

Assim, SPEI torna-se uma variável padronizada, com média 0 e o desvio padrão 1 e pode ser comparado com outros valores de SPEI ao longo do tempo e do espaço. Os autores (Mckee *et al.*, 1993; Tan *et al.*, 2015) classificam a seca em cinco categorias de acordo com os valores do SPEI, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação da seca baseada no SPEI.

Nível	Categoria de Seca	Valores SPEI
0	Sem seca	$0 \leq \text{Índice}$
1	Seca leve	$-1,0 < \text{Índice} < 0$
2	Seca moderada	$-1,5 < \text{Índice} \leq -1,0$
3	Seca severa	$-2,0 < \text{Índice} \leq -1,5$
4	Seca extrema	$\text{Índice} \leq -2,0$

Fonte: Tan *et al.* (2015).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 2 é possível observar a distribuição espacial do escoamento superficial (2A) na área de estudo, verifica-se o valor médio de 23,8mm e máximo de 93,3mm, tais valores podem estar associados a distribuição irregular das chuvas na região, visto que o SURQ se dá após a precipitação. O escoamento pode ser gerado pelo (i) excesso de infiltração, quando a precipitação supera a taxa de infiltração (McDonnell *et al.*, 2013) ou escoamento superficial hortoniano (Horton, 1933) ou (ii) áreas de saturação, que ocorrem quando a capacidade de armazenamento do solo é excedida (Bachmair; Weiler, 2011), ou escoamento Dunniano (Santos, 2009). Sob a hipótese (i), a taxa de infiltração de um solo atua como uma barreira de controle ou dispositivo de divisão, assim onde a capacidade de infiltração de um solo é baixa, o escoamento superficial hortoniano ocorre facilmente (Davie, 2002).

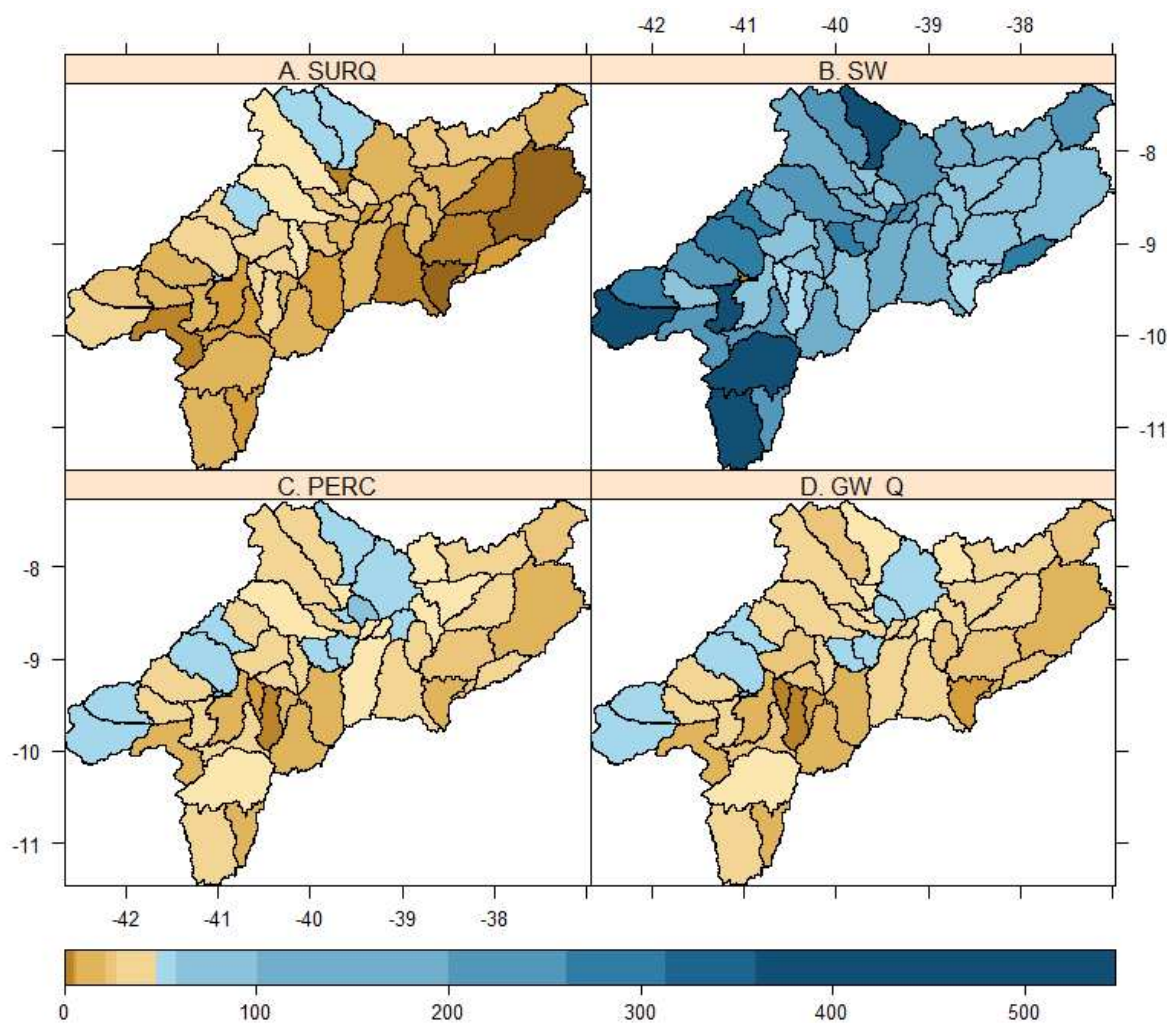


Figura 2. Distribuição espacial média do (A) Escoamento Superficial, (B) Umidade do Solo, (C) Percolação, (D) Recarga do aquífero no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF

A umidade do solo (Figura 2B) apresenta valores a partir de 100 mm, isto se dá por conta do latossolo presente na área, o qual apresenta alta condutividade hidráulica, permitindo o armazenamento de água, mesmo em sub-bacias com baixa pluviosidade. Ao avaliar as características de umidade do solo em Pernambuco, Dos Santos *et al.* (2011) constataram que a umidade do solo sob cobertura natural aumenta até o segundo dia após a precipitação e, a partir daí, começa a decair. De acordo com os resultados o valor máximo foi 547,3mm, o qual deve estar relacionado ao período chuvoso na região. Pan *et al.* (2008) estudaram a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo, no deserto da China, e verificaram que, o conteúdo de água no solo, depende do teor de umidade antecedente. Se o solo estiver previamente mais úmido, ele atingirá maiores médias de umidade, embora para uma mesma lâmina de chuva.

A relação entre a taxa de infiltração, permeabilidade e intensidade da precipitação determina a quantidade de água percolada. As variáveis percolação (Figura 2C) e aquífero profundo (Figura 2D) demonstram comportamentos análogos (valor médio: 47mm e 39mm, respectivamente) pois a percolação é o avanço descendente da água na zona não saturada e cerca de 83% da água que percola se torna água subterrânea cumprindo uma fase do ciclo hidrológico. De acordo com Perez (2017) a tendência de movimento descendente do fluxo de água é originada pelo gradiente potencial hidráulico, provocado pela diferença de umidade entre as camadas superiores e inferiores do solo, após o início da precipitação. A capacidade máxima de infiltração depende da velocidade de percolação, que é o avanço vertical e da percolação da água no perfil do solo (Horton, 1933).

Segundo Carvalho *et al.* (2020) a precipitação e a evapotranspiração são componentes importantes do balanço hídrico climatológico e correspondem ao incremento e as perdas de água, respectivamente, numa superfície cultivada. A distribuição espacial da precipitação (Figura 3A) e evapotranspiração real (Figura 3D) apresentam características semelhantes, com valores mínimos de 216,2mm e 207,7mm respectivamente. A precipitação não é homogênea espacialmente, ela se torna a “entrada” de água na bacia hidrográfica tomando-a como um sistema físico, quanto maior a precipitação, maior será a capacidade do sistema de realizar os processos de difusão turbulenta e molecular. Além disso, acontece a interação do sistema solo - planta - atmosfera, através da qual ocorrem trocas de calor, energia e água, em que a radiação solar é a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração na superfície terrestre. Informações quantitativas da precipitação e evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de bacias hidrográficas e de sistemas de irrigação e drenagem (Veloso *et al.*, 2012; Paca *et al.*, 2019).

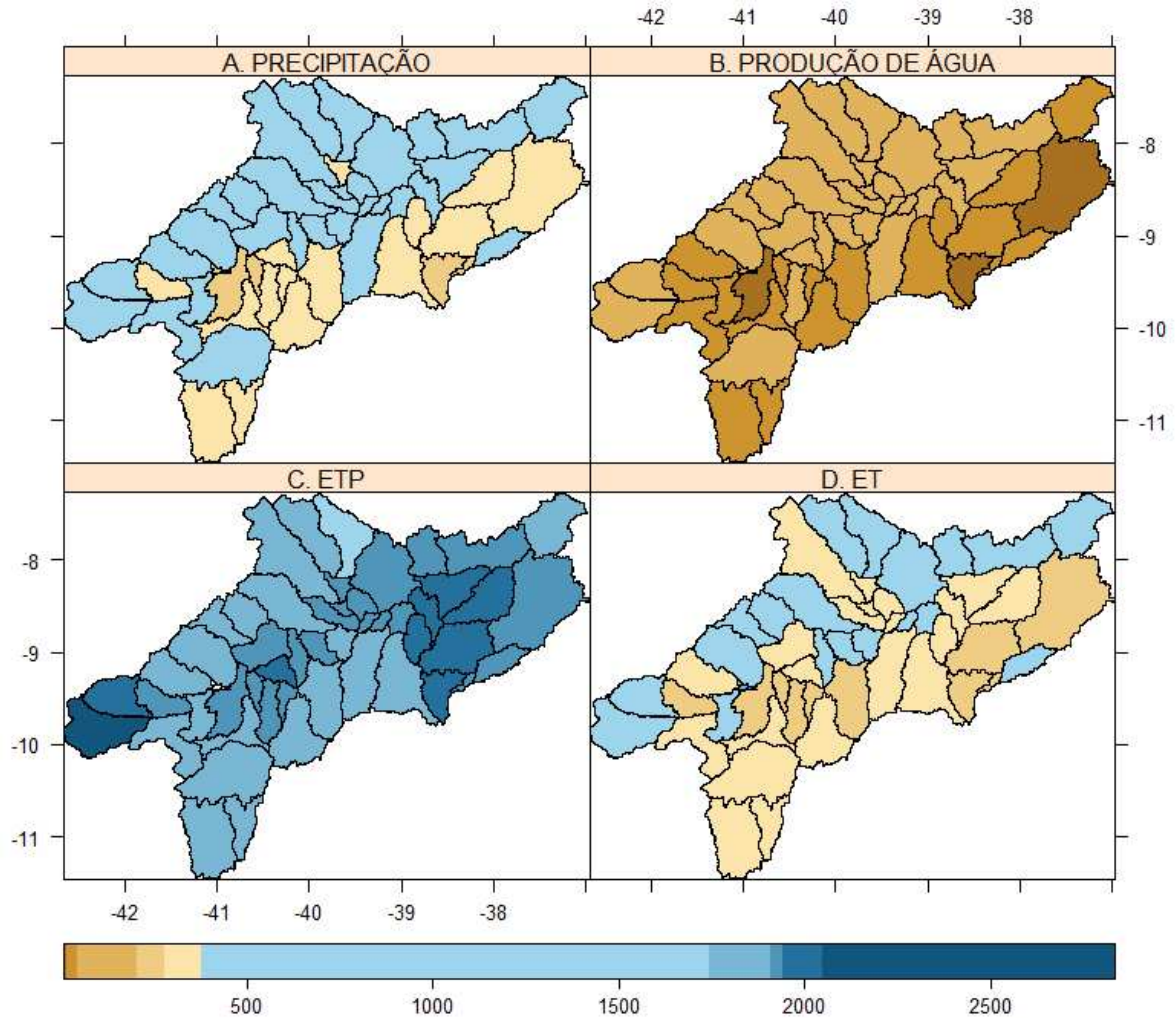


Figura 3. Distribuição espacial média do (A) Precipitação, (B) Produção de água, (C) Evapotranspiração Potencial, (D) Evapotranspiração Real no período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

Conforme Camargo e Camargo (2000) a ETP é processo oposto à precipitação, representa a água que retorna forçosamente para a atmosfera, em estado gasoso, e depende da energia solar disponível na superfície do terreno para vaporizá-la. Essa afirmativa pode ser vista ao comparar a Figura 3C (valor máximo: 2.835mm) com a Figura 3A (valor máximo: 734mm), em que há grande disparidade entre as variáveis. Carvalho *et al.* (2020) também observou essa relação inversa entre a precipitação e a evapotranspiração de referência estimada por Thornthwaite para municípios do Piauí. E ainda, a ETP (Figura 3C) apresenta uma variabilidade menor do que a precipitação. Desta forma, a variação da vazão (cuja magnitude é governada pela relação entre estas duas variáveis) é mais dependente da chuva do que da ETP (Collischonn e Tucci, 2014).

O índice de aridez (IA) da região é estabelecido em função da quantidade de água advinda da precipitação e da perda máxima possível de água por evapotranspiração potencial, este é igual à 0,21 configurando um clima semiárido, em que ocorre longos períodos de estiagem. Desta forma, a produção de água (Figura 3B) é irregular, seu valor máximo é de 197,6mm. Isto ocorre, pois, a irregularidade de chuvas afeta o escoamento e conseqüentemente a produção de água. Colman (1953) argumenta, no entanto, que a produção não deve ser considerada em termos da quantidade total de escoamento, mas deve incluir a taxa de fluxo e suas variações temporais, bem como a qualidade da água (incorporando a carga de sedimentos). Brown *et al.* (2005) constataram que as mudanças na produção de água também podem ser atribuídas a mudanças na vegetação e ao aumento da evapotranspiração

5.1 Análise Fatorial

Para a análise fatorial, inicialmente obtém-se o resultado do coeficiente de correlação de Spearman que mede o grau de dependência entre duas variáveis baseando-se no rank dos valores assumidos por elas, apresentando variações entre -1 e 1 (Figura 4). A maior correlação positiva existente está entre percolação e a recarga do aquífero profundo reafirmando a interdependência entre essas variáveis. A produção de água (WYLD) também está altamente relacionada com a PERC ($r = 0,85$) e GW ($r = 0,84$), e assim é possível inferir que a água que infiltra pode percolar para o aquífero ou gerar um escoamento subsuperficial ao longo dos canais internos do solo, até a superfície ou um curso d'água, que contribuem para produção de água. O termo produção de água, conforme definição da FAO (2003), é fluxo anual dos rios e recarga dos aquíferos, gerados pela precipitação. Tucci e Clarke (1997) descrevem que parcela de precipitação que atinge o solo pode infiltrar ou escoar, a água que percola até o aquífero é armazenada e transportada até os rios, criando condições para manter os rios perenes nos períodos de longa estiagem.

