



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

REGINALDO MOURA BRASIL NETO

**ANÁLISE DA SECA NO ESTADO DA PARAÍBA UTILIZANDO DADOS
DO SATÉLITE TRMM 3B42V7**

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

JOÃO PESSOA

2017

REGINALDO MOURA BRASIL NETO

**ANÁLISE DE SECA NO ESTADO DA PARAÍBA UTILIZANDO DADOS
DO SATÉLITE TRMM 3B42V7**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, em cumprimento à exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos.

JOÃO PESSOA

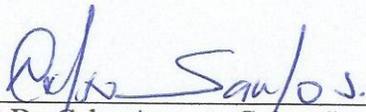
2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

REGINALDO MOURA BRASIL NETO

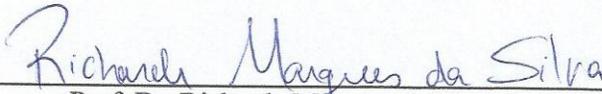
ANÁLISE DE SECA NO ESTADO DA PARAÍBA UTILIZANDO DADOS DO SATÉLITE TRMM 3B42V7

Trabalho de Conclusão de Curso em 24/11/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:



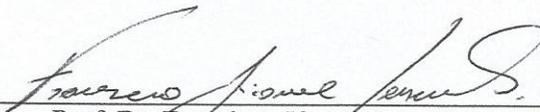
Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



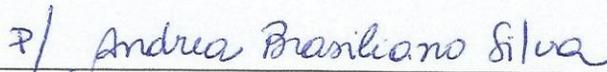
Prof. Dr. Richarde Marques da Silva
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Francisco Jácome Sarmiento
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

B823a Brasil Neto, Reginaldo Moura

Análise de seca no estado da Paraíba utilizando dados do satélite TRMM 3B42 V7/ Reginaldo Moura Brasil Neto. – João Pessoa, 2017.

92f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Seca 2. Paraíba 3. TRMM 4. SPI I. Título

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 551.577.3(043)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por nunca ter me abandonado nos momentos mais difíceis, e por sempre ter me proporcionado foco, força e fé para crescer na vida e alcançar todos os meus sonhos.

À minha maior admiradora e amiga, dona Paula, por sempre ter confiado e ter feito de tudo por mim. Muito obrigado por ter deixado sempre o caminho livre para que eu pudesse estudar da maneira mais confortável possível. A você, minha eterna gratidão mãe, essa conquista é mais sua do que minha.

Ao meu pai, seu Reginaldo, por toda a contribuição e ensinamento dado desde o início da vida, me proporcionando condições para ter uma boa educação desde cedo, sem a qual não teria chegado até aqui.

Ao meu querido amigo Vânio Supino, homem que eu aprendi a admirar e que tem um coração de ouro, que me ensina todos os dias muito mais do que ele imagina. E também aos meus queridos meios-irmãos Valério e Vinicius, por todo companheirismo e irmandade ao longo dessa caminhada.

A minha avó Jacylete, grande incentivadora de toda essa caminhada, que sempre me ajudou e contribuiu muito para que eu alcançasse os meus sonhos.

A minha namorada Byanka, por estar presente na minha vida nos momentos bons e ruins, comemorando na felicidade e incentivando na tristeza. Muito obrigado por toda a confiança e por toda a paciência ao longo dessa caminhada.

Ao querido professor Celso, que foi uma das peça-chave para que eu chegasse até aqui. Muito obrigado por todos os ensinamentos, por toda a paciência e por toda a confiança. Sou muito grato por todas as coisas que o senhor fez por mim e espero que esse seja o início de uma longa jornada juntos.

A todos os professores que passaram seus conhecimentos ao longo dessa trajetória acadêmica, em especial, aos professores Richarde e Sarmiento, por todas as orientações e contribuições, aconselhando e indicando o caminho certo a ser seguido. Obrigado por serem exemplos de profissionais, que mudam a vida de tantos alunos.

Aos meus queridos amigos de curso, futuros grandes engenheiros, que acima de tudo preservaram a amizade, a confiança e a responsabilidade ao longo do curso. Em especial aos meus amigos, Leonardo, Eli, Guilherme, Arthur, Renan, Fabão, Pedro F. e a Reginalda, na certeza de que serão excelentes profissionais.

À minha família materna, a famosa Pereirada, que sempre me deu apoio e foi grande incentivadora da minha trajetória acadêmica, sendo um exemplo de união, fraternidade e amor. À minha família paterna, que também me auxiliou nas minhas vitórias. Em especial ao meu primo Bruno, que me concedeu a oportunidade de aprender todos os dias no Ilha de Maiorca, colocando meus conhecimentos e minhas habilidades em prática.

Aos queridos amigos que essa trajetória acadêmica me trouxe, em especial aos amigos do LEPPAN, Alexandre, Zé e Jorge, e aos orientados de Celso, em especial a Paulinha, Vanessa, Isabel, Jacqueline, Samir e Tati. Muito obrigado por todos os ensinamentos e experiências trocadas.

Aos queridos amigos Benjamin Segundo, Igor Diniz, Ivan Regis, Felipe Lima e Victor Medeiros, por toda a amizade e confiança depositada, vibrando nas vitórias e consolando nas derrotas.

Conseguimos, essa vitória é nossa!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE QUADROS	ii
LISTA DE GRÁFICOS.....	iii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. GERAL.....	2
2.2. ESPECÍFICO.....	3
3. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. HIDROLOGIA E CICLO HIDROLÓGICO	3
3.2. PRECIPITAÇÃO	5
3.2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS CHUVAS.....	5
3.2.2. VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL	7
3.2.3. MEDIDAS PLUVIOMÉTRICAS	8
3.3. SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO	11
3.4. TRMM.....	12
3.5. ANÁLISE DE SECA	17
3.6. SPI.....	20
4. METODOLOGIA	24
4.1. ÁREA DE ESTUDO	24
4.2. TRMM.....	25
4.3. SPI.....	26
4.4. ANÁLISE DE CLUSTER.....	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. VALIDAÇÃO DO TRMM	29
5.2. TRMM.....	33
5.3. SPI.....	40
6. CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Ciclo hidrológico da água (Fonte: USGS, 2017)	4
Figura 2– Representação esquemática dos tipos de precipitação (Fonte: Forsdyke, 1969)	6
Figura 3– Distribuição espacial dos pluviômetros no Brasil em (a) 1910 e em (b) 2007. (Fonte: SAR/ANA, 2017)	9
Figura 4– Instrumentos do satélite TRMM (Fonte: NASA, 2017)	13
Figura 5– Localização geográfica e representação das mesorregiões da Paraíba	25
Figura 6– Grade TRMM sobre o estado da Paraíba	26
Figura 7– Classificação SPI e sua relação com a curva normal	26
Figura 8– Localização dos postos pluviométricos e distribuição espacial do coeficiente de correlação entre os dados de precipitação mensais do TRMM e a média dos totais mensais dos pluviômetros no grid sobre o estado da Paraíba (1998–2015)	30
Figura 9– Distribuição espacial do coeficiente de correspondência diária sobre a Paraíba (1998–2015).....	32
Figura 10– Distribuição da precipitação total anual sobre a Paraíba (1998–2015).....	33
Figura 11– Distribuição da quantidade de dias secos anuais sobre a Paraíba (1998–2015)	34
Figura 12– Distribuição da precipitação média mensal sobre a Paraíba (1998–2015)	35
Figura 13– Distribuição da quantidade de dias secos mensais sobre a Paraíba (1998–2015)..	36
Figura 14– Precipitação anual média da Paraíba (1998–2015)	37
Figura 15– Distribuição percentual da quantidade de dias secos sobre a Paraíba (1998–2015)	37
Figura 16– Análise temporal da precipitação da Paraíba (1998–2015)	39
Figura 17– Distribuição da precipitação total mensal sobre o estado da Paraíba (1998–2015)	40
Figura 18– Análise de seca de curto-prazo do (a) SPI-1, (b) SPI-3 e (c) SPI-6, de médio-prazo do (d) SPI-9 e (e) SPI-12 e de longo-prazo do (f) SPI-18, (g) SPI-24 e (h) SPI-48 com base na (i) precipitação mensal média da Paraíba (1998–2015)	41
Figura 19– Distribuição espacial dos índices SPI sobre a Paraíba para dezembro de 2015.....	43
Figura 20– Distribuição espaço-temporal do SPI-1 sobre a Paraíba (1998–2015)	45
Figura 21– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro clusters ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-1, (c–d) SPI-3 e (e–f) SPI-6	46
Figura 22– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro clusters ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-9 e (c–d) SPI-12	48