A umidade do solo é importante para o crescimento das plantas, estando altamente relacionada com as características temporais e de intensidade dos eventos pluviométricos (Dos Santos *et al.*, 2011). A correlação entre SW com PRECIP ($r = 0,74$) também foi satisfatória, apontando que a quantidade de água no solo está intimamente ligada à precipitação, visto que quanto mais chuva, maior a umidade do solo. Ramos e Martínez-Casasnovas (2006), ao estudarem o efeito das precipitações na umidade do solo verificaram que as chuvas de alta intensidade aumentaram apenas a umidade da camada superficial do solo, entretanto, sob baixas intensidades de chuva, o incremento de umidade do solo ocorre também em profundidade.

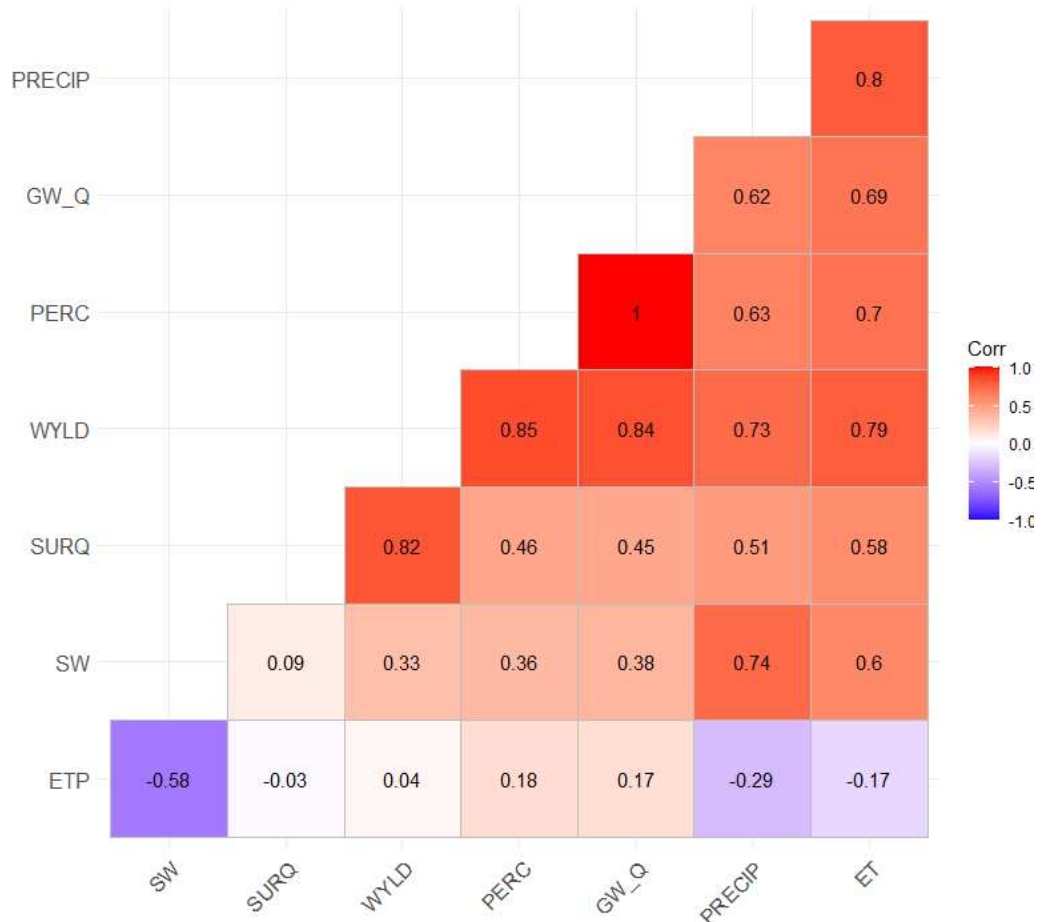


Figura 4. Correlograma entre as variáveis hidrológicas estudadas.

À medida que aumentam as perdas evaporativas, diminui a quantidade de água do solo (Zou *et al.*, 2014; Deng *et al.*, 2016), isso é observado na correlação negativa entre SW e ETP ($r = -0,58$). Por consequência, diminui a recarga das reservas subterrâneas (Oliveira *et al.*, 2016) confirmado na baixa relação entre SW e GW ($r = 0,38$).

Tratando-se da ETP, está não apresentam compatibilidade com as variáveis SURQ ($r = -0,03$) e WYLD ($r = -0,04$). Isso ocorre pois o SURQ se dá principalmente durante eventos de precipitação, enquanto a ETP está condicionada a dias de céu claro. A respeito da produção de água, é a proporção de água da chuva que pode abastecer corpos d'água superficiais ou reservas subterrâneas, ou seja, está associada à dias úmidos. Collischom e Tucci (2014) explicam que o principal fator da relação inversa entre as variáveis é que dias mais chuvosos necessariamente são mais encobertos, fazendo com que uma menor quantidade de radiação solar atinja a superfície, uma vez que esta é o principal governante do processo de evapotranspiração (Shuttleworth, 2012). Dias mais chuvosos teoricamente também apresentam umidade relativa do ar mais alta. Consequentemente, a ETP é menor, uma vez que o aumento da umidade

aumenta também a pressão de vapor, ou seja, a quantidade de vapor no ar está mais próxima da saturação (Collischonn e Tucci, 2014).

As variáveis descritas acima foram submetidas ao teste de Kaiser Meyer Olkin – KMO (Tabela 4). O método verifica se a matriz de correlação inversa é próxima da matriz diagonal. A estatística do teste indicou um valor na ordem de 0,64, destacando a existência de correlações parciais entre pares de variáveis.

Tabela 4. Teste de Kaiser Meyer Olkin – KMO.

PRECIP	0,70
ETP	0,52
ET	0,89
SW	0,50
PERC	0,63
SURQ	0,55
GW	0,62
KMO	0,64

Fonte: Autora (2021).

De acordo com Hair *et al.* (2009) pode-se tomar a decisão de rejeitar a hipótese de a matriz de correlação ser uma matriz identidade, e torna-se possível à aplicação da análise fatorial (AF) ao conjunto de observações. Observa-se que a variável WYLD (Produção de Água) foi removida do conjunto de observações por não apresentar valores consideráveis.

Apurada a adequação da base de dados, e tomados os indicadores que são passíveis da aplicação da AF, foi possível extrair os fatores que irão compor a capacidade de explicação da variância total do conjunto de dados. Esses fatores são combinações lineares em que a estrutura de pesos foi estimada por componentes principais (Johnson *et al.*, 1992). A quantidade de fatores tomados vai resultar na melhor representação do padrão de correlação entre as variáveis observadas (Azevedo *et al.*, 2019). Como resultado obtém-se o Scree plot, gráfico dos autovalores versus o número de fatores, por ordem de extração (Figura 5).

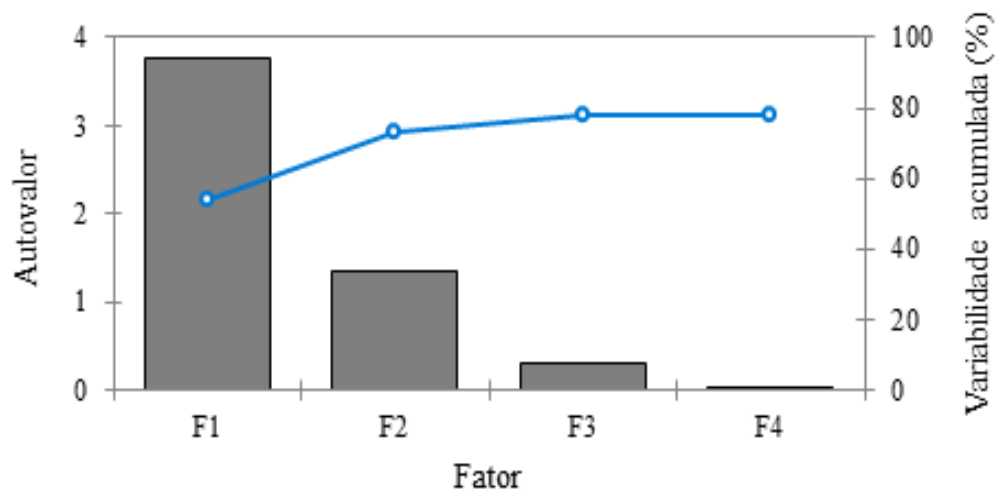


Figura 5. Scree plot: Curva da variância individual de cada fator.

A distribuição do Scree plot descreve graficamente um “ponto de salto”, que represente um decréscimo de importância em relação à variância total, buscando identificar o momento de linearidade da curva (torna-se horizontal ou sofre uma queda abrupta). De acordo com Cattell (1978), tal comportamento indica que muita variância foi perdida e, por isso, deve-se parar de extrair fatores.

O critério de Normalização de Kaiser é o usual ao se determinar o número de fatores que representará o conjunto de variáveis latente de cada grupo, ou seja, os fatores retidos devem ter autovalores maiores que 1. Isso porque se o fator apresenta baixo autovalor, ele está contribuindo pouco para explicar a variância nos parâmetros originais. Foram determinados e extraídos os fatores F1 e F2, os quais apresentaram maiores autovalores e maior percentual de variabilidade acumulada, 54% e 19,3%, respectivamente, totalizando uma capacidade de explicação de 73,3% da variância total existente entre estas variáveis consideradas (Tabela 5).

Tabela 5. Variância total explicada pelos fatores na definição das dimensões.

Fatores	Início			Após a Rotação Varimax	
	Autovalores	Variabilidade (%)	Acumulado (%)	Variabilidade (%)	Acumulado (%)
F1	3,8	54	54	48,4	48,4
F2	1,4	19,3	73,3	24,9	73,3
F3	0,3	4,4	77,6	-	-
F4	0,0	0,5	78,1	-	-

Fonte: Autora (2021).

Os autovalores obtidos na AF foram submetidos à rotação Varimax com o objetivo de detectar quais variáveis representam melhor os fatores e, com isso, facilitar a interpretação dos resultados. Conforme Hair *et al.* (2005) o efeito final de rotacionar a matriz fatorial é redistribuir a variância dos primeiros fatores para os últimos com o objetivo de atingir um padrão fatorial mais simples e mais significativo. Após a rotação, os fatores F1 e F2 passaram à explicar 48,4% e 24,9% da variabilidade, respectivamente. Os autovalores apontam um percentual de variância explicado pelo componente principal, considerando todas as variáveis, mas não informam a variância de cada variável separadamente (Lattin *et al.*, 2011).

Cada fator representa um conjunto de variáveis hidroclimáticas que respondem as características de solo e atmosfera da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco. Os fatores expressam o que existe de comum nas variáveis originais (Reis, 1997). A Figura 6 mostra o quanto os fatores esclarecem em percentuais os elementos em estudo. Isso foi feito analisando os inter-relacionamentos entre as variáveis, de tal modo que essas sejam descritas convenientemente por um grupo de categorias básicas. Conforme Vicini (2005) os fatores, que são gerados, são utilizados de maneira representativa do processo em estudo e utilizados para análises futuras.

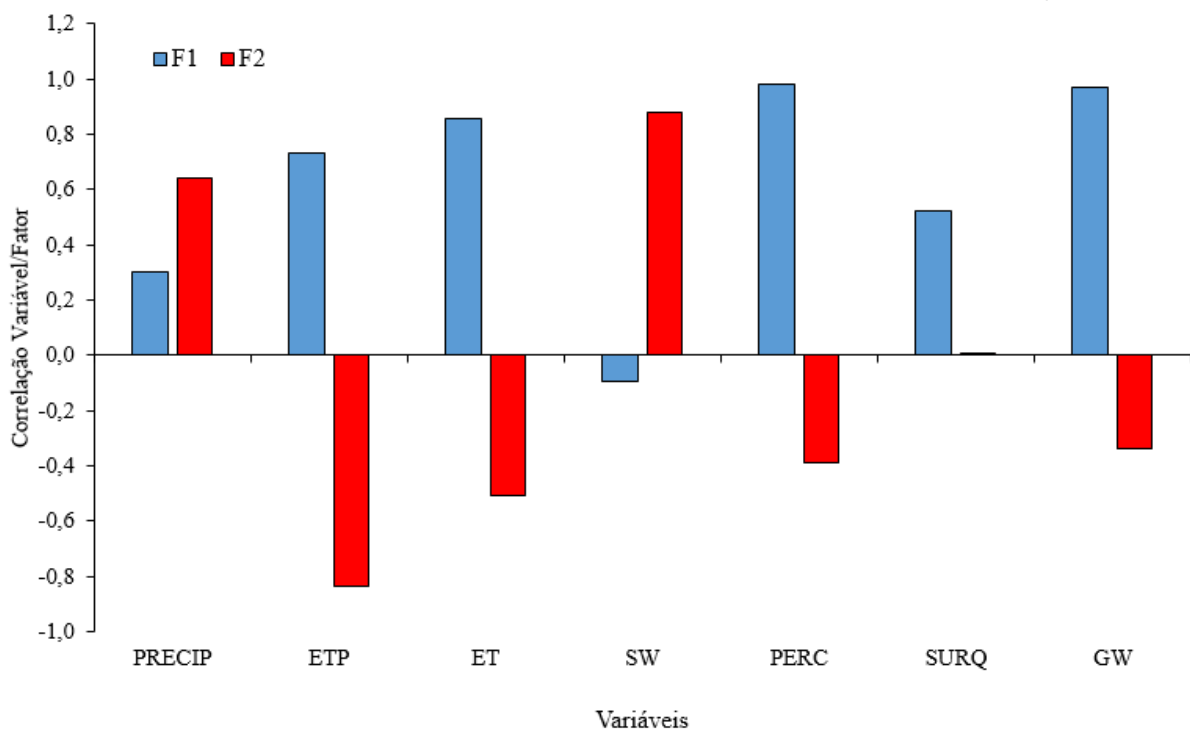


Figura 6. Aderência das variáveis aos fatores e suas variabilidades de explicação.

O Fator 1 (F1) possui maior poder de explicação para as variáveis: ET real (85%), Percolação (98%), Escoamento Superficial (52%) e Recarga do Aquífero Profundo (97%), admitindo assim que este representa as componentes hidroclimáticas de solo, pois constitui elementos do ciclo hidrológico que ocorrem predominantemente na superfície. Entende-se como tais componentes a precipitação que atinge a superfície terrestre, uma parte é interceptada pela cobertura vegetal e pelo solo de onde evapora (ET). A água presente no solo vai escoar superficialmente (SURQ) até atingir corpos d'água próximos, e uma parcela infiltra sub-superficialmente sob a ação da gravidade e percola (PERC) fluindo pelo solo e rochas permeáveis até atingir o nível freático ou o aquífero confinado (GW). Em outras palavras, tem-se o balanço hídrico em microescala considerado através da determinação da disponibilidade da água do solo. O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica quantifica os fluxos de água, ou seja, contabiliza as entradas e saídas de água, na unidade física em questão, num determinado intervalo de tempo (Facco, 2008).

Por outro lado, o Fator 2 (F2) apresenta maior explicabilidade para as variáveis: Precipitação (64%), ET potencial (83%) e Umidade no Solo (97%), assume-se que o F2 constitui componentes hidroclimáticas de atmosfera, neste caso é aplicável o conceito de potencial hídrico, ou seja, o fluxo de água dos pontos de maior para menor potencial (Tucci, Beltrame, 1997). A precipitação está diretamente ligada ao tipo de clima presente na região, enquanto a evapotranspiração potencial corresponde à máxima capacidade de transferência da água do solo para a atmosfera. A transferência da água de ecossistemas naturais, onde o teor de umidade do solo não é limitante, ocorre devido à intensidade do potencial hídrico e as diferenças de padrões meteorológicos prevalentes na região (Reichardt, 1990). Na medida em que diminui a umidade do solo, ocorrem restrições à transferência de água para a atmosfera, assim, a umidade relativa relaciona-se exponencialmente com o potencial hídrico. Essa condição traduz a relação existente entre o solo, as plantas e a atmosfera que podem ser consideradas como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual processos de fluxo estão interligados como elos de uma corrente (Reichardt, 1990).

5.2 Índice de Vulnerabilidade Hídrica

Fatores são “abstrações empíricas” que podemos visualizar como eixos de um sistema de coordenadas onde representamos as variáveis (Matos e Rodrigues, 2019). Neste estudo, as coordenadas (também conhecida como carga fatorial) representam a força de relação entre a sub-bacia à cada fator. Ou seja, variáveis que têm coordenadas altas no mesmo eixo devem estar medindo aspectos de uma mesma dimensão comum subjacente (fator) (Field, 2009).

As cargas fatoriais foram inseridas em uma matriz (*factor matrix*) onde as colunas representam cada fator e as linhas representam as cargas fatoriais de cada uma das sub-bacias nos fatores. Como informado por Hair *et al.* (2005) e Lattin *et al.* (2011) o esquema de dispersão das cargas pode fornecer uma ideia da localização das várias amostras no espaço. A partir da matriz fatorial (correlação da variável com o fator) foi elaborado a Figura 7, mostrando a distribuição das sub-bacias e sua respectiva relação com as componentes hidroclimáticas do Fator 1 (solo) ou do Fator 2 (atmosfera) e a distribuição espacial do IVH.

De acordo com a Figura 7A observa-se que a bacia apresenta valores entre 0,0 à 0,2 que estão associados ao fator solo, o qual predomina na área. Entretanto, na Figura 7B o intervalo é maior, de 0,1 à 0,45 apontando que o fator atmosfera explica certas características da área de estudo que o Fator 1 não é capaz de esclarecer, como é exemplificado por Marengo *et al.* (2016) citando que alta pressão subtropical do Atlântico tem um papel ativo, isso determina a subsidência nos baixos níveis e, condiciona menores acumulados de chuvas na região.

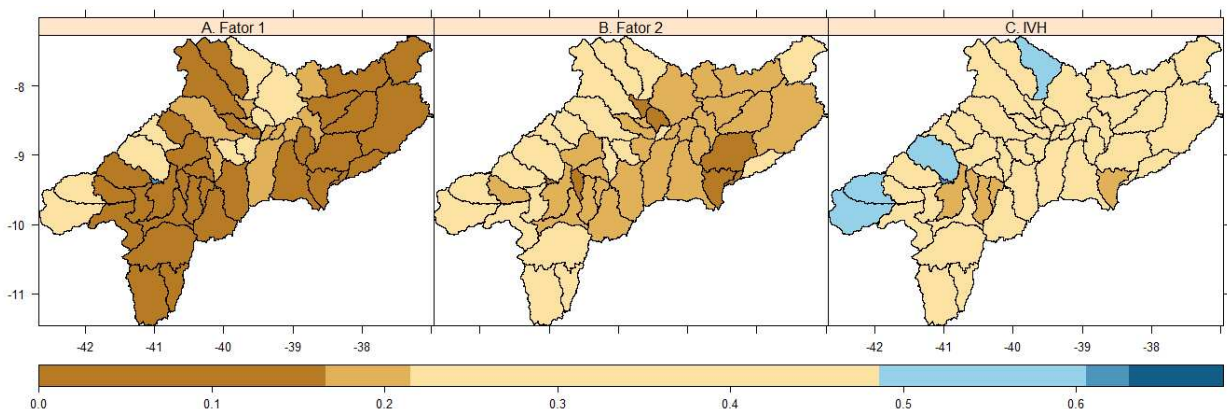


Figura 7. Distribuição espacial do (A) Fator 1, (B) Fator 2 e (C) Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH na BHSRSF.

A Figura 7C demonstra como ocorre a contribuição dos fatores para a formação do IVH, o somatório destes permite identificar, em destaque azul, as áreas que possuem o maior índice, ou seja, aquelas que são menos vulneráveis e ainda resistem aos efeitos das mudanças climáticas.

A próxima etapa consiste em hierarquizar e agrupar os escores fatoriais (valor do fator para cada uma das sub-bacias). Dourado *et al.* (2013) analisaram as condições climáticas no Estado da Bahia e identificaram cinco zonas pluviometricamente homogêneas através da análise de cluster, mostrando-se eficiente para esta aplicação. Utilizando a análise de Cluster,

pode-se então, construir os intervalos de classes que variam de inexistente à extremo, indicado pelo o Índice de Vulnerabilidade Hídrica. A vulnerabilidade de uma dada bacia hidrográfica com relação ao balanço hídrico refere-se a sua fragilidade em ofertar água em quantidade suficiente para atender as suas demandas (ANA, 2012).

Com base na Figura 8 é possível observar a distribuição espacial dos grupos e seus respectivos IVH. O G1 obteve IVH igual à 0,34 e o G2 obteve IVH igual à 0,40, ambos são classificados como baixo. As características das sub-bacias pertencentes à esses grupos são retratadas pelo Fator 2 (atmosfera), em que as variáveis ETP, PRECIP e SW apresentaram valores elevados, destacando as condições atmosféricas existentes na bacia: Com a precipitação ocorre o aumento da umidade de solo e conseqüentemente, maior potencial evaporativo. Informações sobre disponibilidade hídrica servem de apoio à decisão sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica. Conforme Ribeiro (2009) a água constitui o elemento que lida, de forma mais direta, os impactos causados do aumento de demandas, motivado pelo crescimento demográfico e/ou econômico. É preciso implementar uma infraestrutura para a sustentabilidade hídrica da região, visto que a perda de regularidade hidrológica fragilizará ainda mais o equilíbrio entre oferta e demanda. De forma simplificada, pode-se dizer que um espaço territorial é sustentável “se ele for capaz de manter um equilíbrio dinâmico entre a ‘oferta’ e a ‘demanda’ por recursos naturais” (Demanboro e Mariotoni, 2000).

O G4 (IVH = 0,48) e o G3 (IVH = 0,60), foram classificados como índice de vulnerabilidade inexistente. Contudo, estes grupos abrangem um número pequeno de sub-bacias, inferindo que somente uma pequena área da BHSRSF não é vulnerável. Implementar soluções pontuais que postergam medidas estruturais, como a revitalização dos mananciais, medidas eficientes para captação de água da chuva, o reuso e a despoluição de rios são aspectos essenciais para garantir um bom manejo de bacias hidrográficas e proteção dos recursos hídricos. Segundo a CODEVASF (2003) o desenvolvimento sustentável da região, será obtido com ações de diversas naturezas que ofereça água em qualidade e quantidade necessárias e suficientes para o desenvolvimento das demais ações relacionadas com o aproveitamento dos recursos de água e solo, e atividades produtivas decorrentes, como o aproveitamento hidro agrícola e abastecimento de água.

O G6 constitui o índice de vulnerabilidade extremo, formado por seis áreas (21, 34, 37, 40, 41 e 42) e o G5 traduz o IVH alto, composto por onze sub-bacias (13, 22, 27, 28, 30, 39, 45, 46, 47, 51 e 52) cuja, estes, estão predominantemente inseridas no Fator 1 e apresentaram menores valores de precipitação, 325mm e 259mm, nesta ordem.

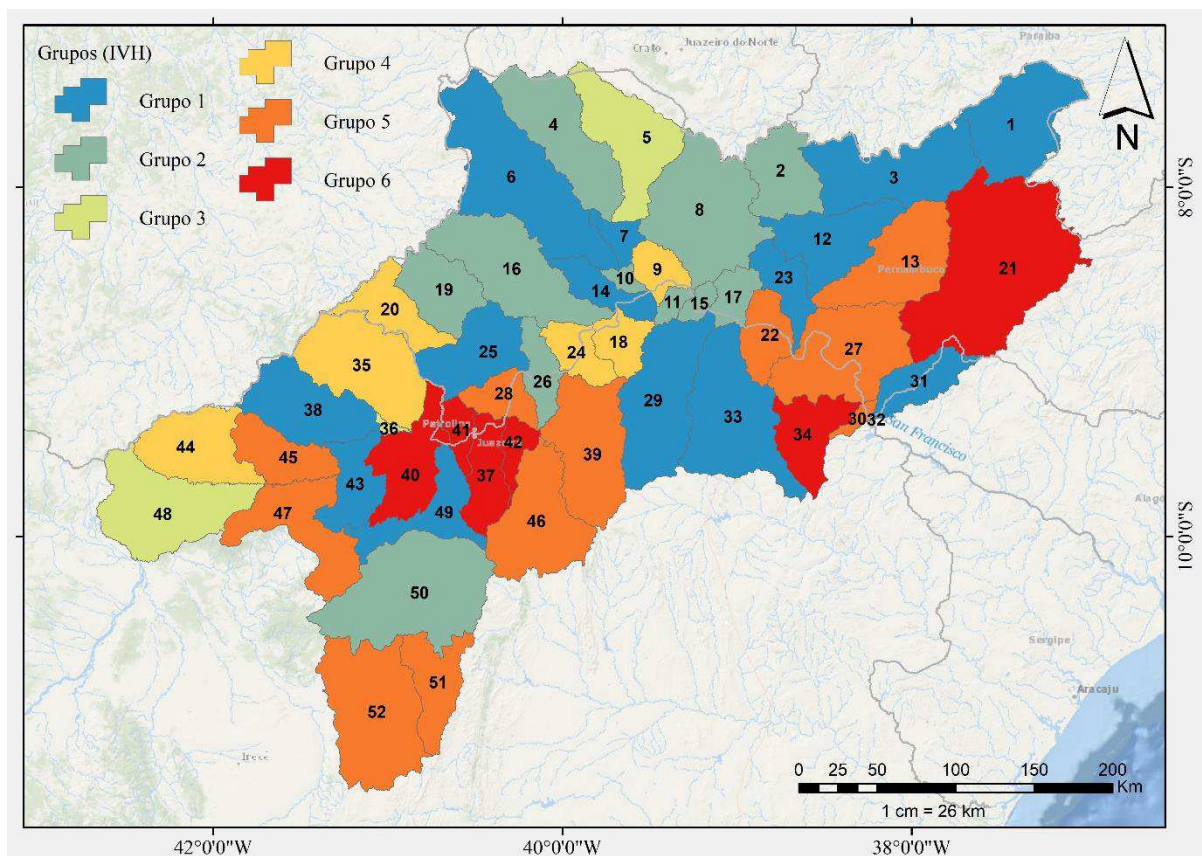


Figura 8. Distribuição espacial de grupos homogêneos do Índice de Vulnerabilidade Hídrica - IVH para a BHSRSF.

Na perspectiva das alterações climáticas, isso indica que com a instabilidade no regime de chuvas deverá ocorrer menor recarga dos aquíferos, impedindo que, na época da estiagem, os reservatórios continuem à manter sua produção para o abastecimento, podendo ainda, apresentar riscos como aumento da temperatura e alterações no regime hídrico. Observa-se também que a grande variabilidade temporal no regime de chuvas, ocasiona em alguns anos secas prolongadas ou precipitação excessiva, as quais causam sérios problemas à agricultura, base econômica da maior parte da região (Lima, 2001). Torna-se imprescindível um sistema de gestão eficiente, eliminando o índice elevado de vulnerabilidade hídrica e evoluindo para um estágio de maior segurança hídrica com controle social.

Além dos já citados, outros problemas que ocasionam esta situação são as alterações no uso e ocupação do solo, somado a má gestão das áreas de recarga hídrica. Santos e Brito (2007) mencionam que, dentre os fatores que tornam o ambiente vulnerável, o desflorestamento e o mau uso dos ecossistemas alteram o clima regional e em áreas de ecossistemas frágeis e vulneráveis, como o semiárido brasileiro, as mudanças climáticas mais drásticas poderão ocorrer através da soma das ações produzidas pelos gases de efeito estufa (GEE) com o mau

uso e desflorestamento dos ecossistemas locais. Essas alterações no clima da região poderão impactar a vegetação, a biodiversidade e as atividades que dependem dos recursos naturais (Marengo, 2008).

A partir da Figura 9 é possível verificar a distribuição temporal dos grupos para cada variável. Na Figura (9A) a precipitação é maior que 100mm no decorrer do verão e outono para todos os grupos, atingindo seu valor máximo de 265mm no G2 e G4. Nas estações de inverno e primavera a precipitação é quase nula, com valores menores que 50mm, Molion e Bernardo (2002) mencionam que o motivo dos totais anuais de precipitação serem reduzidos nessa região de latitudes tropicais são os movimentos subsidentes de uma célula de Walker, que tem ramo ascendente na Amazônia, e da circulação de Hadley. Para todas as estações constata-se que há maior frequência de valores abaixo de 100mm, ou seja, ocorre mais chuvas com pouca intensidade.

Na região do NEB, os valores de P e ETP apresentam uma enorme variabilidade de ano para ano, denominada de variabilidade climática, o que torna necessária a modificação do sistema natural através da construção de grandes obras hídricas, entre estes reservatórios, canais e adutoras, o que permitem o transporte da água no tempo (ANA, 2012).

A chuva e a ETP são elementos meteorológicos de sentidos opostos, expressos em milímetros pluviométricos (Camargo e Camargo, 2000). Seus parâmetros, quando mensurados em processo contábil, conhecido como balanço hídrico climático, fornecem dados acerca de deficiências e de excedentes hídricos, essenciais em pesquisas. (Thornthwaite, 1948). A ETP exposta na Figura (9B) apresenta-se de forma homogênea ao longo do ano, todavia, ela ultrapassa 200mm somente para o G3 em três estações do ano, além disso, o G3 possui maior disponibilidade de água no solo, o qual apresentou risco hídrico inexistente de acordo com a classificação dos valores do IVH. Portanto, quando a umidade no solo é suficiente, a evapotranspiração potencial depende apenas do suprimento de energia solar, assim, a ETP é mais elevada no verão, quando os dias são mais longos e maior a radiação solar (Camargo e Camargo, 2000).