Figura 23– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro clusters ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-18, (c–d) SPI-24 e (e–f) SPI-48 ...	49
Figura 24– Porcentagem de ocorrência para cada tipo de evento seco (extremo, severo, moderado e suave) para cada índice SPI sobre a Paraíba (1998–2015)	59
Figura 25– Distribuição espacial das áreas afetadas por secas (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48) para eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015).....	61
Figura 26– Distribuição espacial das secas (C-curto, M-médio e L-longo) sobre o estado da Paraíba (1998–2015) para eventos (a) extremamente, (b) severamente, (c) moderadamente e (d) suavemente secos.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Níveis de processamento do satélite TRMM.....	14
Quadro 2– Produtos do satélite TRMM	15

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Porcentagem de ocorrência de cada tipo de evento seco e úmido para cada índice SPI utilizando a precipitação média mensal do estado da Paraíba (1998–2015)	42
Gráfico 2– Porcentagem mensal de eventos extremamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	51
Gráfico 3– Porcentagem anual de eventos extremamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	51
Gráfico 4– Porcentagem mensal de eventos severamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	52
Gráfico 5– Porcentagem anual de eventos severamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)..	53
Gráfico 6– Porcentagem mensal de eventos moderadamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	54
Gráfico 7– Porcentagem anual de eventos moderadamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	54
Gráfico 8– Porcentagem mensal de eventos suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	55
Gráfico 9– Porcentagem anual de eventos de suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	56
Gráfico 10– Porcentagem mensal de eventos secos sobre a Paraíba (1998–2015).....	57
Gráfico 11– Porcentagem anual de eventos secos sobre a Paraíba (1998–2015).....	57
Gráfico 12– Porcentagem de área afetada por secas (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48) para eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)	62
Gráfico 13– Porcentagem de pontos da grade TRMM afetados por cada classificação CML para cada tipo de evento seco sobre a Paraíba (1998–2015).....	65

RESUMO

O monitoramento das secas é uma ferramenta de extrema importância para a tomada de decisões quanto à utilização dos recursos hídricos, principalmente nas regiões áridas e semiáridas do planeta. No entanto, a escassez de dados consistentes e que caracterizem bem a distribuição espaço-temporal das chuvas é um problema enfrentado por diversos estudiosos. Nesse sentido, o presente trabalho visa analisar o comportamento espaço-temporal das secas de curto-, médio- e longo-prazo no estado da Paraíba, nordeste do Brasil, utilizando o índice SPI, no período de 1998–2015, e dados do satélite TRMM. A validação dos dados TRMM foi realizada mediante a comparação com dados de 267 pluviômetros, quando foi comprovada a consistência entre os dados estimados e observados, tanto quanto ao nível de totais de precipitações mensais, quanto na quantidade de dias secos e úmidos. Desse modo, foram utilizadas 187 séries de precipitação diária TRMM, cada uma com 6574 dias, igualmente distribuídas sobre toda a área de estudo, com as quais foi confirmado que o primeiro semestre é o período mais chuvoso e o segundo, o mais seco da região. O litoral paraibano apresentou os maiores níveis pluviométricos, enquanto as regiões do Agreste e da Borborema apresentaram os menores níveis. Além disso, percebeu-se alta ocorrência de dias secos sobre toda a região, principalmente nos meses de setembro, outubro e novembro. Para analisar as secas, foram utilizados oito índices SPI para caracterizar as secas de curto-, médio- e longo-prazo e através da análise de *clusters*, os resultados revelaram que todas as regiões da Paraíba tiveram basicamente o mesmo comportamento ao se analisar as secas de curto-, médio- e longo-prazo ao longo dos 18 anos em estudo. Além disso, percebeu-se que a partir de 2012, o estado paraibano, como um todo, passou a ser significativamente atingido por secas, tal que no ano de 2015, ocorreram eventos secos em basicamente toda a região ao se analisar as secas de curto-, médio- e longo-prazo. Por fim, os resultados mostram que a região da Borborema é a que apresenta a situação mais crítica dentro do estado, visto que essa foi significativamente afetada pelas secas de curto-, médio- e longo-prazo ao se analisar os eventos extremamente e severamente secos. O Sertão, por sua vez, também foi atingido por secas de curto-, médio- e longo-prazo, quando analisando os eventos extremamente secos. O litoral e o Agreste, em contrapartida, foram consideravelmente afetados por secas de curto-, médio- e longo-prazo ao se analisar os eventos moderadamente e suavemente secos. De maneira geral, percebeu-se que ao se analisar as secas de longo-prazo, maior foi a ocorrência de eventos extremamente secos, se comparados com as de curto- e médio-prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Seca, Paraíba, TRMM, SPI.

ABSTRACT

Drought monitoring is an extremely important tool to the making decision process regarding the use of water resources, especially in the arid and semiarid regions of the planet. However, the scarcity of consistent data that well characterize the rainfall spatial-temporal distribution is a problem faced by several researchers. In this sense, the present work aims to analyze the spatial-temporal behavior of short-, medium- and long-term droughts in the state of Paraíba, northeastern Brazil, based on the SPI index, for the period 1998–2015, using data from the TRMM satellite. The TRMM data were validated by comparing to data from 267 rain gauges and the consistency of the satellite data was demonstrated both for total monthly rainfall levels and for the determination of the number of dry and wet days. Thus, 187 time series of daily TRMM precipitation were used, each one with 6574 daily records, equally distributed over the entire study area, which confirmed that the first semester is rainy season and the second one is the driest period of the region. The Paraíba coast had the highest rainfall levels, whereas the regions of Agreste and Borborema had the lowest rainfall levels. In addition, there was a high occurrence of dry days over the whole region, mainly in the months of September, October and November. In order to analyze the droughts, eight SPI indices were used to characterize the short-, medium- and long-term droughts and by the cluster analysis, the results revealed that all regions of Paraíba state had basically the same behavior when analyzing the short-, medium- and long-term droughts over the studied 18 years. In addition, it was noticed that since 2012, the entire state of Paraíba as a whole, was significantly affected by droughts, as in 2015, there were dry events in basically the entire region when analyzing the short-, medium- and long-term droughts. Finally, the results show that the Borborema region presents the most critical situation in the state of Paraíba, since it was significantly affected by the short-, medium- and long-term droughts when analyzing the extreme and severe drought events. Sertão, in turn, was also affected by short-, medium- and long-term droughts, when analyzing the extremely dry events. The coastal and the Agreste, in contrast, were considerably affected by short-, medium- and long-term droughts, when analyzing the moderate and mild drought events. In general, it was observed that when analyzing the long-term droughts, the occurrence of extreme drought events was greater than when analyzing the short- and medium-term droughts.

KEYWORDS: Drought, Paraíba, TRMM, SPI.

1. INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das principais componentes do ciclo hidrológico e é tida como a principal fonte de entrada de água de uma bacia hidrográfica (Santos et al., 2017b). No entanto, em função das variações climáticas e da diversidade das características físicas encontradas no nosso planeta, há uma considerável variabilidade espaço-temporal da precipitação, principalmente nas regiões áridas e semiáridas do mundo. Nessas regiões, o maior problema não necessariamente é o déficit de chuva, mas sim, a alta variação da precipitação no tempo, no espaço, na intensidade e na duração (Farhangi et al., 2016).