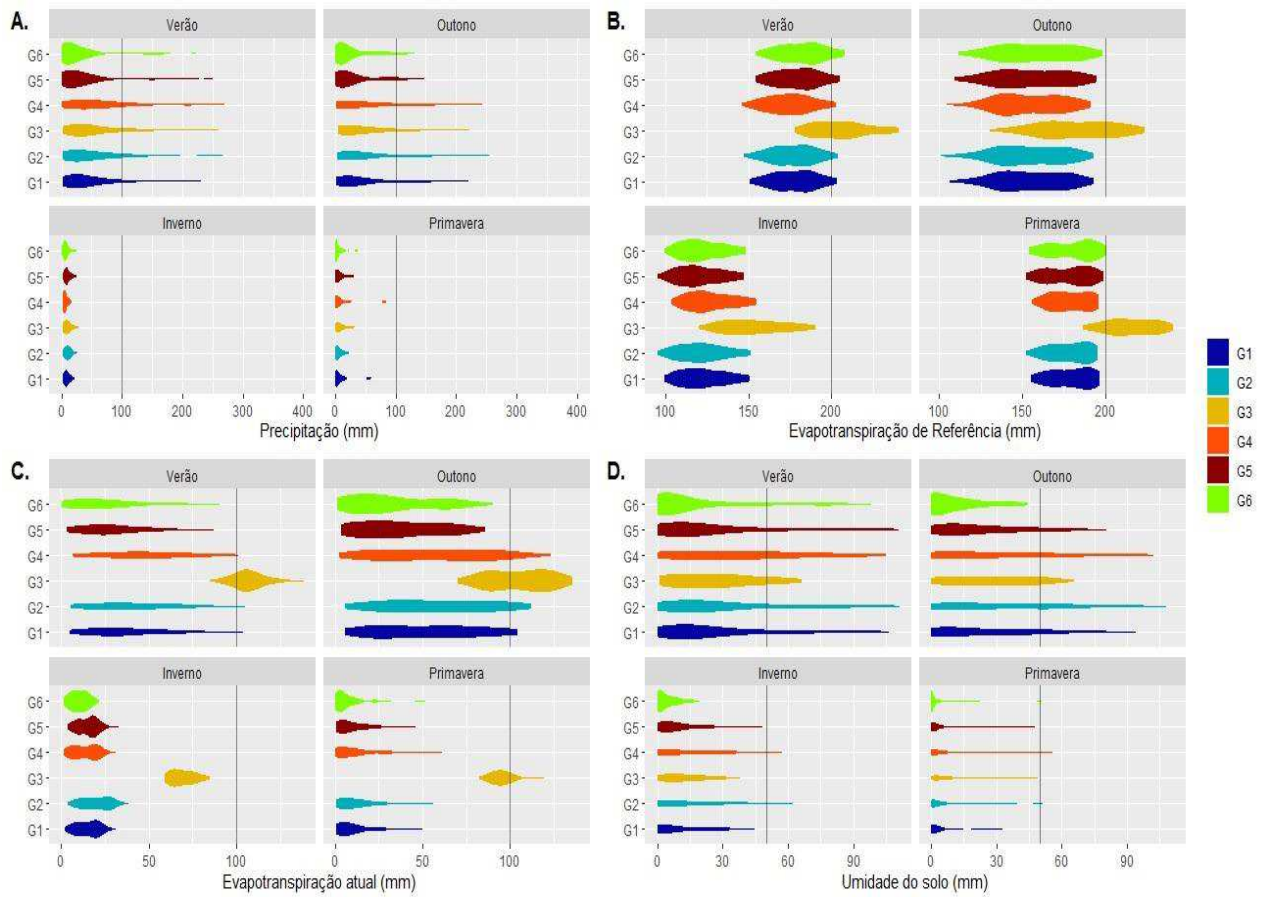


Figura 9. Distribuição temporal das variáveis (A) Precipitação, (B) Evapotranspiração Potencial, (C) Evapotranspiração Real e (D) Umidade do solo por grupo durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para a BHSRSF.

Na Figura (9C) a ET se destaca, também, para o G3, pois é o que apresenta maior quantidade de água disponível para evapotranspiração, atingindo seu valor máximo no outono e verão, cerca de 170mm. Todavia a ET é menor que a ETP pois constitui a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal. Camargo e Camargo (2000) explicam que se faltar água no solo a evapotranspiração ficará reduzida, deixando de ser potencial; ocorrerá, então, a evapotranspiração real, menor que a potencial. Na Figura (9D) a umidade apresenta seu pico no G2 e G5 durante o verão e no G2 e G4 durante o outono. Para tais estações foram verificadas as maiores frequências e maiores valores para todos os grupos, enquanto no inverno e primavera os registros de umidade do solo ficaram abaixo de 60mm, visto que é a época de menor precipitação na área de estudo. O que corrobora com Moura *et al.* (2007) que destaca uma predominância do período chuvoso no verão, entre os meses de dezembro e abril, e com período de inverno seco em quase toda área semiárida.

Através da Figura 10 é possível verificar as relações estatísticas (correlação de Pearson (R) e p-valor) entre as variáveis hidrológicas: (Fig. 10A) precipitação e percolação; (Fig. 10B) precipitação e evapotranspiração real; (Fig. 10C) precipitação e umidade do solo; (Fig. 10D) precipitação e produção de água. A partir dos resultados entre a percolação e precipitação observa-se o maior coeficiente de correlação para o G4 ($R=0,97$). Para os grupos G2, G3 e G5 os resultados de R também foram relevantes, de acordo com Villela e Mattos (1975) a precipitação que ocorre sobre a terra é dispersa de várias formas, parte penetra profundamente no solo (percolação), indo suprir o lençol d'água subterrâneo. Em G1 e G6, os valores de R foram os menores obtidos, 0,64 e 0,42, respectivamente. Quando a quantidade de água da chuva infiltrada no solo se torna maior que a capacidade de absorção deste, podem ocorrer perdas de água por percolação, ou seja, a percolação ocorre em solos saturados, resultado das precipitações ocorridas no dia anterior. Coelho Neto (1994) justifica essa relação ao observar que a percolação é o fluxo subsuperficial que atravessa a zona de aeração em direção ao lençol freático, o qual delimita a porção extrema superior da zona saturada do solo.

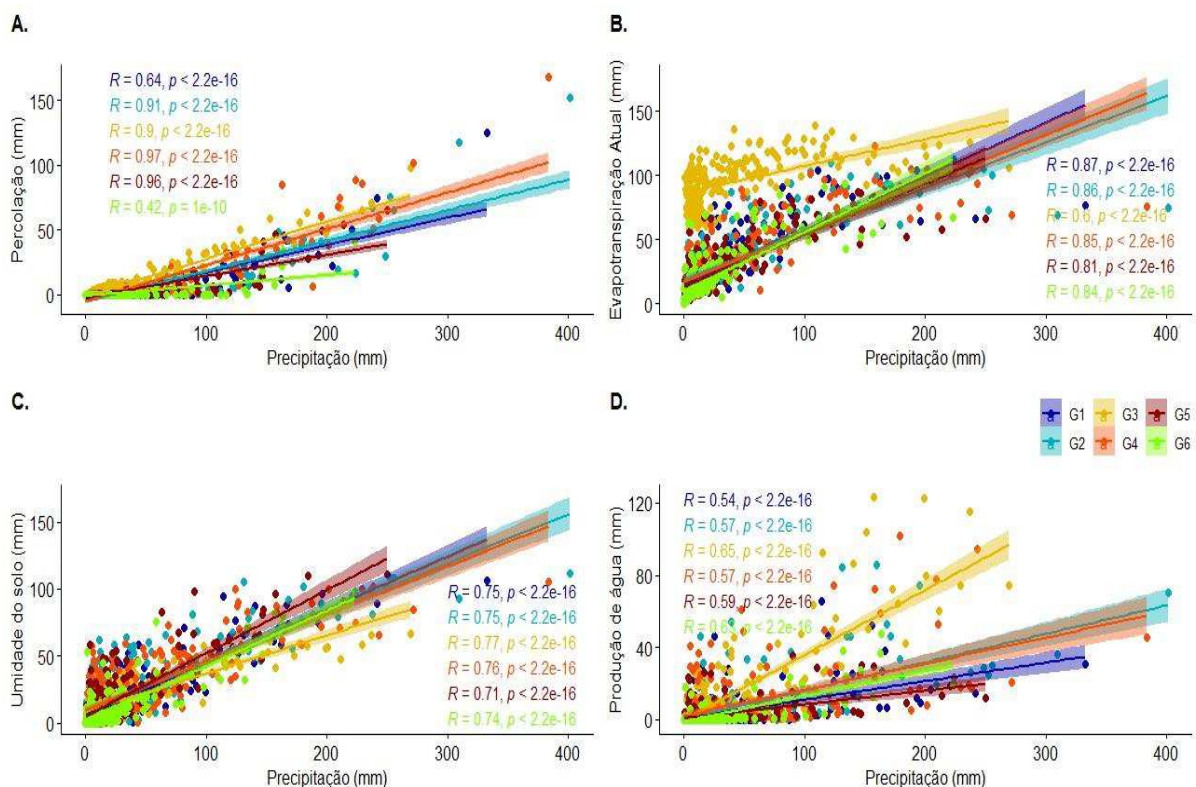


Figura 10. Relação estatística entre as variáveis hidrológicas: (A) Precipitação e Percolação, (B) Precipitação e Evapotranspiração real, (C) Precipitação e Umidade do Solo, (D) Precipitação e Produção de água.

Os grupos G1 e G6 foram os que apresentaram menor umidade no solo, sendo o G6 com IVH extremo, conseqüentemente a percolação é baixa nessas áreas. Tratando-se do p-valor, este denotou valor menor que 0,05 para todos os clusters, considerado uma evidência muito forte de que há relação entre as variáveis.

ET é o processo no qual a água é transportada para a atmosfera na forma de vapor, este processo de evaporação e/ou transpiração, juntamente com a precipitação é um dos mais importantes componentes do ciclo hidrológico (Villela e Mattos, 1975). Essa relação é evidenciada na Figura 10B, no qual a correlação existente entre ET e PRECIP encontra-se maior que 80% para todos os grupos, exceto no G3 ($R=0,6$). Essa desigualdade é justificável ao analisar as particularidades deste grupo: que é explicado pelo Fator 1, o qual está associado as características predominantes de solo; sendo composto por apenas 3 sub-bacias, as quais possuem baixa umidade do solo, não existindo assim, disponibilidade hídrica para evapotranspiração.

A correlação apresentada na Figura 10C foi em média 75% e o p-valor apresentou-se extremamente significativo, isto evidencia a dependência da umidade do solo em relação à precipitação. A umidade do solo possui uma grande variabilidade espaço-temporal decorrentes de alguns fatores como: a textura do solo, tempo, vegetação e topografia. Após os eventos chuvosos, parte da água chega até a superfície do terreno, atravessando a vegetação direta ou indiretamente penetrando do solo (Molinari e Vieira, 2004). Esta umidade está altamente relacionada com as características temporais e a intensidade de precipitação (Dos Santos *et al.*, 2011). Outro caso que reconhece essa afinidade é que ambas as variáveis compõem o Fator 2.

A correlação entre produção de água e precipitação é exposta na Figura 10D, todos os grupos obtiveram coeficiente de correlação de Pearson menor que 0,65, indicando que a produção de água não depende, somente, da precipitação. Outros fatores influenciam os resultados dos processos hidrológicos (topografia, solo, geologia, vegetação, uso do solo e a rede de drenagem natural). O processo de impermeabilização altera o balanço hídrico, pois reduz drasticamente a infiltração e a interceptação. Com isso, há uma diminuição do nível do lençol freático por falta de recarga, reduzindo o escoamento subterrâneo e conseqüentemente o fluxo de base dos rios, diminuindo as vazões no período de seca (Tucci, 2008).

5.3 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração

O SPEI foi calculado para o G3 e G6, os quais apresentaram maior e menor IVH, respectivamente. Este índice indica a deficiência hídrica do ambiente baseado em um balanço hídrico climático em diferentes escalas de tempo. Segundo Vicente-Serrano *et al.*, (2010)

escalas de tempo curtas estão relacionadas principalmente ao conteúdo de água no solo e vazão do rio em áreas de cabeceira, escalas de tempo médias estão relacionadas ao armazenamento de reservatórios e descargas no curso médio dos rios e escalas de tempo longas estão relacionadas a variações no armazenamento de água subterrânea.

Na Figura 11 está retratado o resultado deste índice em diferentes escalas de tempo para o G3. No SPEI-3 (diferença de 3 meses) observa-se uma ampla variação dos valores padronizados. Os resultados positivos demonstram o período de chuvas no semiárido que é marcado pela acentuada irregularidade espaço-temporal e a maior parte da precipitação, geralmente, ocorre em três meses. Os resultados negativos se caracterizam pelo balanço hídrico negativo, resultante das baixas precipitações médias anuais e longos períodos de estiagem, essas características resultam na ocorrência frequente de dias sem chuvas, ou seja, veranicos, e, conseqüentemente, em eventos de seca. Em resumo, seriam 6 meses úmidos e 6 meses secos.

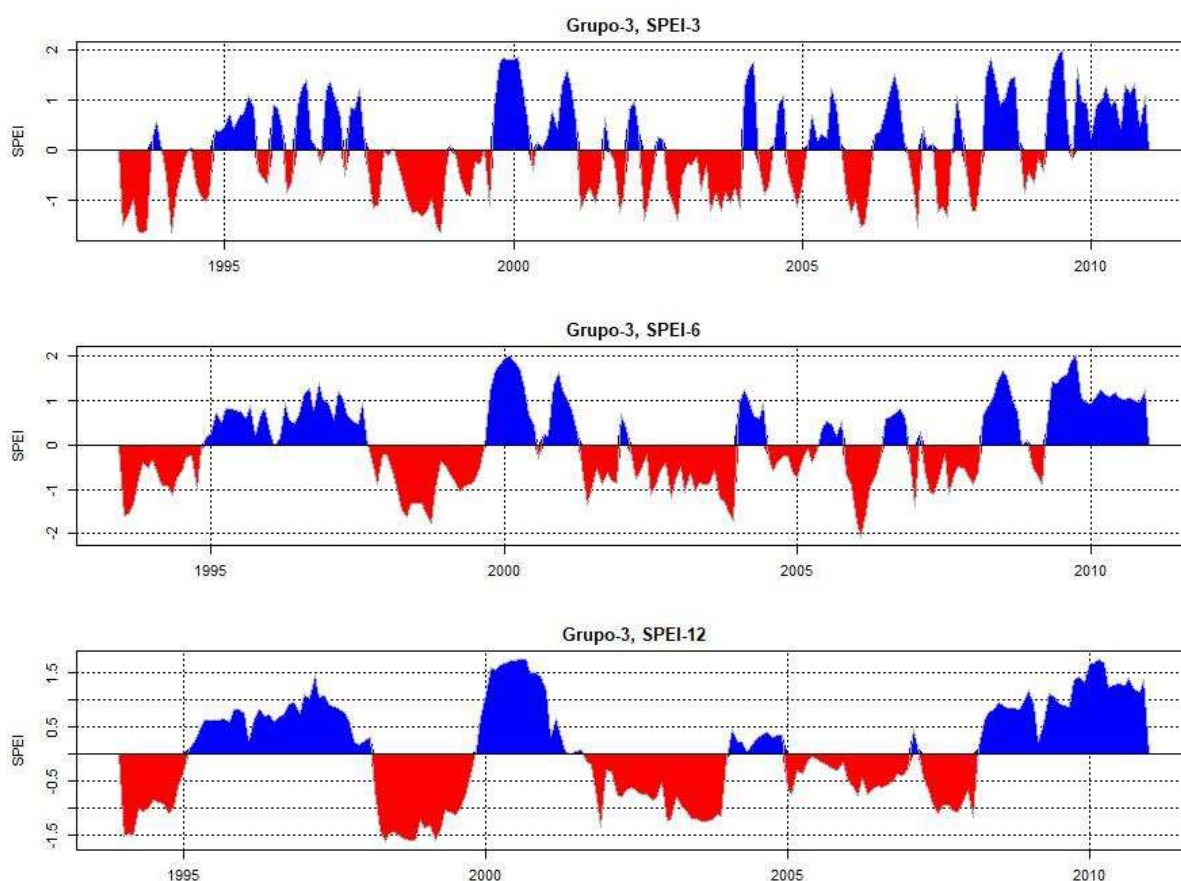


Figura 11. Distribuição temporal do SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12 para o grupo 3, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

Lima *et al.* (2019) utilizando o método de K-means, buscou compreender o comportamento e distribuição da seca em todo o Estado do Rio Grande do Norte para o período 1950 a 2018. O agrupamento pelo método de K-means juntamente ao índice SPEI-3 apresentou potencial para caracterização de regiões homogêneas e determinação dos tipos de seca que ocorrem em todo o Estado, devido à sua simplicidade e característica multiescalar para quantificar períodos úmidos e secos (Lima *et al.*, 2019).

No SPEI-6 a variação é menor, ainda assim é perceptível grande variabilidade nos totais anuais de chuva nas áreas de ocorrência da Caatinga. Ao agrupar para seis meses não se verifica o evento de chuva ocorrido em 1994 devido à sua baixa intensidade, nota-se então uma seca moderada a partir de 1993, conforme a classificação adotada, esta se repete em 1998 e 2003 e em 2006 observa-se uma seca extrema (-2,0). Enquanto os valores positivos são menos frequentes, o SPEI-6 para o período úmido flutua entre 1 na maior parte da série histórica, com exceção dos anos de 2000 e 2009, que atingem o valor máximo (2,0) classificados como sem seca. A distribuição temporal das chuvas pode modificar consideravelmente o regime hídrico da região, pois a quantidade de água precipitada não assegura a recarga dos reservatórios. Assim, para caracterizar a qualidade da estação chuvosa, de forma a contemplar uma maior diversidade de condições hidrometeorológicas, há que se considerar não somente os totais sazonais de chuvas, mas também e, principalmente, sua variabilidade temporal em escala intrasazonal (Nobre; Melo, 2001).

Para o SPEI-12, avaliando um período de acumulação de 12 meses, verifica-se uma composição quase igualitária, dividida em 4 eventos negativos e 4 positivos, prevalecendo o período seco. Analisando as subdivisões a cada 5 anos identifica-se uma época de estiagem de duração de 2 anos, em média, logo há influência significativa da sazonalidade nos índices de secas para períodos de acumulação. Cruz *et al.* (1999) confirma que a vulnerabilidade a que está exposta esta região é decorrência da instabilidade climática, dramatizada pelos períodos de seca que ocorrem, em média, a cada cinco anos. O período de chuvas aparece com menor regularidade, atingindo maiores durações entre 1995-1998 e 2008-2010 e maior intensidade em 2001 e 2010. Este cenário pode conduzir à uma seca socioeconômica que ocorre quando o déficit de água induz a falta de bens ou serviços devido ao volume inadequado, à má distribuição das chuvas, ao aumento no consumo, ou ainda ao mau gerenciamento dos recursos hídricos causando impactos ecológicos ou à saúde. De acordo com os dados da FAO (2017) até 2050 quedas na produção agrícola coadunadas às mudanças climáticas poderão elevar em 20% o risco de fome no mundo.

O SPEI para o G6, o qual apresentou IVH extremo, é apresentado na Figura 12. Quanto menor o intervalo de tempo, verifica-se a maior ocorrência de eventos pontuais, logo, quando se aumenta o período, diminui a resposta de frequência. Deste modo, ao aumentar o tempo, observa-se os eventos em escala macro, omitindo os acontecimentos pontuais ocorridos em períodos menores. São frequentes os valores que traduzem secas severas e extremas em todas as análises temporais, a partir deste diagnóstico pode-se concluir que há uma seca meteorológica de 3 à 6 e identifica-se os efeitos de seca hidrológica de 6 à 12. Esse primeiro tipo de seca pode se desenvolver rapidamente e "acabar abruptamente" enquanto a hidrológica necessita de um período prolongado de déficit de precipitação pluvial, entretanto persistirá por mais tempo que a meteorológica (Heim Jr., 2002; Jesus *et al.*, 2020).

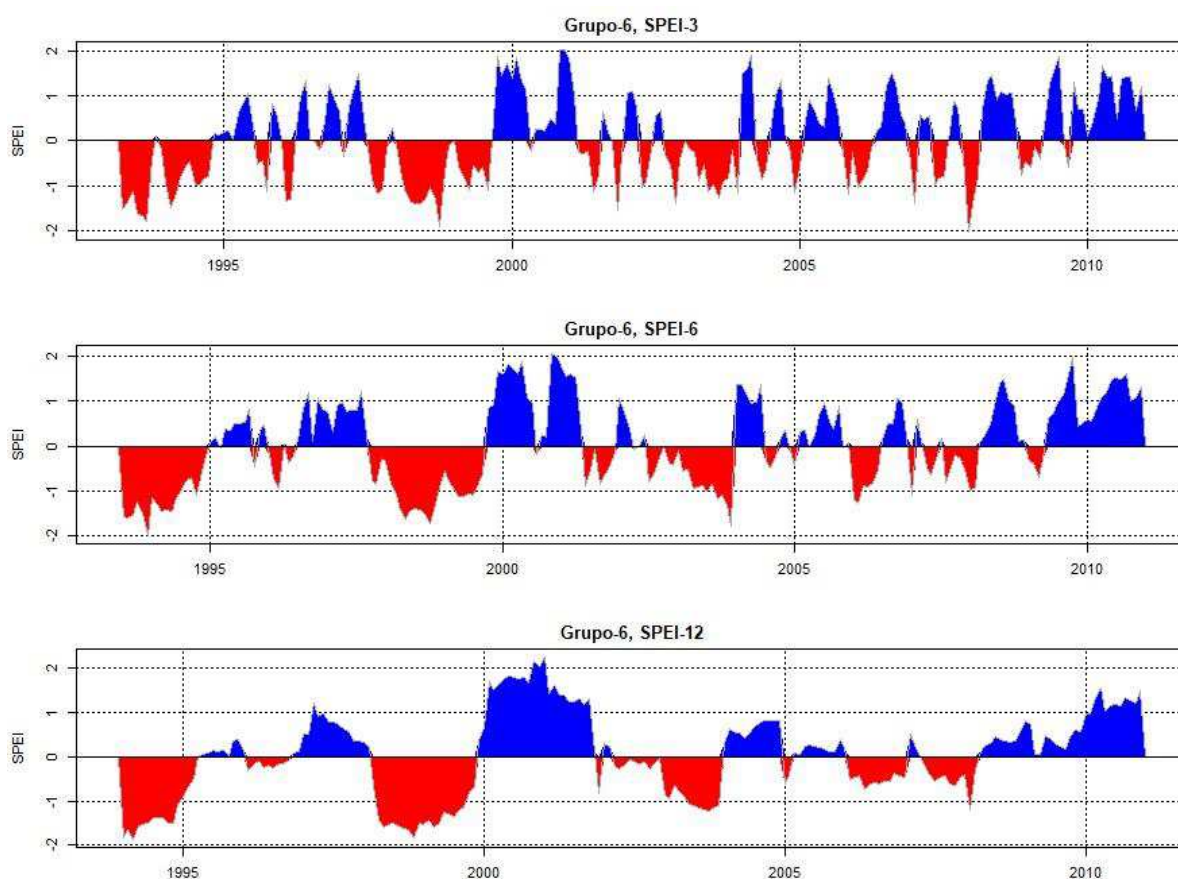


Figura 12. Distribuição temporal do SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12 para o grupo 6, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

Moura *et al.* (2007) destacam que a variabilidade interanual da pluviometria, associada aos acumulados anuais sobre o NEB, é um dos principais fatores para a ocorrência dos eventos de “secas”, caracterizadas por acentuada redução do total pluviométrico sazonal durante o

período chuvoso. Essas ausências de precipitação acoplada à elevada disponibilidade de radiação solar conduzem à um aumento da evapotranspiração potencial, constituindo as secas meteorológicas. De acordo com Tijdenan *et al.* (2018) as secas meteorológicas nem sempre coincidem com as secas hidrológicas, uma vez que a propagação da precipitação para a vazão pode ser afetada por diversos fatores como, condições climáticas, características das bacias hidrográficas e influências antrópicas.

Os efeitos de uma seca hidrológica já são perceptíveis a partir do segundo mês de uma seca meteorológica. Ao examinar o SPEI para o G6 percebe-se longos períodos de estiagem, neste caso, tem-se as secas hidrológicas que estão associadas à falta de água no sistema hidrológico, manifestando-se através das baixas vazões nos rios, baixo nível de lagos, reservatório e águas subterrâneas (Tallaksen; Van Lanen, 2004). Os eventos de secas hidrológicas são mais severos e duradouros, no entanto a quantidade de eventos é menor. Foi dentro desse contexto que, no Projeto Áridas se procurou incorporar a ideia de desenvolvimento sustentável do NEB, tanto nos campos econômico, social e ambiental quanto na visão política de longo prazo e de planejamento participativo (Magalhães, 1994).

Foi selecionado o valor máximo anual do SPEI-12 para cada grupo, buscando indicar o melhor cenário existente. O IVH foi padronizado para corresponder ao valor do SPEI, a fim de realizar o diagnóstico de disponibilidade hídrica para cada grupo. A correspondência entre o índice de vulnerabilidade hídrica padronizado e o índice padronizado de precipitação e evapotranspiração é demonstrado conforme a Figura 13.

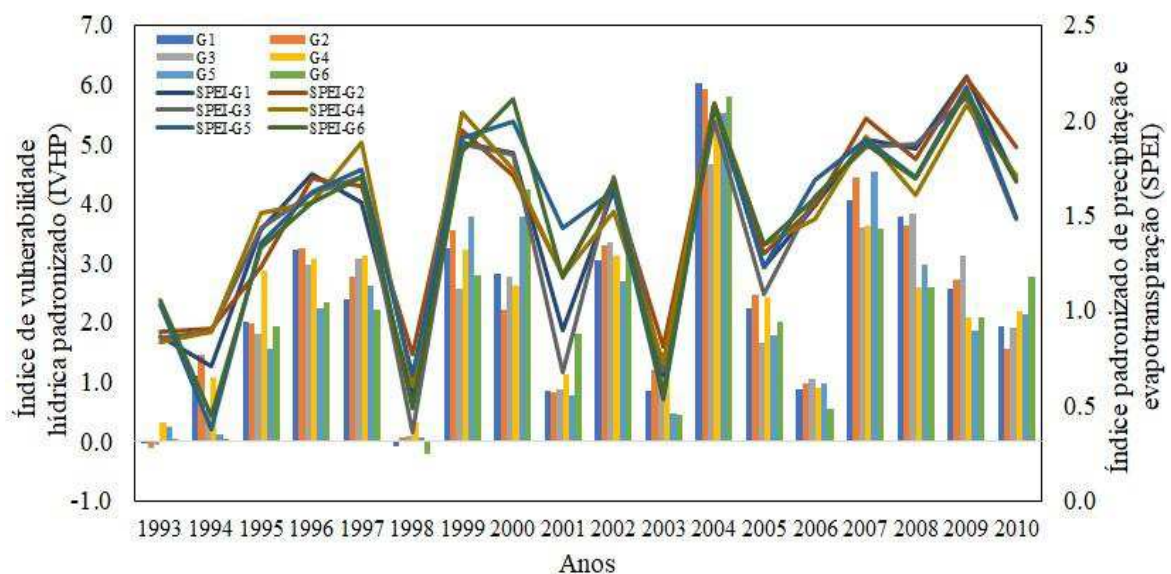


Figura 13. Distribuição temporal dos valores máximos anuais do IVHP e SPEI, durante o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010 para BHSRSF.

Como identificado anteriormente, o G6 é o que possui menor oferta hídrica, atingindo valores negativos em 1998. E o G3 apresenta a maior disponibilidade de água, que se apresenta alta em todos os anos. Além destes, o G1 também apresentou IVHP considerável no ano de 2004.

Em determinados anos a linha do SPEI subestima o IVHP, apontando que a área está com deficiência hídrica maior do que a expressa pelo IVHP. Todavia, no início da série e em anos como 1998, 2002, 2003 e 2004 ocorre a equivalência quase que perfeita dos padrões definidos, isto comprova a compatibilidade dos resultados apresentados para ambos os índices, explanando de forma segura a insuficiência de água na BHSRSF devido às mudanças climáticas que acarretam danos para a sociedade. De fato, o clima está envolvido em muitos dos choques que condenam as pessoas à pobreza ou as mantêm nessa situação (CGEE, 2016).

De acordo com a Figura 14 observa-se a relação de dispersão em que a variável resposta é o IVH padronizado correspondente ao SPEI. O intervalo observado foi de 0,6 à 0,73 de coeficiente de determinação, denotando relação de moderada à forte, existindo assim analogia, à medida que o IVHP aumenta, o SPEI aumenta positivamente e o inverso também é verossímil. Entende-se que a seca e a semiaridez são componentes permanentes no cenário do NEB e as atividades humanas precisam se adaptar às condições do semiárido, uma vez que o problema da degradação de terras e da desertificação representa grande ameaça para as condições de vida (CGEE, 2016).

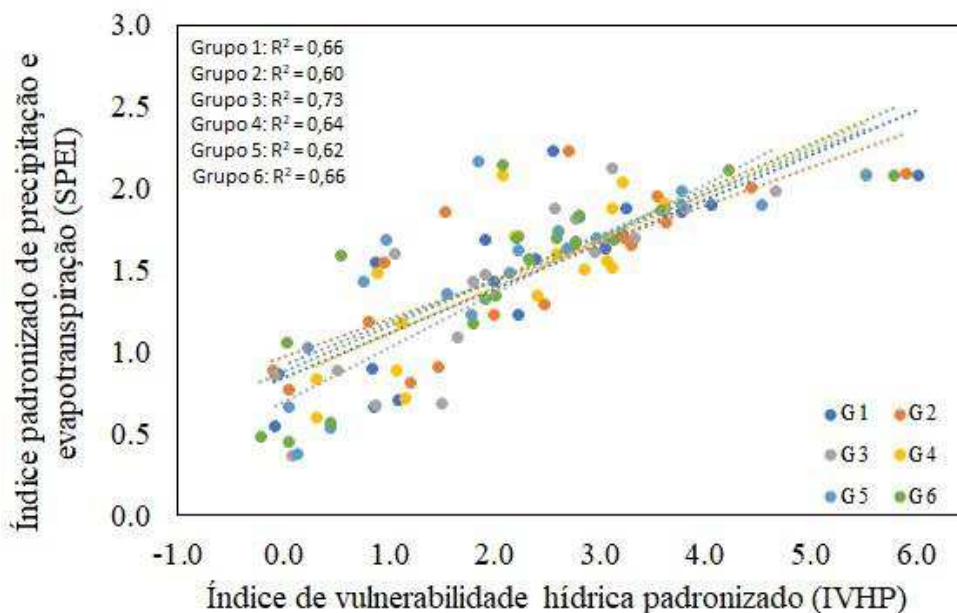


Figura 14. Relação estatística entre SPEI e IVHP para os grupos homogêneos.