Essas variações muitas vezes causam fenômenos como cheias e secas que, além de representarem respectivamente o primeiro e o segundo maior desastre natural geográfico extensivo do planeta (Thomas et al., 2016), causam também diversos danos à sociedade nos mais diferentes aspectos, como na geração de energia hidroelétrica, na agricultura, na sociedade, nos ecossistemas e nos recursos hídricos, por exemplo (Ionita et al., 2016).

Nesse sentido, estudiosos tendem a analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação utilizando, convencionalmente, dados de postos pluviométricos (Martino et al., 2013; Silva et al., 2015; Salvador e Santos, 2010; Santos et al., 2009; Santos e Freire, 2012). O intuito desses estudos é entender melhor o comportamento da precipitação das regiões e assim, ter embasamento teórico para tomar medidas e decisões que diminuam os efeitos danosos que secas e cheias possam causar a população. No entanto, leva-se em consideração que as medições por pluviômetros, por mais que tradicionais, estão condicionadas à ocorrência de falhas, tanto em função do próprio aparelho, quanto em função do operador.

Além disso, destaca-se que a medição dos pluviômetros tem caráter pontual e uma rede de pluviômetros mal distribuída espacialmente é incapaz de capturar a distribuição espacial da chuva, especialmente em terrenos com topografia complexa (Varikoden et al., 2012; Wagner et al., 2012). Em países como o Brasil, a situação é ainda mais agravante. Além de o Brasil apresentar cinco diferentes regimes de precipitação e dimensões continentais (Rao et al., 2015), a distribuição de pluviômetros não abrange todo o território e as falhas de detecção da precipitação podem acabar por distorcer os resultados, influenciando na análise do escoamento superficial ou do balanço de energia, por exemplo (Pereira et al., 2013; Soares et al., 2016).

Em função dessas limitações, sensores remotos orbitais com resolução espaço-temporal cada vez mais detalhada vêm sendo desenvolvidos e seu uso vem sendo cada vez mais

estimulado. Dentre os principais satélites utilizados, o TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) representa uma alternativa considerável no processo de estimativas de precipitação sobre as regiões tropicais do planeta. O TRMM é uma missão conjunta entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a JAXA (*Japan Aerospace Exploration*) projetada para aumentar o entendimento a respeito da variabilidade da precipitação entre as regiões dos trópicos e estimular o desenvolvimento de pesquisas climáticas (Kummerow et al., 1998).

Por se tratar de uma estimativa de chuva, estudos que validam a utilização do TRMM nas regiões nas diferentes regiões do mundo vêm sendo desenvolvidas (Paska et al., 2017; Ali et al., 2017; Pereira et al., 2013) e alguns outros estudos já utilizam os dados do TRMM para realizar o monitoramento das secas nas regiões com baixa densidade de dados pluviométricos (Tan et al., 2017; Santos et al., 2017a). No entanto, os estudos de análise e monitoramento espaço-temporal das secas, principalmente nas regiões semiáridas e áridas do Brasil, ainda são escassos. A Paraíba, estado situado no nordeste brasileiro, apesar de conter 80% do seu território contido no semiárido nordestino (Macedo et al., 2010), poucas vezes foi objeto de estudo de utilizando índices para analisar as secas (Farias et al., 2014).

A região semiárida da Paraíba sempre enfrentou períodos de secas ao longo dos últimos séculos e, nessa região, há uma necessidade premente de racionalização do uso dos recursos hídricos, agravado desde 2012 (Brasil Neto et al., 2017). A problemática da seca no Nordeste foi ainda mais acentuada nos últimos anos, culminando com a pior crise hídrica enfrentada por essa região no último século (AESAs, 2017). Com relação à utilização do TRMM para a região, Soares et al. (2016) avaliaram que as estimativas do produto 3B42V7 do TRMM, o mesmo utilizado nesta pesquisa, reproduzem bem o padrão espaço-temporal da precipitação na região e mostrou que os valores de correlação entre os dados pluviométricos e os dados do satélite apresentaram correspondência adequada.

2. OBJETIVOS

2.1.GERAL

O objetivo geral dessa pesquisa é realizar a caracterização espaço-temporal da seca sobre o estado da Paraíba utilizando o índice SPI ao longo de recentes 18 anos através de dados do satélite TRMM.

2.2.ESPECÍFICO

- Identificar as regiões com os maiores e os menores níveis pluviométricos e com as maiores e menores quantidades de dias secos em um ano;
- Caracterizar o comportamento anual e mensal da região estudada quanto à precipitação, à quantidade de dias secos e à porcentagem de eventos secos;
- Identificar regiões que tiveram comportamento semelhante, analisando as secas de curto-, médio- e longo-prazo e a análise de *clusters*;
- Identificar as regiões que foram afetadas por secas de curto-, médio- e longo-prazo, analisando eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos.

3. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

3.1.HIDROLOGIA E CICLO HIDROLÓGICO

Em função da disponibilidade dos recursos hídricos e das mudanças climáticas que atingem o no nosso planeta, há uma crescente necessidade em utilizar e preservar esses recursos de maneira cada vez mais eficiente, e é por esse motivo que a hidrologia é uma ciência em constante desenvolvimento. Segundo a *United States Federal Council of Science* (1962), a hidrologia é a ciência que trata da água da terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e suas reações com o meio ambiente, incluindo suas relações com a vida.

Percebe-se que a hidrologia é, portanto, uma ciência bastante complexa e que pode ser aplicada nas mais diversas áreas da engenharia, a exemplo da escolha de fontes de abastecimento de água, projeto e construção de obras hidráulicas, drenagem, irrigação, regularização de cursos de água, controle de inundações, navegação, preservação da vida aquática e aproveitamento hidroelétrico (Villela e Mattos, 1975).

Em todas essas áreas de aplicação da hidrologia, é muito importante ter conhecimento sobre os principais elementos desta ciência, quais sejam: natureza, origem, estado, comportamento e as ofertas da água e é por isso que é de suma importância entender o funcionamento do ciclo hidrológico (Silvia, 2015). Segundo Silveira (1993), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, balanceado apenas em escala global e impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra. A Figura 1 mostra o comportamento convencional do ciclo hidrológico da água.



Figura 1– Ciclo hidrológico da água (Fonte: USGS, 2017)

Percebe-se que a água presente nos corpos d’água evapora pela ação dos raios solares e também passa do estado líquido para o estado gasoso pelo processo de evapotranspiração dos animais e das plantas. O vapor é transportado e, sobre determinadas condições, é condensado formando as nuvens. A água retorna a superfície terrestre por meio da precipitação e nos continentes pode seguir diferentes caminhos, seja infiltrando no solo e formando aquíferos, seja pelo processo de evapotranspiração, ou seja pelo processo de escoamento até alcançar rios e oceanos (Aquafluxus, 2017). O ciclo hidrológico é, portanto, composto por quatro fases básicas, sendo elas a fase de precipitação, a evaporação e transpiração, o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo (Villela e Mattos, 1975).

Vale salientar que por mais que existam quatro fases bem definidas do ciclo hidrológico, nem sempre elas têm comportamento constante e contínuo ao longo do tempo, já que a água em cada uma das fases pode se movimentar de maneira bastante aleatória, variando consideravelmente no espaço e no tempo. Em função dessas variações, podem ocorrer eventos extremos de secas que representam o segundo maior desastre natural geográfico extensivo do planeta, atrás apenas das enchentes (Thomas et al., 2016).

São exatamente essas variações que devem ser estudadas e analisadas a fim de diminuir os efeitos danosos que esses extremos podem causar à população e ao meio ambiente. Nesse trabalho, prioriza-se o estudo da precipitação e das análises das secas, que serão tratadas com maior detalhamento nas próximas seções.

3.2.PRECIPITAÇÃO

Segundo Tucci (2001), a precipitação em hidrologia é entendida como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, precipitando em forma de neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve, por exemplo, diferenciando-se, dessa forma, apenas quanto ao estado em que a água se encontra.

Levando em consideração que a escassez de água é hoje uma grande ameaça em muitas partes do mundo e sendo a precipitação a principal componente de entrada de uma bacia hidrográfica (Santos et al., 2017b), uma compreensão abrangente da precipitação e sua distribuição espaço-temporal é essencial para o projeto correto e econômico de muitas estruturas de engenharia. A informação sobre a distribuição das chuvas é importante em uma variedade de aplicações, como no projeto de redes de pluviometria, na previsão hidrológica e na modelagem de bacias hidrográficas (Silva et al., 2015).

Portanto, admite-se que a precipitação é um importante fator climático e que identificar e medir padrões de ocorrência das chuvas traz subsídios imprescindíveis para o planejamento e operação de diversos setores da sociedade, como a agricultura, a pesca, a navegação, o abastecimento d'água, o controle e proteção contra inundações, a conservação dos ecossistemas e demais análises que envolvam o balanço hídrico de bacias hidrográficas e o regime de vazões de rios (Soares et al., 2016).

3.2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS CHUVAS

No presente estudo, a precipitação será tratada em forma de chuva, visto que não existe a ocorrência em forma de neve no estado da Paraíba e porque as outras formas de precipitação contribuem pouco para o regime hidrológico de uma região. Levando isso em consideração, vale à pena ressaltar que existem três tipos principais de precipitação e cada uma tem suas particularidades. A Figura 2 mostra o esquema ilustrativo do comportamento das precipitações convectivas, frontais e orográficas (Villela e Mattos, 1975; Tucci, 2001).

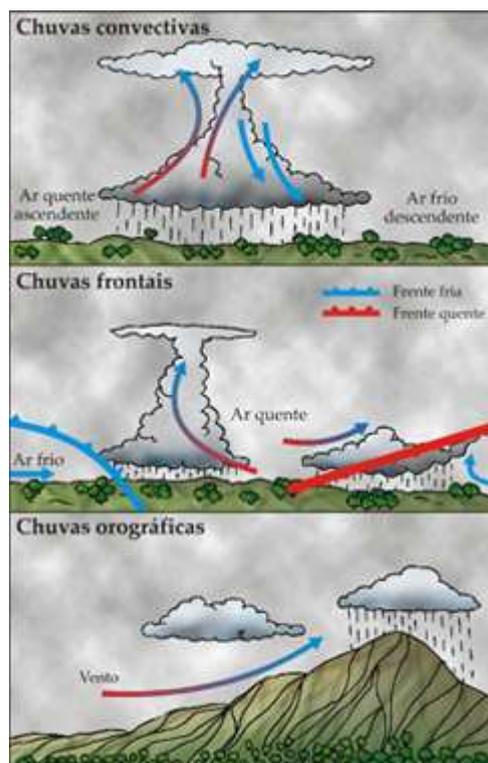


Figura 2– Representação esquemática dos tipos de precipitação (Fonte: Forsdyke, 1969)

As chuvas convectivas são típicas das regiões tropicais. O aquecimento desigual da superfície terrestre provoca o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera uma estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio instável. Se esse equilíbrio, por qualquer motivo (vento, superaquecimento), for quebrado, provoca uma ascensão brusca e violenta do ar menos denso, capaz de atingir grandes altitudes. As precipitações convectivas são de grande intensidade e curta duração, concentradas em pequenas áreas (chuvas de verão). (Aquafluxus, 2017; Villela e Mattos, 1975).

As chuvas ciclônicas (ou frontais) são aquelas causadas pelo encontro direto entre duas massas de ar, sendo uma fria e seca e a outra, quente e úmida. O ar frio, mais denso, tende a descer, enquanto o ar quente, menos denso, tende a subir. Quando essas duas massas de ar se encontram, o ar quente sobe para as camadas mais frias da atmosfera, onde ele perde temperatura e condensa-se, formando as chuvas. São precipitações de longa duração e de baixa intensidade, espalhando-se por vastas áreas. (Aquafluxus, 2017; Villela e Mattos, 1975).

E por fim, as chuvas orográficas, que também são chamadas de chuvas de relevo, por ocorrerem pela ação do relevo sobre o clima, que resultam da ascensão mecânica de correntes de ar úmido horizontal sobre barreiras naturais, tais como montanhas. Assim, a umidade satura

o ar ao redor da região, e em função disso, acontecem fortes índices de precipitação, que também podem ser chamados de chuvas torrenciais. (Aquafluxus, 2017; Villela e Mattos, 1975).

3.2.2. VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL

Apesar da existência da classificação para os tipos de chuva, as precipitações variam muito em se tratando do caráter espaço-temporal, e o conhecimento desse comportamento é importante para o planejamento de recursos hídricos e para estudos hidrológicos. (Villela e Mattos, 1975).

Espacialmente, percebe-se que a proximidade com as regiões tropicais resulta em altos níveis pluviométricos ao longo do tempo, e esses níveis tendem a cair na medida em que se afasta da linha do Equador. Temporalmente, a variabilidade tende a ser ainda maior e por tal motivo, tem-se que a ocorrência da precipitação é um processo muito aleatório e que não permite previsão com grande antecedência (Aquafluxus, 2017).

É em função dessa variação espaço-temporal que inúmeros estudos têm sido realizados para identificar a ocorrência de fenômenos extremos, como secas e cheias, e para entender o comportamento da precipitação ao longo do tempo, principalmente em regiões áridas e semiáridas, visto que nessas regiões, o maior problema não necessariamente é o déficit de chuva, mas sim, a alta variação da precipitação no tempo, no espaço, na intensidade e na duração (Farhangi et al., 2016).

Nesse sentido, diversos estudos visam entender o comportamento espaço-temporal da precipitação e de outros índices climáticos, no intuito de caracterizar de maneira mais eficiente cada região. Farhangi et al. (2016) analisaram o comportamento de 40 postos pluviométricos distribuídos em 10 sub-bacias no ocidente do Irã, região semiárida da Ásia, ao longo de mais de 26 anos. Do mesmo modo, Martino et al. (2013) estudaram o comportamento da variabilidade espaço-temporal da precipitação utilizando 400 postos pluviométricos ao longo de mais de 90 anos nos Estados Unidos.

Outro estudo envolvendo a análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação foi feito por Silva et al. (2015) no sul de Portugal, sendo utilizados oito postos pluviométricos para compor um estudo de 40 anos a respeito das tendências das chuvas e das vazões da região. Todos os estudos citados anteriormente confirmaram variabilidade espaço-temporal da precipitação nas regiões seja em escala anual, sazonal ou mensal.

No Brasil, Salvador e Santos (2010) analisaram a precipitação na cidade de São Paulo utilizando dados de uma estação meteorológica durante o período de 1961 até 2009 e comprovaram o crescimento do número de dias com chuvas intensas e do total anual de precipitação. Santos et al. (2009) analisaram as tendências da precipitação e de outros índices climáticos de 18 postos pluviométricos do estado do Ceará, região semiárida do nordeste brasileiro, ao longo de mais de 70 anos e também comprovou mudança no comportamento espaço-temporal da precipitação.

Em outro estudo, Santos e Freire (2012) analisaram o comportamento da precipitação das nove capitais do nordeste brasileiro de 1911 até 2012 e identificou periodicidade anual da precipitação em todas elas, além de desenvolverem uma análise de *cluster* com as séries estudadas. Percebe-se, portanto, que estudos que analisam a variabilidade espaço-temporal da precipitação são feitos no Brasil e no mundo para regiões com diferentes regimes hidrológicos e em diferentes períodos de tempo, e desse modo, contribuem na caracterização das regiões, auxiliam o processo de tomadas de decisões e contribuem para o desenvolvimento de estudos hidrológicos cada vez mais eficazes.