Esses índices foram utilizados para quantificar, padronizar e comparar a disponibilidade hídrica e a seca em base temporal e regional. As secas contribuem para o agravamento da desertificação no Semiárido. As áreas suscetíveis ao fenômeno da desertificação são mais vulneráveis aos efeitos das secas e, por isso, há uma estreita inter-relação entre os dois fenômenos. A ideia central é de que as secas constituem anormalidades e, como tal, deverão ser combatidas, principalmente com maior oferta de água (Campos, 1995). Os potenciais impactos negativos sobre os recursos hídricos e suas consequências poderão comprometer a população da região (Angelotti *et al.*, 2011).

6. CONCLUSÃO

A análise das variáveis permitiu verificar de forma espaço-temporal as componentes hidroclimáticas da BHSRSF para o período de janeiro de 1993 à dezembro de 2010, que demonstrou a variabilidade do regime pluviométrico e associada a elevada disponibilidade de radiação solar contribui para o aumento da evapotranspiração, tanto em superfícies livres de água (açudes, represas, etc.) como no solo, representando uma perda significativa na disponibilidade hídrica da região.

Com base no índice de vulnerabilidade hídrica (IVH) observou-se que a Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco, de modo geral, apresenta vulnerabilidade hídrica, sujeita ao aumento das restrições de água doce e riscos relacionados com o aquecimento, seca, variabilidade da precipitação e eventos climáticos extremos.

Através do diagnóstico realizado com o SPEI identificou predominância de eventos secos plurianuais, e conseqüentemente, aumento na frequência de veranicos, indicando um déficit hídrico na BHSRSF, com isso, a disponibilidade hídrica tende a diminuir progressivamente e entende-se que a área é susceptível à desertificação. Esta condição, além de afetar o bem-estar das pessoas do NEB, provoca problemas na produção agrícola de subsistência, colocando o homem em risco de insegurança alimentar.

Associando o SPEI com IVHP, observou-se a correspondência entre os índices, o que denota a incontestável carência das sub-bacias em relação ao acesso aos recursos hídricos, comprometendo os produtores, os quais são mais vulneráveis às transformações econômicas e ambientais. Em ambientes vulneráveis, as ações de adaptação têm a possibilidade de influenciar o risco por meio da redução da vulnerabilidade e/ou exposição dos sistemas. Medidas estruturais, que busquem atenuar ou corrigir situações de vulnerabilidade nos sistemas naturais e humanos são essenciais para adaptação e resiliência da população.

É importante ressaltar que a resposta aos desafios climáticos exige intensificação intergovernamental, dos entes federados nas três esferas, do setor privado e da sociedade brasileira. Promover políticas nacionais voltadas às populações vulneráveis através da educação ambiental é indispensável para que a sociedade, por meio do conhecimento contextualizado sobre a realidade, possa definir as melhores formas de agir e intervir no meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

ADAPTACLIMA - Plataforma de Conhecimento em Adaptação à Mudança do Clima. Agricultura no Contexto da Mudança do Clima. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/agricultura-no-contexto-da-mudanca-de-clima>
Acessado em: 04 de outubro de 2020.

ADGER, W. N.; BROOKS, N.; BENTHAM, G.; AGNEW, M.; ERIKSEN, S. Novos indicadores de vulnerabilidade e capacidade adaptativa. Tyndall Center for Climate Change Research: Norwich, Reino Unido, 2004.

ADGER, W. N. Vulnerabilidade. *Glob. Env. Mudança*, 16 (3), p. 268–281, 2006.

ADGER, W. N.; AGRAWALA, S.; MIRZA, MMQ; CONDE, C.; O'BRIEN, K.; PULHIN, J.; PULWARTY, R.; SMIT, B.; TAKAHASHI, K. Avaliação de práticas de adaptação, opções, restrições e capacidade. Em *Mudança Climática 2007: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade* Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido, 2007.

ALBUQUERQUE, M. A. de. Análise de agrupamento hierárquica e incremental: estudo de caso em ciências florestais. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Estatística e Informática, Recife, 2013.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALESSA, L.; KLISKEY, A.; LAMMERS, R.; et al. The Arctic Water Resource Vulnerability Index: An Integrated Assessment Tool for Community Resilience and Vulnerability with Respect to Freshwater. *Environmental Management* 42, 523, 2008.
<https://doi.org/10.1007/s00267-008-9152-0>

AL-KALBANI, M.S.; PRICE, M.F.; ABAHUSSAIN, A.; AHMED, A. M.; O'HIGGINS, T. Vulnerability assessment of environmental and climate change impacts on water resources in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman. *Water*. 6 (10), p. 3118-3135, 2014.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. Rev. FAE, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, jan./jun. 2017.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013): síntese executiva com apreciação das deliberações do CBHSF aprovadas na III Plenária de 28 a 31 de julho de 2004. Brasília/DF: ANA, 2005.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A Questão da Água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – Brasília, DF: CGEE, 2012. ISBN 978-85-60755-45-5.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, GGES, 2016. ISBN: 978-85-8210-033-2.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos> Acesso em: 17/10/2020.

ANANDHI, A., KANNAN. Vulnerability assessment of water resources – Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. Journal of Hydrology. 557, p. 460-474, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032>

ANANDHI, A., STEINER, J., BAILEY, N. A system's approach to assess the exposure of agricultural production to climate change and variability. Climate Change 136, p. 647-659, 2016.

ANDRADE-LIMA, D. de. O domínio das caatingas. Recife: UFRPE: IPA, 1992. 48p.

ANGELOTTI, F.; FERNANDES JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. de. Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 06, p. 1097-1111, 2011.

ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V. S.; LOPES, W. T. A.; SILVA, A. F.; Avaliação do Modelo CHDM Utilizando Dados de uma Bacia Experimental no Semiárido Nordeste. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Anais. Rio Grande do Sul: ABRH, 2002.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. J. American Water Resources Assoc. v. 35, p. 411-424, 1999.

AZEVEDO, H. A. M. A.; BARBOSA, R. P. Gestão de recursos hídricos no Distrito Federal: uma análise da gestão dos Comitês de Bacia Hidrográfica. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 5, n. 13, p. 162-182, 2011.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, M. T.; SERRAO, E. A. O.; SANTOS, K. S.; LIMA, S. L.; MARGALHO, E. S. Análise de padrões de seca na Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açú No Estado do Rio Grande do Norte. In: XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2019, Catalão-GO. XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2019a.

AZEVEDO, J. V. V.; SOUZA, P. M.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, M. T.; SANTOS, D. A. S. Aplicação da análise fatorial para determinação da vulnerabilidade socioeconômica e ambiental nos municípios do Estado da Paraíba. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 10, n.4, p. 97-111, 2019b. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0008>

AZEVEDO, P. V.; SILVA, M. T.; SERRÃO, E. A. O.; SIQUEIRA, M. S.; SANTOS, K. S.; ATAIDE, L. C. P.; DANTAS, L. G. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açú: trecho do Estado do Rio Grande do Norte. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v. 11, n.2, p. 434-444, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0039>

BACHMAIR, Sophie; WEILER, Markus. New Dimensions of Hillslope Hydrology. In: DELFIS F. LEVIA. Forest Hydrology and Biogeochemistry. New York: Springer, 2011. Cap. 23. p. 455-482. (Ecological Studies, Vol. 2016).

BAKKE, H. A.; LEITE, A. S. de M.; SILVA, L. B. Estatística multivariada: aplicação da análise fatorial na engenharia de produção. Revista Gestão Industrial. v. 04, n. 04: p. 01-14, Ponta Grossa-Paraná, 2008.

BEGUERÍA, S.; VICENTE - SERRANO, S. M.; REIG, F.; LATORRE, B. Índice de evapotranspiração de precipitação padronizado (SPEI) revisitado: ajuste de parâmetros, modelos de evapotranspiração, ferramentas, conjuntos de dados e monitoramento de secas. Int. J. Climatol., 34, p. 3001-3023, 2014. DOI: [10.1002 / joc.3887](https://doi.org/10.1002/joc.3887)

BERNARDI, E. C. S.; PANZIERA, A. G.; BURIOL, G. A.; SWAROWSKY, A. Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental. Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 159-168, 2012.

BESKOW, S.; TIMM, L. C.; TAVARES, V. E. Q.; CALDEIRA, T. L.; AQUINO, L. S. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. Hydrological Sciences Journal, v. 61, p. 2567-2578, 2016.

BEZERRA, K. R. A. Os fatores influenciadores da vulnerabilidade socioeconômica e ambiental no Ceará: uma avaliação político-institucional. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

BINOTTO, D. Proposta de Enquadramento para a Bacia Hidrográfica do Arroio Jacutinga, Município de Ivorá-RS. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012

BOHN, V. Y.; PICCOLO, M. C. Índice padronizado de precipitação e evapotranspiração como uma ferramenta para determinar a dinâmica hidrológica de regiões planas (Argentina). São Paulo, UNESP, Geociências, v. 37, n. 3, p. 627-637, 2018.

BOTAI, C. H.; BOTAI, O.; DLAMINI, L.; PLADULI, E. Characteristics of Droughts in South Africa: A Case Study of Free State and North West Provinces. *Water*, v. 8, n. 10, p. 439-462, 2016.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**, de 5 de outubro de 1988. Brasília/DF: Senado, 1988.

BRASIL. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Política Nacional de Recursos Hídricos.

BRAGA, B. et al. *Introdução à Engenharia Ambiental*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318p.

BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A. Review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310, p. 28-61, 2005.

BROWN, C. M.; JAY, R.; XIMING, L.; REED, C. P. M.; ZAGONA, E. A.; OSTFELD, A.; GREGORY, J. A.; CHARACKLIS, W.; YU, W.; BREKKE, L. The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. *Water Resour. Res.* 51 (8), p. 6110-6124, 2015.

BROOKS, N., ADGER, W.N., KELLY, P.M. Os determinantes da vulnerabilidade e capacidade de adaptação em nível nacional e as implicações para a adaptação. *Global Environmental Change*, 15 (2), p. 151-163, 2005.

BUSMAN, D. V.; AMARO, V. A.; WALFIR, P. M. SF. Métodos de Vulnerabilidade Social – Subsídios à Adaptação às Mudanças Climáticas. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, No 69/4, p. 659-674, Abr/2017.

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000. Access on 30 Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002>.

CAMPOS, J. N. S. Vulnerabilidade do semiárido às secas, sob o ponto de vista dos recursos hídricos. Brasília, Projeto ÁRIDAS–RH, SEPLAN/PR, 1995.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n. 42, v. 1, p. 140-161, jan-jun, 2020. ISSN: 2176-5774.

CARVALHO, A. T. F. Metodologia para avaliação de sustentabilidade hidroambiental para projetos de intervenções em rios perenes (MASRios). Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018. 155f.

CATTELL, R. B. The Scientific Use of Factor Analysis in Behavioral and Life Sciences. Nova York: Plenum, 1978.

CARVALHO, M.; CORTEZ, C., SILVA, A.; SILVA, G. (2020). Caracterização da precipitação e sua relação com a evapotranspiração de referência em municípios do Piauí. Geografia Ensino & Pesquisa, 24, e 14. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499440226>

CBHSF – Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025, AGB Peixe Vivo, Belo Horizonte (MG), 74 p., 2016.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/> Acesso em: 14 de julho de 2020.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Secas no Brasil: política e gestão proativas – Brasília: - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Banco Mundial, 2016.

CECONI, D. E.; PICCILLI, D. G. A.; BERNARDI, F.; FENSTERSEIFER, P. Analysis of vulnerability for environmental planning of a water supply basin. Ambient. soc. 1.21, p. 1-22, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0078r2vu1811ao>.

CHEN, Y.; FENG, Y.; ZHANG, F.; WANG, L. Assessing Water Resources Vulnerability by Using a Rough Set Cloud Model: A Case Study of the Huai River Basin, China. *Entropy*. 21(1), 14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/e21010014>

CHUNG, E. S.; LEE, K. S. Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multi criteria decision making techniques: case study of Korea. *Water Resour Manage*. 23, p. 2395-2416, 2009.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Inventário de projetos. Brasília: rev. atual. 3. ed. 1999. 223p.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Elaboração do Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do canal Sertão. Estudo de Sustentabilidade do Projeto canal Sertão Alagoano, 2003.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol*. 369, p. 165–174, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>

COLHIADO, E. G. da S. Uma Análise Estatística dos dados de IDEB do Estado de Mato Grosso. Dissertação (Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas). Universidade Estadual do Mato Grosso. Sinop (MT), 2017.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. E. M. Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19 n. 3, p. 205-214, 2014.

COLMAN, EA 1953. *Vegetação e gestão de bacias hidrográficas*. The Ronald Press Co., Nova York.

CORMACK, R. A review of classification. *Journal of the Royal Statistical Society (Series A)*, v. 134, p. 321-367, 1971.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. Análise multivariada para cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia. São Paulo: Atlas, 2007.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. São José dos Campos: INPE, 2001. 25p.

CRUZ, I. C. da; TOPA, M. A. Análise multivariada como ferramenta de gerenciamento de fornecedores visando um relacionamento com vantagem competitiva. Monografia da graduação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

CRUZ, P. H.; COIMBRA, R. M.; FREITAS, M. A. V. Vulnerabilidade climática e recursos hídricos no Nordeste. In: O ESTADO DAS ÁGUAS NO BRASIL/ org. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas – Brasília, DF: ANEEL, SIH; MMH, SRH; MME, 334p. 1999.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; *et al.* Eventos de seca extrema no Brasil de 2011 a 2019. *Atmosphere*, 10, 642, 2019.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, v. 93, n. 1, p. 59-70, jun. 2011.

DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; HERDIES, D. L.; RODRIGUES, V. P. S.; XAVIER, A. C. Análise das Tendências Espaço-Temporais das Condições de Úmido nas Diferentes Estações Chuvosas do Nordeste Brasileiro por Regressão Quantílica e Teste Bootstrap. *Geociências*, 9, 457, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9110457>

DA ROCHA JÚNIOR, R.L.; DOS SANTOS SILVA, F.D.; COSTA, R.L.; GOMES, H.B.; PINTO, D.D.C.; HERDIES, D.L. Bivariate Assessment of Drought Return Periods and Frequency in Brazilian Northeast Using Joint Distribution by Copula Method. *Geosciences*, 10, 135, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10040135>

DAVIE, T. R. In: DAVIE, Tim. FUNDAMENTALS OF HYDROLOGY. 2. ed. New York: Routledge, 2002. Cap. 5. p. 78-100.