3.2.3. MEDIDAS PLUVIOMÉTRICAS

Para caracterizar e medir a precipitação de determinada região, são utilizadas grandezas características e aparelhos localizados em pontos previamente escolhidos. As grandezas características são altura pluviométrica, intensidade de precipitação e duração da mesma, cujas medições são feitas tradicionalmente por pluviômetros e por pluviógrafos (Tucci, 2001).

A altura pluviométrica é a espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo que água não infiltrasse, evaporasse ou escoasse para fora da região. A duração é o período de tempo durante o qual a chuva cai e a intensidade é a relação entre a altura pluviométrica e a duração da chuva (Tucci, 2001). Unidas, essas grandezas permitem a caracterização da precipitação em determinada região para um intervalo de tempo específico, e a partir delas, estudos hidrológicos complexos podem ser feitos.

Quanto aos aparelhos, as medições, são convencionalmente realizadas por pluviômetros e por pluviógrafos. Segundo Tucci (2001), os pluviômetros são os aparelhos que marcam a altura de chuva total acumulada em um dado período de tempo e são os aparelhos mais comumente utilizados. Os pluviógrafos, por sua vez, são aparelhos gráficos ou digitais que

registram automaticamente as variações de precipitação ao longo do tempo, sendo visitados periodicamente para manutenção e coleta de dados.

A utilização de pluviógrafos no Brasil é menos comum em função do custo necessário para a implantação desse tipo de equipamento, e por tal motivo, a rede hidrometeorológica nacional é composta na sua grande maioria por pluviômetros. No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) é responsável pelo monitoramento hidrometeorológico, operando 4.543 estações de monitoramento das 14.822 existentes em todo o país. Até o ano de 2007, existiam pouco mais de 8.000 estações pluviométricas no Brasil (ANA, 2017).

A Figura 3a mostra a distribuição espacial de todos os pluviômetros da ANA e de outras entidades reguladoras em 1910, enquanto a Figura 3b mostra a distribuição espacial dos pluviômetros em 2007 (ANA, 2007). Apesar do notório aumento da quantidade de pluviômetros desde a instalação inicial, percebe-se que a disposição espacial desses aparelhos é bastante irregular por todo o país, sendo as regiões norte e centro-oeste as que apresentam as menores quantidades de pluviômetros, se comparadas com as regiões nordeste, sudeste e sul. Percebe-se ainda que no Nordeste, há predomínio considerável de estações pluviométricas sob responsabilidade de outras entidades, que não a ANA. Na Paraíba, por exemplo, a Agência Executiva de Gestão de Águas (AESA) é a responsável pelo monitoramento dos 267 pluviômetros localizados nos limites do estado.

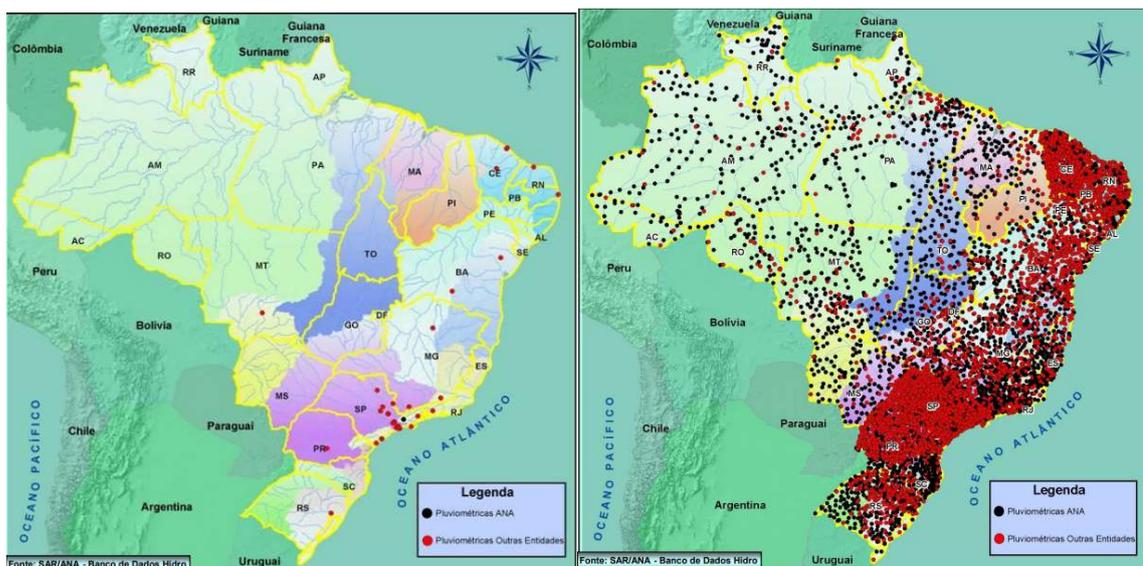


Figura 3– Distribuição espacial dos pluviômetros no Brasil em (a) 1910 e em (b) 2007.

(Fonte: SAR/ANA, 2017)

De qualquer maneira, vale à pena salientar que a quantidade de postos pluviométricos não necessariamente reflete a qualidade das séries históricas de precipitação. Isso porque, independente do aparelho e do operador que realiza a medição da precipitação, o importante é obter uma série de dados com boa qualidade ao longo dos anos e que seja consistente com o real comportamento da precipitação da região estudada. Leva-se em consideração que, apesar de que a realização da medição por pluviômetros seja uma técnica bastante tradicional e convencional, qualquer período está condicionado à ocorrência de falhas tanto em função do aparelho como em função dos operadores.

Preenchimentos indevidos de valores nas cadernetas, a falta de coleta de dados, a danificação do aparelho e o transbordamento dos pluviômetros são alguns dos possíveis erros que afetam a consistência dos dados e a qualidade das informações da série temporal. Em função disso, é necessária a aplicação de métodos de preenchimento de falhas que garantam que a série temporal dos pluviômetros possa ser utilizada para estudos hidrológicos sem maiores prejuízos.

Além disso, o Brasil, em se tratando de um país de dimensões continentais, apresenta uma vasta diversidade de regimes de precipitação. Segundo Rao et al. (2015), existem cinco diferentes regimes de precipitação no Brasil: Amazônia, Nordeste do Brasil, Centro Oeste do Brasil, Sudoeste do Brasil e Sul do Brasil e de fato, dados pluviométricos podem apresentar baixo grau de confiabilidade em áreas extensas no Brasil, uma vez que a distribuição dos pluviômetros não abrange todo o território (Pereira et al., 2013; Soares et al., 2016).

Outro fator crítico em relação à utilização de dados de pluviômetros é que esses aparelhos medem a chuva em um determinado local de forma pontual e não são capazes de capturar a distribuição espacial da chuva, especialmente em terrenos com topografia complexa (Varikoden et al., 2012; Wagner et al., 2012). Dessa forma, além das falhas de detecção de precipitação, podem ocorrer eventos chuvosos isolados sobre algum pluviômetro, influenciando por sua vez, na análise do escoamento superficial, do déficit hídrico e até no balanço de energia (Pereira et al., 2013).

Leva-se também em consideração que devido ao comportamento padrão das chuvas de apresentar variabilidade de pequenas escalas, são necessárias observações com frequência temporal e amostragem espacial que não são adequadamente atendidas a partir de medições de pluviômetros quando se tratam de regiões remotas, em desenvolvimento e de áreas oceânicas

(Huffman et al., 2007). Em função dessas limitações, estudos utilizando outros meios de medição de dados de precipitação vêm sendo cada vez mais intensificados e o desenvolvimento da medição da chuva por satélites de sensoriamento remoto vem ganhando espaço no Brasil e no mundo.

3.3.SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Moraes (2004), o sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. Ao longo dos últimos anos, a utilização desses sensores é uma ferramenta importante para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais.

O TIROS I (*Television Infrared Observation Satellite*) foi o primeiro satélite meteorológico lançado no mundo e representou um importante passo para o processo de previsões meteorológicas. Lançado a mais de 50 anos, admite-se que a partir do lançamento do TIROS I, passaram-se a ter melhores informações sobre as mudanças climáticas e maior precisão no processo de previsões meteorológicas, o que veio contribuir até para salvar vidas e propriedades. (NOAA, 2017).

Após o TIROS I, foram desenvolvidas, cada vez mais, técnicas de sensoriamento remoto que surgiram como uma alternativa para estimar precipitação, principalmente em função das limitações nas medições de chuva a partir de dados pluviométricos (Passos, 2013). Mais uma vez, chega-se ao fato crítico de que as estimativas de precipitação por pluviômetros têm influência local e, dessa forma, uma rede que não é densa e nem espacialmente bem distribuída, não captura completamente a variabilidade espacial da chuva e, em contrapartida, percebe-se que com o desenvolvimento da tecnologia ao passar dos anos, os satélites de sensoriamento remoto passam a ter resolução espaço-temporal cada vez mais detalhada e precisa.

Atualmente, existem vários satélites de sensoriamento remoto na órbita terrestre e cada um apresenta suas particularidades. Sob aspecto mundial, destaca-se por exemplo, a utilização do sistema GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que representa um conjunto de satélites em órbita geostacionária que chegam a fornecer observações globais a cada meia hora. Com um dispositivo de captação de imagens contendo cinco canais, a resolução

do canal visível do GOES é de 1 km, enquanto os canais infravermelhos têm resolução de 4 km, e o canal de vapor, tem resolução de 8 km (Allmetsat, 2017).

Ainda a nível mundial, o METEOSAT (*Meteorological Satellite*) representa a denominação de um conjunto de satélites geoestacionários operados pela EUMETSAT (*European Organization for Meteorological Sattelites*). O METEOSAT 8, por exemplo, apresenta 12 canais de captação com resolução mínima de 3 km, sendo capaz de obter imagens a cada 15 minutos (Allmetsat, 2017). O NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) representa outro conjunto de satélites que também tem grande importância no cenário mundial. Descrevendo órbitas polares, os satélites NOAA mais recentes são equipados com radiômetros AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), que permitem a varredura de uma faixa de 3000 km de largura (Allmetsat, 2017).

No Brasil, o Landsat, o SPOT (*Satellite Pour Observation de la Terre*) e o CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*) são alguns dos satélites mais utilizados para sensoriamento remoto da superfície terrestre (Epiphanyo, 2000). O Landsat 8, por exemplo, foi lançado em 2013 e é uma missão do programa Landsat capaz de gerar imagens com 15 metros de resolução espacial e faixa de coleta de 185 km. O SPOT 6, lançado em 2012, apresenta resolução espacial de 15 metros e faixa de coleta de 60 km, e o CBERS 4, lançado em 2014, é o primeiro da série totalmente construído no Brasil e que possui resolução espacial de 5 metros e faixa de coleta de 60 km (Engesat, 2017).

Mediante a diversidade de satélites disponíveis no mundo, neste estudo, fez-se o uso dos dados do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). O TRMM é um satélite de órbita polar e utilização recente que vem ganhando espaço no cenário mundial devido a sua boa resolução espaço-temporal e a sua adequabilidade de aplicação com regiões próximas aos trópicos (Kummerow et al., 1998).

3.4. TRMM

O TRMM é uma missão conjunta entre a agência espacial americana NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a agência espacial japonesa JAXA (*Japan Aerospace Exploration*) projetada para aumentar o entendimento a respeito da variabilidade da precipitação entre as regiões dos trópicos e estimular o desenvolvimento de pesquisas climáticas. Lançado em novembro de 1997, o TRMM foi a primeira missão dedicada a estudar a chuva tropical e subtropical, que representa a precipitação localizada entre as coordenadas de

latitude de 35°S e 35°N e constitui cerca de dois terços da precipitação total mundial (NASA, 2017).

Descrevendo uma órbita polar com uma inclinação de 35° com o Equador, o TRMM descrevia sua órbita inicialmente a 350 km de altitude e passou a ter altura de 403 km no ano de 2001. O satélite utiliza diversos instrumentos para detectar a chuva, incluindo radares, sensores de micro-ondas e sensores de luz. A Figura 4 mostra os principais instrumentos que compõem o TRMM.

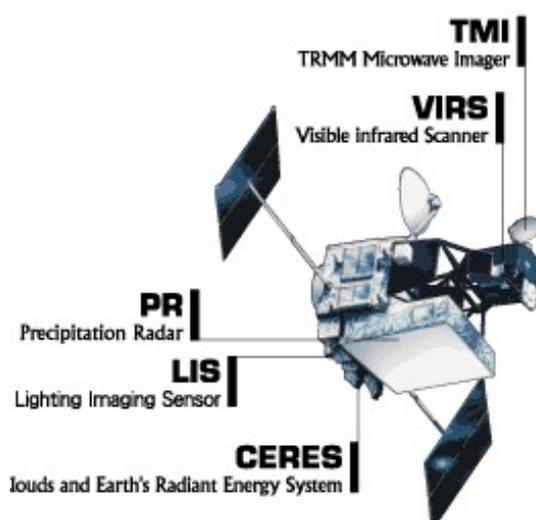


Figura 4— Instrumentos do satélite TRMM (Fonte: NASA, 2017)

Vale salientar que cada um dos instrumentos que compõem o satélite tem suas particularidades e sua devida importância para o produto final do TRMM. Desse modo, analisando e entendendo separadamente cada um dos instrumentos, têm-se que:

- VIRS (*Visible Infrared Radiometer*) é um radiômetro que opera em cinco diferentes canais (0.63, 1.6, 3.75, 10.8 e 12 μm), e que promove uma alta resolução nas observações das nuvens, captando informações a respeito da cobertura, do tipo e das temperaturas das nuvens;
- TMI (*TRMM Microwave Imager*) é um radiômetro de micro-ondas passivo que opera em cinco diferentes frequências (10.65, 19.35, 37.0, 85.5 e 22.235 GHz) e que fornece informações integradas sobre a coluna de precipitação, a nuvem líquida de água, a nuvem de gelo, a intensidade da chuva e os tipos de precipitação;

- PR (*Precipitation Radar*) é um radar de escaneamento eletrônico que opera na frequência de 13.8 GHz e que mensura a distribuição da precipitação tanto no oceano quanto na terra de maneira tridimensional;
- CERES (*Cloud and Earth Radiant Energy Sensor*) mede a energia no topo da atmosfera bem como estima os níveis de energia dentro da atmosfera e na superfície terrestre; e
- LIS (*Lightning Imaging Sensor*) é um sensor pequeno, mas altamente sofisticado que detecta e localiza os raios sobre a região tropical do globo terrestre.

Ainda a respeito do TRMM, vale salientar que os dados de precipitação estão disponíveis e sujeitos a uma variedade de níveis que denotam exatamente o nível de processamento sobre o qual os dados de entrada passaram. Quanto mais complexo o nível, maior é o tratamento ao qual foram submetidos os dados de entrada. O Quadro 1 mostra os níveis de processamento e suas respectivas definições.