DE CARVALHO, O. As Secas e os seus Impactos. Capítulo 2 In: A Questão da Água no Nordeste, CGEE/ANA, p. 45-100, Brasília, 2012.

DEMANBORO, A. C. e MARIOTONI, C. A. A gestão dos recursos hídricos em mega-cidades: desafios da sustentabilidade econômico-ecológica, 2000.

DENG, L.; YAN, W.; ZHANG, Y.; SHANGGUAN, Z. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China. *Forest Ecology and Management* 366, p. 1-10, 2016.

DE ROO, A.; ODIJK, M.; SCHMUCK, G.; KOSTER, E.; LUCIEER, A. Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Phys. Chem. Earth Part B*. 26(7), p. 593–599, 2001. DOI: [10.1016/S1464-1909\(01\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(01)00054-5)

DELPLA, I.; PROULX, F.; RODRÍGUEZ, M. J. A methodology to prioritize spatio-temporal monitoring of drinking water quality considering population vulnerability. *Journal of Environmental Management*. V. 255, 109869, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109869>

DERESSA, T. T.; HASSAN, R. M.; RINGLER, C. Perception of and adaptation to climate change by farmers in the Nile basin of Ethiopia. *Journal of Agricultural Science*, 149(1), p. 23-31, 2011.

DICTORO, V. P.; HANAI, F. Y. A gestão de bacias hidrográficas e os critérios para seleção de propostas de projetos de educação ambiental. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 8, n. 2, p. 4-23, abr/jun. 2019.

DOURADO, C. da S.; OLIVEIRA, S. R. de M.; AVILA, A. M. H. de. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. *Bragantia*, Campinas, v. 72, n. 2, p. 192-198, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052013000200012>

DOS SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – Agriamb, v. 15, n. 7, 2011.

DOSSKEY, M. G.; VIDON, P.; GURWICK, N. P.; ALLAN, C. J.; DUVAL, T. P.; LOWRANCE, R. The role of riparian vegetation in protecting and improving water quality in streams. J. Am. Water Resour. Assoc. 46, p. 1-18, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00419.x>

EEA. Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012; EEA-Report N° 12/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. 300pp.

ESCOFIER, B.; PAGÈS, J. Análisis factorialies simples y multiples: objetctivo, métodos y interpretación. Bilbao. Ed. Universidad del Pais Vasco, 1992.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Review of world water resources by country. Water Reports 23, 2003.

FACCO, A. G., Modelagem do balanço hídrico em microbacia hidrográfica com plantio eucalipto. Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2008.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisão. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FELLMANN, T. A avaliação da vulnerabilidade relacionada à mudança climática no setor agrícola: Revisão das estruturas conceituais no workshop da FAO / OCDE sobre construção de resiliência para adaptação às mudanças climáticas no setor agrícola, 23 a 24 de abril de 2012, RedRoom FAO, Roma (2012).

FERNANDES, J. G. Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

FIELD, A. Descobrendo a Estatística usando o SPSS. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

FILMER, D.; PRITCHETT, L. H.; Estimando efeitos de riqueza sem dados de gastos - ou lágrimas: uma aplicação para matrículas educacionais nos estados da Índia *Demografia*, 38 (1), p. 115-132, 2001.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, L. S. Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)*, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2015.

FÜSSEL, H. M.; KLEIN, R. J. T. Avaliações de vulnerabilidade às mudanças climáticas: uma evolução do pensamento conceitual. *Clim Change*. 75 (3), p. 301-29, 2006.

FUSSEL, H.S. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob. Env. Change*. 17 (2), p. 155-167, 2007.

GBETIBOUO, G.A., RINGLER, C., HASSAN, R. Vulnerability of the South African farming sector to climate change and variability: An indicator approach. *Nat. Resour. Forum*. 34, p. 175-187, 2010.

GLEICK, P.H. Vulnerability of water systems. *Climate Change and U.S. Water Resources*, Wiley, New York, 1990.

GONTIJO, C.; AGUIRRE, A. Elementos para uma tipologia do uso do solo agrícola no Brasil: uma aplicação da Análise Fatorial. Rio de Janeiro: *Revista Brasileira de Economia*, v. 42, n. 1, p. 13-49. jan./mar. 1988.

GUILHERMINO NETO, G. Estatística multivariada sobre dados categóricos: contribuições da regressão logística à análise de correspondência múltipla. Monografia de especialização. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais. 2013.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; DE NYS E.; MOLEJON, C.; MARTINS, E. S. Preparação para a seca no Brasil. *Weather Clim Extremes* 3: p. 95-106, 2014. DOI: [10.1016 / j.wace.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.12.001)

GUTTMAN, N. B. Comparando o índice de seca de Palmer e o índice de precipitação padronizado. *J. Amer. Recursos de água. Assoc.*, 34, p. 113-121, 1998.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise multivariada de dados. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados. – 6. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAIR, J. F. et al. *Multivariate Data Analysis*. 7. ed. Pearson Prentice Hall, 2010. 593 p.

HÄRDLE, W.; SIMAR, L. *Applied multivariate statistical analysis*. 2. ed. Berlin: Springer, 2007.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quart J Roy Meteor Soc.* 103, p. 77–92, 1977. DOI: [10.1002/qj.49710343505](https://doi.org/10.1002/qj.49710343505)

HEIM JUNIOR, R. R. A review of twentieth - century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorology Society*, v. 83, n.8, p. 1149-1163, 2002.

HORTON, Robert E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, [s.l.], v. 14, n. 1, p.446-460, 1933. American Geophysical Union (AGU).

INSA - Instituto Nacional do Semiárido. *Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: Estudos e Aplicações*. Campina Grande - PB, 2012. 258 p. ISBN 978-85-64265-03-5.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *CLIMATE CHANGE 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. working group II *Impacts adaptation and vulnerability*, p. 10, 2001.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Mudança do Clima 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade*. 2014a.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Alterações Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade - Resumo para Decisores. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (WGII AR5). Organização Meteorológica Mundial (WMO), Genebra, Suíça, 34 págs, 2014b.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change and Land 2019: Special Report on Climate Change, Desertification, Land, Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems, Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://ipcc.ch/report/srccl>

JACOBI, P. R. Inovação na Governança da Água e Aprendizagem Social no Brasil. In: Instituto Akatu São Paulo: SP, 2011.

JARSJÖ, J.; ASOKAN, S. M.; PRIETO, C.; BRING, A.; DESTOUNI, G. Hydrological responses to climate change conditioned by historic alterations of land-use and water-use. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, p. 1335-1347, 2012.

JESUS, E. T. *et al.* Seca meteorológica e hidrológica de 1987 a 2017 na Bacia do Rio Doce, Sudeste do Brasil. *RBRH*, Porto Alegre, v. 25, e 29, 2020, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190181>

JINYIN, C.; XIANG, L.; HAIBING, Z.; XINTONG, B. A.; Novel cluster center fast determination clustering algorithm. *Applied Soft Computing* 57, p. 539–555, 2017. DOI: 10.1007/s10462-012-9328-0

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied multivariate statistical analysis*. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.

JUN, K. S.; CHUNG, E. C.; SUNG, J. Y.; LEE, K. S. Desenvolvimento de índice de vulnerabilidade espacial dos recursos hídricos considerando os impactos das mudanças climáticas. *Ciência do Meio Ambiente Total*, v. 409, e. 24, p. 5228-5242, 2015.

KANG, Y.; KHAN, S.; MA, X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—a review. *Prog. Nat. Sci.* 19 (12), p. 1665-1674, 2009.

KANAKOUDIS, V., TSITSIFLI, S., GONELAS, K., PAPADOPOULOU, A., KOUZIAKIS, C., SOKRATIS, L. Determining a socially fair drinking water pricing policy: the case of Kozani, Greece. *Procedia Engineering.* 162, p. 486-493, 2016.

KOWARICK, L. *Viver em risco: Sobre a vulnerabilidade socioeconômica e civil.* Editora 34. São Paulo. 2009.

LANE, M. E.; KIRSHEN, P. H; VOGEL, R. M. Indicators of impacts of global climate change on US water resources. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 125 (4), p. 194-204, 1999.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. *Analyzing multivariate data.* São Paulo: Cengage Learning, 2011.

LEE, S. H.; YOO, S. H.; CHOI, J. Y.; BAE, S. Assessment of the impact of climate change on drought characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea using time series SPI and SPEI: 1981–2100. *Water* 9, p. 579-598, 2017. DOI: 10.3390/w11102184.

LEWIS, S.L., EDWARDS, D.P., GALBRAITH, D. Increasing human dominance of tropical forests. *Science.* 349 (6250), p. 827-832, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>

LI, X.; HE, B.; QUAN, X., LIAO, Z.; BAI, Z.; Use of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982–2012. *Remote Sensing* 7, p. 10917-10937, 2017.

LIMA, E.B.N.R. *Modelagem integrada para gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá,* Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

LIMA, J. E. F. W. 2010. *Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado.* Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 312p.

LIMA, S. L. de; SILVA, M. T.; SOUSA, W. G. de; SIQUEIRA, M. S. da; ANDRADE, A. S. de; MELO, M. M. M. S. Padrões espaciais e temporais de episódios de seca no Estado do Rio Grande do Norte. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 9, p. 330-342, 2019.

LINDEN, R. Técnicas de agrupamento, *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, Rio de Janeiro, vol. 4, p. 18-36, 2009.

LINDOSO, D.; EIRÓ, F.; ROCHA, J. D. Desenvolvimento Sustentável, Adaptação e Vulnerabilidade à Mudança Climática no Semiárido Nordeste: Um Estudo de Caso no Sertão do São Francisco. *Rev. Econ. NE*, v. 44, n. Especial, p. 301–332, 2013.

LOU, R. F. Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUDEWIG, D. R. et al. O processo de gestão de custos e planejamento de resultados utilizando técnicas de análise estatística de agrupamentos. *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 31, p. 215-220, 2009.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, SP. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 4, p. 735 - 741, 2003.

MAGALHÃES, A.R. Projeto ÁRIDAS. Brasília, *Resumo executivo*, 1994.

MAIDMENT, D. R. Hydrologic Cycle. In: *Handbook Of Hydrology*. McGraw- Hill, 2ªEd, 1.1-15p, 1993.

MALHI, Y., ROBERTS, J.T., BETTS, R.A., KILLEEN, T.J., LI, W., NOBRE, C.A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*. 319 (5860), p. 169-172, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1146961>

MANLY, B. F. J. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229 p.

MAO, D.; CHERKAUER, K. A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. *Journal of Hydrology*, v. 374, p.71-82, 2009.

MARENGO, J. A. Cenários de mudanças climáticas para o Brasil em 2100. *Ciência & Ambiente*, v. 34, p. 100-125, 2007a.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v. 1, p. 214. 2007b.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

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. esp., p. 49-54, 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theor Appl Climatol.* 129, p. 1189–1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 6, n. 2, p. 35- 47, 2012.

MARTINS, R. C.; LIMA, M. J. T. de. Capital cultural na gestão ambiental por bacias hidrográficas. In: CASTRO, J. B.; CUNHA, L. H.; FERNANDES, M.; SOUZA, C. M. de. (Orgs). *Tensão entre justiça ambiental e justiça social na América Latina: o caso da gestão da água*. Campina Grande: EDUEPB, p. 115-150, 2017.

MASCARENHAS, A. C. M. CONFLITOS E GESTÃO DE ÁGUAS: o caso da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2008.

MASSMANN, F.; WEHRHAHN, R. Qualitative social vulnerability assessments to natural hazards: examples from coastal Thailand. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v.14, n.1, p. 3-13, 2014.

MATOS, D. A. S.; RODRIGUES, E. C. *Análise fatorial - Brasília: Enap, 2019. 74 p.: il. - ISBN: 978-85-256-0118-6.*

MCDONNELL, J. et al. Are all runoff processes the same? *Hydrological Processes*, [s.l.], v. 27, n. 26, p. 4103-4111, 2013.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. 8^a Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. *Anaheim*, p. 179-184, 1993.

MEIGH, J. R.; MCKENZIE, A. A.; SENE, K. J. A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. *Water Resour Manage.* 13, p. 85-115, 1999.

MENEZES, J. A.; CONFALONIERI, U.; MADUREIRA, A. P.; DUVAL, I. D. B.; SANTOS, R. B. D MARGONARI C (2018) Mapeando a vulnerabilidade humana às mudanças climáticas na Amazônia brasileira: A construção de um índice de vulnerabilidade municipal. *PLoS ONE* 13 (2): e0190808. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190808>

MESQUITA, C.; ASSIS, A.Q.S.de.; SOUZA, R.M.de. Vulnerabilidade natural à perda de solos da bacia hidrográfica do rio Sagrado – Morretes/PR. *Revista de Geografia*. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, v.27, n. 2, 2010.

MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MMA, Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Recursos Hídricos. *Caderno da região hidrográfica do São Francisco*. Brasília/DF: MMA, 2006.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/component/k2/item/427-plano-nacional-de-recursos-h%C3%ADricos.html> Acesso em: 14 de Julho de 2020.

MOLINARI, D. C.; VIEIRA, A. F. G. Considerações Preliminares Sobre a Capacidade de Infiltração de Água no Solo no Distrito Industrial II Manaus (AM). V Simpósio Nacional de Geomorfologia, I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia UFSM - RS, 02 a 07 de Agosto de 2004.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, p. 1-10, 2002.

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MORTON, J. F. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n 50, p. 19080-19085, 2007.

MOURA, M. S. B.; GALVINCIO, J. D.; BRITO, L. T. L.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. da. Embrapa Semiárido. *Clima e água de chuva no Semi-Árido*. cap. 2, p. 37-59, 2007. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/159649> Acesso em: 16 de janeiro de 2020.

NAE - Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, *Mudança de clima: negociações internacionais sobre a mudança de clima: vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança de clima*. Brasília, 2005. (Cadernos NAE, v. 1).

NARVÁEZ, L.; LAVELL, A.; PÉREZ ORTEGA, G. *La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos*. San Isidro: Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009.

NATENZON, C. Vulnerabilidad, incertidumbre y planificación participativa de desastres: el caso de las inundaciones catastróficas en Argentina. In: PORTO, M. F. S.; FREITAS, C. M.

(Org.). Problemas ambientais e vulnerabilidade: abordagens integradoras para o campo da Saúde Pública. Rio de Janeiro: CESTEH, ENSP, Fiocruz, p. 57-78, 2002.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS GRASSLAND, J. R. 2011. Soil and Water Research Laboratory. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service Blackland Research Center-Texas Agrilife Research. Texas A&M University System, 2011.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; STICKLER, C.; ALENCAR, A.; AZEVEDO, A.; SWETTE, B.; BEZERRA, T.; DIGIANO, M.; SHIMADA, J.; MOTTA, R. S.; ARMIJO, E.; CASTELLO, L.; BRANDO, P.; HANSEN, M. C.; MCGRATH-HORN, M.; CARVALHO, O.; HESS, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*. 344, p. 1118–1123, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1248525>

NOBRE, P.; MELO, A. B. C. Variabilidade Climática Intrasazonal Sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. *Revista Climanalise*, 2001. Cachoeira Paulista, SP.