Quadro 1– Níveis de processamento do satélite TRMM

Nível	Definição
Nível 0	Dados brutos obtidos por instrumentos
Nível 1A	Os dados obtidos por instrumentos reconstruídos e não processados em resolução total, referenciados temporalmente e anotados com informações auxiliares, incluindo coeficientes de calibração radiométrica e geométrica e parâmetros de georreferenciamento, computados e anexados, mas não aplicados, aos dados de Nível 0.
Nível 1B	Dados de Nível 1A radiograficamente corrigidos e geolocalizados que foram processados para unidades de sensores.
Nível 2	Parâmetros geofísicos derivados na mesma resolução e localização que os dados do Nível 1.
Nível 3	Parâmetros geofísicos que foram re-amostrados espacialmente e/ou temporariamente a partir dos dados de Nível 1 ou Nível 2.
Nível 4	Saídas ou resultados de modelos que utilizam dados de nível inferior como entradas e, portanto, não derivam diretamente dos instrumentos.

Fonte: NASA (2017)

A exceção dos dados com nível de processamento 4, todos os demais dados de precipitação estão disponíveis gratuitamente para o público e recentemente, uma vez que o

GPM (*Global Precipitation Measurement Mission*) foi lançado no ano de 2014, os produtos serão processados tanto pelo GPM quanto pelo satélite TRMM. A respeito dos produtos do satélite, sabe-se que existem diversos produtos oriundos do TRMM, e eles variam tanto em tipo, quanto em resolução espaço-temporal, assim conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2– Produtos do satélite TRMM

Produtos orbitais		Produtos em <i>grid</i>	
ID	Nome	ID	Nome
2A21	<i>Precipitation Radar (PR) Surface Cross-Section</i>	3B31	<i>Monthly 5° × 5° Combined Rainfall</i>
2A23	<i>Precipitation Radar (PR) Rain Characteristics</i>	3A46	<i>Monthly 1° × 1° SSM/I Rain</i>
2A25	<i>Precipitation Radar (PR) Rainfall Rate and Profile</i>	3B42	<i>3-hour 0.25° × 0.25° TRMM and Other-GPI Calibration Rainfall</i>
2B31	<i>Combined Rainfall Profile (PR, TMI)</i>	3B43	<i>Monthly 0.25° × 0.25° TRMM and Other Sources Rainfall</i>

Fonte: NASA, 2017

Recentemente, inúmeros estudos têm avaliado o comportamento dos produtos do satélite TRMM nas diferentes regiões do mundo, no intuito de validar a sua utilização e comprovar sua eficácia. Paska et al. (2017) estudaram o comportamento do TMPA (*TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis*) 3B42V7 na captura de precipitações extremas sobre a península da Malásia durante 16 anos (2000–2015). Os resultados mostraram que o produto utilizado obteve boas estimativas de precipitação a níveis mensais e anuais, mas, no que se refere à mensuração dos valores de precipitação extrema, foram encontrados baixos valores de correlação entre os dados do produto e os dados pluviométricos.

Em um outro estudo, Ali et al. (2017) analisaram o comportamento de três produtos do TMPA (3B42V6, 3B42RT e 3B42V7) na região do Paquistão utilizando diferentes escalas temporais (diário, mensal, sazonal e anual). Os resultados mostraram que os produtos do TMPA se comportaram melhor em escala mensal e anual, enquanto que em escala diária, apresentaram resultados insatisfatórios. De qualquer maneira, percebeu-se que apesar dos produtos serem incapazes de identificar eventos extremos de precipitação em escala diária e sazonal, o 3B42V7

foi o produto que apresentou os melhores resultados e pode ser utilizado como uma adequada alternativa para outras aplicações na região.

Em função da dificuldade de utilizar apenas dados pluviométricos para realizar o monitoramento de secas, especialmente em pequenas ilhas, Tan et al. (2017) estudaram a capacidade do TMPA 3B43 em monitorar a seca em Singapura, de 1998 até 2014. Os resultados mostraram que os valores de correlação encontrados entre o TMPA 3B43 e os dados pluviométricos foram satisfatórios na estimativa das secas e o produto obtido por sensoriamento remoto conseguiu descrever bem o comportamento das estações pluviométricas.

No Brasil, Pereira et al. (2013) avaliaram os dados de precipitação estimados pelo TMPA 3B43V6 ao longo de 13 anos, de 1998 até 2011. Utilizando postos pluviométricos distribuídos espacialmente por todo o país, os resultados mostraram que houve uma concordância considerável entre os dados observados e os dados estimados. Analisando o nordeste brasileiro de maneira mais específica, ao utilizar 64 postos pluviométricos, foi encontrada uma correlação de 98% entre os dados e notou-se também uma boa concordância em relação a correlação mensal da precipitação para todas as regiões.

No nordeste brasileiro, Silva et al. (2012) analisaram a distribuição espacial da precipitação estimada pelo produto 3B43V6 sobre o estado do Rio Grande do Norte, e comprovaram que, apesar de existirem algumas regiões nas quais as precipitações foram ora subestimadas, ora superestimadas, o produto 3B43V6 foi capaz de capturar de maneira eficaz a variabilidade espaço-temporal da precipitação na região.

Em outro estudo na região nordeste do Brasil, Soares et al. (2016) utilizaram o produto 3B42V7 do TRMM no intuito de avaliar a estimativa da precipitação sobre o estado da Paraíba. Utilizando 212 postos pluviométricos distribuídos espacialmente sobre a região e diferentes escalas temporais de resolução, os resultados mostraram que as estimativas do produto reproduzem o padrão espaço-temporal da precipitação no estado paraibano. Vale salientar também que as regiões com os maiores níveis pluviométricos tenderam a ter precipitação subestimada, enquanto as regiões com os menores níveis pluviométricos, precipitação superestimada. De qualquer modo, os valores de correlação encontrados foram bastante satisfatórios, principalmente quando avaliados em escala mensal.

Percebe-se, portanto, que a utilização dos produtos do TRMM vem ganhando cada vez mais espaço nas diferentes regiões do mundo, e os dados provenientes do satélite são capazes

de descrever, com uma boa concordância, o comportamento espaço-temporal da precipitação. Considerando que para realização de qualquer estudo hidrológico são necessários dados consistentes e que caracterizem bem o comportamento da precipitação na região, propõe-se com este estudo, analisar a seca sobre o estado da Paraíba, nordeste do Brasil, utilizando dados diários do produto 3B42V7 do TRMM para um período de 18 anos (1998–2015), no intuito de caracterizar e entender o comportamento desse fenômeno que afeta as regiões do planeta de maneira tão significativa e recorrente.

3.5. ANÁLISE DE SECA

É fato que o planeta está cada vez mais sujeito as mudanças climáticas, e essas mudanças, tendem a afetar cada região de maneira distinta. Em algumas regiões, há incidência de precipitações intensas que causam cheias, enquanto em outras, longos períodos de estiagens provocam secas severas que afetam consideravelmente as atividades humanas. Em se tratando da análise das secas, percebe-se ainda que, por mais que esse seja um fenômeno bastante recorrente e comumente estudado no mundo (Santos et al., 2017a; Wang et al., 2015), ainda há uma dificuldade de definir o que é a seca.

Segundo o *National Drought Mitigation Center*, a seca, no seu sentido mais geral, é um fenômeno que se origina de uma deficiência de precipitação durante um longo período de tempo, resultando em uma falta de água para algum setor de atividade, grupo ou meio ambiente. No entanto, em função da complexidade desse fenômeno, a seca não pode ser vista exclusivamente como um fenômeno físico, e por isso, também são utilizadas definições conceituais e operacionais para explicar o que é a seca (NDMC, 2017).

No seu sentido conceitual, a seca é entendida como um período prolongado de precipitação deficiente que resulta em danos extensivos às culturas, resultando em perda de rendimento. Essas definições conceituais podem, por exemplo, auxiliar o estabelecimento de políticas de seca que visam diminuir os efeitos danosos que esse fenômeno causa a população. As definições operacionais, por sua vez, contribuem na identificação do início, da severidade e do fim da seca. Contudo, em função da diversidade de condições que existem no nosso planeta, não existe uma única definição operacional de seca que se aplica para todos os casos, e é por isso que muitos estudiosos contam com índices matemáticos que auxiliam no processo de tomada de decisões de implementação de medidas de conservação da água ou resposta à seca (NDMC, 2017).