OLIVEIRA, P. T. S.; LEITE, M. B.; MATTOS, T.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; XAVIER, R. O.; MATOS, D. M. S.; WENDLAND, E. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology*, 2016.

OLIVEIRA. V. A.; MELLO. C. R.; VIOLA. M. R.; SRINIVASAN. R. Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande river basin, Brazil. *CERNE.*, 24, p. 334-343, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201824042573>

OP DE HIPT, F. O.; DIEKKRÜGER, B.; STEUP, G.; YIRA, Y.; HOFFMANN, T.; RODE, M.; NÄSCHEN, K. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catch-ment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. *Sci Total Environ*. 653, p. 431-445, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Core set of indicators for environmental performance reviews, OECD Environment Monographs, 83, Paris, 1993.

PACA, V. H. M. da; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; HESSELS, T. M.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. F.; BASTIAANSSEN, W. G. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. **Ecological Processes**, v. 8, n. 1, p. 6, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1186/s13717-019-0158-8>>

PALMER, W. C. *Meteorological Seca*; Artigo de Pesquisa No. 45. Departamento de Comércio dos EUA; Bureau de Meteorologia: Washington, DC, EUA, 1965.

PAN, Y. X; WANG, X. P; JIA, R. L.; CHEN, Y. W.; HE, M. Z. Spatial variability of surface soil moisture content in a re-vegetated desert area in Shapotou, Northern China. *Journal of Arid Environments*, v.72, p. 1675-1683, 2008.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*. 147, p. 595-620, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>

PASSOS, J. S. de A.; Variabilidade espaço-temporal da precipitação do Alto São Francisco (sub-40) utilizando dados do sensor PR/TRMM. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2015.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp, 2014. ISBN: 978-85-285-0207-7

PEI, Z.; FANG, S.; WANG, L.; YANG, W. Comparative Analysis of Drought Indicated by the SPI and SPEI at Various Timescales in Inner Mongolia, China. *Water*, 12 (7): 1925, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12071925>

PEREZ, A. B. A. ANÁLISE DE LIMIARES E PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA ENCOSTA DA LAGOA DO PERI-SC. Trabalho

Conclusão do Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

PLUMMER, R.; DE LOË, R.; ARMITAGE, D. A Systematic Review of Water Vulnerability Assessment Tools. *Water Resour Manage.* 26, p. 4327–4346, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0147-5>

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Em busca da gestão de recursos hídricos para a cidade resiliente. *Revista DAE*, n. 195, p. 6-11, 2014.

PRESTON, B. L.; YUEN, E. J.; WESTAWAY, R. M. Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustain Sci.* 6, p. 177–202, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0129-1>

PRESTON, BL; BROOKE, C.; MEASHAM, TG; SMITH, TF; GORDDARD, R. Inflamando mudanças no governo local: lições aprendidas de uma avaliação de vulnerabilidade a incêndios florestais. *Mitig. Adaptar. Strateg. Glob. Chang* 14, p. 251-283, 2009.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. *Estudos Avançados.* 11(29), 1997. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141997000100007>

RAMOS, M. C.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Impact of land leveling on soil moisture and runoff variability in vineyards under different rainfall distributions in a Mediterranean climate and its influence on crop productivity. *Journal of Hydrology*, v.321, p.131-146, 2006.

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa, 1997.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole Ltda. São Paulo. 1990. 188p.
RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 11(6), p. 628-636, 2007.

RIBEIRO, C. R. Avaliação da sustentabilidade hídrica do Município de Juiz de Fora/MG: um subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos em âmbito municipal. Juiz de Fora: UFJF/FACENG, 2009. Monografia de Especialização.

ROLAND, F. *et al.* Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Braz. J. Biol.*, 72(3), suppl. p. 709-722, 2012.

SA, I. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, A. de S.; SILVA, D. F. da. Caracterização ambiental do Vale do Submédio São Francisco. Embrapa Semiárido, 2009.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34, p. 1-7, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>

SANTOS, C. A. C. dos; BRITO, J. I. B de. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo , v. 22, n. 3, p. 303-312, Dec. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862007000300003>

SANTOS, I. dos. Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. 2009. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de 73 Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SANTOS, D. F. Modelo multicritério de apoio à decisão na avaliação dos indicadores de risco em saúde. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

SANTOS, J. Y. G.; CARVALHO NETO, J. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Aplicação do modelo SWAT para a simulação chuva-vazão na Bacia do Rio Tapacurá, Estado de Pernambuco. *Anais Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves. RS, Brasil, p.01-08, 2013.

SCANLON, B. R.; JOLLY, I.; SOPHOCLEOUS, M.; ZHANG, L. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43, p. 1-18, 2007. DOI: [10.1029/2006WR005486](https://doi.org/10.1029/2006WR005486)

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K. C. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Adv. Geosci.* 9: p. 137-143, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-9-137-2006>

SCHUSSEL, Z.; NASCIMENTO NETO, P. Gestão por bacias hidrográficas: do debate teórico à gestão municipal. *Ambiente e Sociedade*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 137-152, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422ASOC838V1832015>

SHUTTLEWORTH, W. J (2012): *Terrestrial Hydrometeorology*. Wiley-Blackwell, 448p.

SERRÃO, E. A. O.; SILVA, M. T.; FERREIRA, T. R.; SOUSA, F. A. S.; LIMA, A. M. M.; ATAIDE, L. C. P.; WANZELER, R. T. S. (2020). Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of The Total Environment*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140981>

SERRÃO, E. A. O.; SILVA, M. T.; SOUSA, F. de A. S.; LIMA, A. M. M. DE; SANTOS, C. A. DOS; ATAIDE, L. C. P. DE; SILVA, V. de P. R. da. Four decades of hydrological process simulation of the Itacaiúnas river watershed, southeast amazon. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(3), 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>

SHIFERAW, B.; TESFAYE, K.; KASSIE, M.; ABATE, T.; PRASANNA, B. M. M.; MENKIR, A. Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. *Weather and Climate Extremes*, v. 3, p. 67-79, jun. 2014.

SILVA, F. B. R.; RICHÉ, G. R.; TONNEAU, J. P.; SOUZA NETO, N. C. DE; BRITO, L. T. L.; CORREIA, R. C.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B. DA; SILVA, A. B. DA; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; LEITE, A. P. Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico e prognóstico. Recife: Embrapa Solos Escritório Regional de Pesquisa e Desenvolvimento Nordeste ERP/NE; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2000.

SILVA, L. P. E. Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVA, L. S.; GALINDO, I. C. L.; NASCIMENTO, C. W. A.; GOMES, R. P.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A. Heavy metal contents in Latosols cultivated with

vegetable crops. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 46, n. 4, p. 391-400, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v46a41587>

SILVA, M. A. R. Economia dos recursos naturais. In: MAY, P.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. (Orgs.). *Economia do meio ambiente: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.

SILVA, M. T. MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO. Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2014 (Tese de Doutorado).

SILVA, M. T.; SILVA, V. de P. R. da; SOUZA, E. P.; ARAÚJO, A. L. Aplicação do Modelo SWAT na Estimativa da Vazão na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 8, n. 6, p. 1615-1627, 2015. DOI: [doi:https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.6.p1615-1627](https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.6.p1615-1627).

SILVA, V. de P. R. da; SILVA, M. T.; SINGH, V. P.; SOUZA, E. P. de.; BRAGA, C. C.; *et al.* Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *CATENA*, v. 162, p. 166-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>

SILVA, V. de P. R. da; SILVA, M. T.; SOUZA, E. P. de. INFLUENCE OF LAND USE CHANGE ON SEDIMENT YIELD: A CASE STUDY OF THE SUB-MIDDLE OF THE SÃO Francisco River Basin. *Eng. Agrícola, Jaboticabal*, v. 36, n. 6, p. 1005-1015, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1005-1015/2016>

SINGH, K. P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) – a case study. *Water Research*, n. 38, p. 3980-3992, 2004.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; CERQUEIRA, G. C.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*. 440, p. 520-523, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nature04389>

SOUSA, W. G. de.; SILVA, M. T.; LIMA, S. L. de; SIQUEIRA, M. S. da; MELO, M. M. M. S.; ANDRADE, A. S. de. Análise fatorial aplicada à variabilidade do vento no Estado da Paraíba. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 9, p. 177-190, 2019.

SPEARMAN, C. "General Intelligence", Objectively Determined and Measured. *American Journal of Psychology*, USA, 1904.

SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P. Rumo à identificação de áreas em risco climatológico de desertificação usando a classificação Köppen-Geiger e o índice de aridez da FAO. *Int J Climatol*, 2014. DOI: [10.1002/joc.4124](https://doi.org/10.1002/joc.4124)

SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, v. 30, n 03, p. 453-462, 1994.

SRINIVASAN. R.; ZHANG. Z.; ARNOLD. J. G. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *Transactions of ASABE*. 53, p. 1533-1546, 2010. DOI: [10.13031/2013.34903](https://doi.org/10.13031/2013.34903)

SULLIVAN, C. A. Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 25, p. 627-640, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0426-8>

TAN, C.; YANG, J.; LI, M. Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui autonomous region, China. *Atmosphere*, 6: p. 1399-1421, 2015.

TALLAKSEN, L. M.; VAN LANEN, H. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. [s.l.] Elsevier, 2004.

TEIXEIRA, A. H. C. *Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009. Série Documentos - Embrapa Semiárido*, 2010 21p.

TIJDEMAN, E. et al. Natural and Human Influences on the Link Between Meteorological and Hydrological Drought Indices for a Large Set of Catchments in the Contiguous United States. *Water Resources Research*, p. 6005-6023, 2018.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York, v.38, n.1, p. 55-94, 1948.

TOLESSA, T.; SENBETA, F.; ABEBE, T. Land use/land cover analysis and ecosystem services valuation in the central highlands of Ethiopia. *Forests. Trees and Livelihoods*. 26(2), p. 111-123, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/14728028.2016.1221780>

TONMOY, F. N.; EL-ZEIN, A.; HINKEL, J. Assessment of vulnerability to climate change using indicators: a meta-analysis of the literature. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*. 5(6), p. 775-792, 2014.

TRAN, T.V.; TRAN, D.X.; MYINT, S.W.; LATORRE-CARMONA, P.; HO, D.D.; TRAN, P.H.; DAO, H.N. Assessing spatiotemporal drought dynamics and its related environmental issues in the mekong river delta. *Remote Sens*. 11, 2742, 2019.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Metodologia para mapeamento Geoambiental no Oeste do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro De Geografia Física Aplicada, 11. p.3606-3615. Anais. São Paulo, 2005.

TRINDADE, A. L. C. Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio São Francisco. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

TRUMBORE, S.; BRANDO, P.; HARTMANN, H. Forest health and global change. *Science*. 349 (6250), p. 814-818, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aac6759>

TUCCI, C. E. M. e BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora Universidade/UFRGS. ABRH. Rio Grande do Sul, 1997.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2: p. 135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 652p.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados 22 (63), 2008.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. A água. São Paulo, SP: Publifolha, 2005. 120 p.

TUNDISI, J. G.; Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>

UNIFESP – Universidade Federal de São Paulo. GESTÃO LOCAL DE DESASTRES NATURAIS PARA A ATENÇÃO BÁSICA. Secretaria de Gestão do Trabalho e da Educação em Saúde, 2020.

USAID, United States Agency for International Development. Avaliações de vulnerabilidade espacial à mudança climática: uma revisão de dados, métodos e problemas. Nova York, 2014.

VASCONCELOS, A. C. F. Indicadores de vulnerabilidade Socioambiental: proposição de framework e aplicação na cidade de Natal – RN. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

VELICER, W. F.; JACKSON, D. N. Component analysis versus common fator analysis: some issues in selecting an appropriate procedure. Multivariate Behavioral Research, v. 25, p. 1-28, 1990.

VELOSO, G.; SANTOS, R. F.; SILVA, B. K.; DOLCI, B. D. Estimativa de evapotranspiração de referência para o município de Fernandes Pinheiro (PR). Acta Iguazu, Cascavel, v. 1, n. 1, p. 15-22.

VIANA, J. F. DE S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. DA; SILVA, R. M. DA; SOUSA, W. DOS S. Journal of Environmental Analysis and Progress v. 03 n. 01, 2018.

VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERIA, S.; LOPEZ-MORENO, J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 3: p. 1696-1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; CAMARERO, J. J.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; AZORIN-MOLINA, C.; REVUELTO, J.; MORÁN-TEJEDA; SÁNCHEZ-LORENZO, A.; Desempenho de índices de seca para aplicações ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Earth Int.* 16: p. 1-27, 2012.

VICINI, L. Análise multivariada da teoria à prática. 2005. 215 p. Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VILAÇA, M.F.; GOMES, I.; MACHADO, M. L.; VIEIRA, E. M.; SIMÃO, M. L. R. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: O estudo de caso do ribeirão conquista no município de Itaguara/MG. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13, Viçosa. Anais.Viçosa/MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975, 247p.

VOGEL. C.H. Vulnerability and global environmental change. Human Dimensions of Global Change Meeting, Rio, 2001.

WANG, W.; WU, J.; FANG, L. Design and implementation of spatial database and geo-processing models for a road geo-hazard information management and risk assessment system. *Environ Earth Sci.* 73, p. 1103-1117, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3461-9>

WELLS, N.; GODDARD, S.; HAYES, M. J. A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *J. Clim.* 17, p. 2335–2351, 2004.

WHEATER, H. S. Modeling hydrological processes in arid and semi-arid areas: in introduction to the workshop. In: WHEATER, H. S.; Sorooshian, S.; sharma, K. D. (Ed.). *Hydrological modeling in arid and semi-arid areas*. New York: Cambridge University, p. 1-20, 2008.

WIGMOSTA, M.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30: p. 1665-1679, 1994.

XENARIOS, S.; NEMES, A.; SARKER, G. W.; SEKHAR, N. U.; Avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas: As comunidades em áreas propensas a inundações em Bangladesh são mais vulneráveis do que aquelas em áreas propensas a secas? *Recursos Hídricos e Desenvolvimento Rural*. v. 7, p. 1-19, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wrr.2015.11.001>

ZHANG, Q.; QI, T.; SINGH, V. P.; CHEN, Y. D.; XIAO, M. Análise de frequência regional de secas na China: uma perspectiva multivariada. *Water Resour Manage* 29, p. 1767-1787, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0910-x>

ZOU, C.B.; TURTON, D. J.; WILL, R. E.; ENGLE, D. M.; FUHLENDORF, S. D. Alteration of hydrological processes and streamflow with juniper (*Juniperus virginiana*) encroachment in a mesic grassland catchment. *Hydrological Processes* 28: p. 6173-6182, 2014.

ŽUROVEC, O.; ČADRO, S.; SITAUULA, B. K. Quantitative Assessment of Vulnerability to Climate Change in Rural Municipalities of Bosnia and Herzegovina. *Sustainability* 9(7), 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071208>.