No intuito de entender melhor a seca, Wilhite e Glantz (1985) definiram quatro diferentes tipos de secas que se diferenciam entre si principalmente em função da abordagem dada ao tratar do fenômeno. As secas podem ser meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas, e enquanto as três primeiras definições estão mais relacionadas a quantificação da seca como fenômeno físico, as secas socioeconômicas estão mais ligadas ao efeito de suprimento e demanda da população e aos danos que isso pode causar.

A seca meteorológica é definida com base no grau de secura e na duração do período seco, quando comparados com a quantidade média de precipitação da região. Em função da alta variabilidade entre as regiões do planeta, essa definição deve ser considerada como específica de região para a região. Comparativos entre a precipitação atual e a precipitação média mensal, sazonal ou anual, por exemplo, podem ser utilizados para definição e identificação das secas meteorológicas (Hayes et al., 1999).

A seca agrícola, por sua vez, liga várias características da seca meteorológica aos impactos agrícolas, com foco na escassez de precipitação, diferenças entre evapotranspiração real e potencial, déficit de água do solo e níveis reduzidos de água subterrânea ou reservatório. Uma boa definição de seca agrícola deve ser capaz de explicar a susceptibilidade variável das culturas em diferentes estágios de desenvolvimento, desde o surgimento até a maturidade, auxiliando assim, o processo de tomadas de decisões da água quanto a agricultura (Nandintsetseg e Shinoda, 2013).

A seca hidrológica está relacionada com a redução dos níveis médios de água em reservatórios de superfície e subterrâneos por um determinado período de tempo, podendo ser de dias, semanas, meses ou anos sucessivos. A seca hidrológica geralmente acontece depois das secas meteorológicas e agrícolas e traz como consequências a redução de abastecimento de água nos centros urbanos, industriais, nos sistemas de irrigação e na produção de energia elétrica (Clausen e Pearson, 1995).

Por fim, a seca socioeconômica associa a oferta e a demanda de algum bem econômico com elementos de seca meteorológica, hidrológica e agrícola. Diferentemente das secas meteorológicas, agrícolas ou hidrológicas, ocorrência das secas socioeconômicas depende do tempo e do espaço dos processos de oferta e demanda da água e ocorre quando a demanda por um bem econômico excede a oferta como resultado de uma insuficiência climática no abastecimento de água.

Entende-se, portanto, que a seca é um fenômeno complexo que tem potencial para afetar significativamente a raça humana em diferentes aspectos, seja na geração de energia hidroeétrica, na agricultura, na sociedade, nos ecossistemas e nos recursos hídricos, por exemplo (Ionita et al., 2016). Além disso, segundo Thomas et al. (2016), as secas representam o segundo maior desastre natural geográfico extensivo do planeta, causando escassez prolongada em fontes de água atmosférica, superficial ou subterrânea. É exatamente em função dos danos que a seca causa que inúmeros índices têm sido desenvolvidos a fim de entender melhor o comportamento desse fenômeno e diminuir os prejuízos causados a raça humana.

Existem diversos índices que são capazes de não só realizar o monitoramento das secas, como também de realizar comparações das condições de água nas mais diversas partes do mundo. O PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) (Palmer, 1965), o SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration*) (Vicente-Serrano et al., 2010) e o SPI (*Standardized Precipitation Index*) (McKee et al., 1993) são alguns dos exemplos mais conhecidos e mundialmente utilizados, e cada um deles apresenta particularidades, vantagens e desvantagens.

O PDSI permite medir tanto valor úmidos quanto secos com base no conceito de oferta e demanda da equação do balanço hídrico, incorporando grandezas como precipitação prévia, umidade, escoamento e evaporação em sua metodologia. No entanto, leva-se em consideração que o índice PDSI apresenta uma escala temporal fixa (9 a 12 meses) e esse é um fator negativo e limitante da utilização do índice se comparado as demais estimativas de seca (SPEI, 2017).

O SPEI, por sua vez, considera as informações da evapotranspiração potencial e do efeito da umidade sobre a severidade das secas, permitindo que seja possível o monitoramento e análise das secas em diferentes escalas temporais e identificação dos impactos no contexto do aquecimento global. Além disso, assim como o PDSI, o SPEI pode medir a gravidade da seca de acordo com sua intensidade e duração e pode identificar os episódios de início e fim da seca. No entanto, em locais cujas medições de evapotranspiração e umidade são falhas, a utilização do índice passa a ser descartada (SPEI, 2017).

Esses índices foram utilizados nas políticas estaduais e federais como parâmetros que auxiliam a tomada de decisões sobre a adoção de planos para combater as implicações da seca em vários setores da sociedade (Rossato et al., 2017). De qualquer modo, Heim (2002) admite que é difícil de estabelecer um índice universal, mas, dentre os índices existentes, o SPI têm a vantagem de utilizar apenas os valores de precipitação para seu cálculo, permitir comparações

entre as mais diversas regiões do mundo e analisar as secas em diferentes escalas temporais. (WMO, 2012). É em função dessas vantagens, este estudo realiza análise das secas utilizando o índice SPI.

3.6.SPI

O SPI é o índice de seca padronizado e foi desenvolvido McKee et al. (1993), para quantificar o déficit de precipitação em múltiplas escalas temporais. Essas diferentes escalas temporais refletem o impacto da seca na disponibilidade dos diferentes recursos hídricos de determinada região. Utilizando apenas a precipitação como dado de entrada, o SPI é um índice normatizado e baseado na probabilidade de ocorrência de determinada precipitação em diferentes escalas temporais, e por tal motivo, é um índice de seca que além de versátil e simples, permite comparações entre as diferentes regiões do planeta e é capaz de fornecer alertas precoces quanto a situação e a severidade das secas que afetam determinada região (WMO, 2012).

Levando em consideração que o índice é calculado conforme uma distribuição de probabilidades cumulativas, o SPI permite a determinação da raridade de uma seca ou de um evento anormalmente úmido acontecer para uma específica escala temporal em qualquer região do mundo. O cálculo do SPI envolve um ajuste dos dados de precipitação em uma distribuição gama, que representa a melhor distribuição quanto à adequação com a precipitação.

Em seguida, visando a comparação entre as diferentes regiões do planeta, o índice tem seus valores normatizados através de uma condição de equiprobabilidade com a distribuição normal. Essa normatização dos valores de precipitação permite não só a comparação entre as diferentes regiões, como também faz com que tanto os períodos secos quanto úmidos sejam identificados, revelando mais uma vantagem do índice quanto ao monitoramento das secas.

A respeito da metodologia de cálculo do índice SPI, sabe-se também que o cálculo dos diferentes índices SPI (SPI-1, SPI-3, SPI-6, etc.) levam em consideração a precipitação de toda a série de determinada região para determinada escala temporal. Desse modo, quanto maior a série temporal, provavelmente maior a possibilidade de se obterem melhores resultados. Por outro lado, analisar uma série de dados recente, como é o caso dessa pesquisa, diminui as chances de incorporação de valores tendenciosos que venham a distorcer o resultado final.

Assim como dito anteriormente, McKee et al. (1993) desenvolveram o índice para calcular a variabilidade espaço-temporal da seca utilizando várias escalas temporais, podendo

ser calculados valores de SPI-1 até SPI-72 (WMO, 2012). Apesar do fato de que o método de cálculo para todos os índices seja o mesmo, cada índice SPI fornece uma interpretação distinta, enriquecendo as informações disponibilizadas mediante aplicação desse índice. As secas meteorológicas, por exemplo, estão intimamente ligadas aos valores dos índices SPI-1 e SPI-2. As secas agrícolas, por sua vez, estão mais relacionadas aos resultados dos índices SPI-1 a SPI-6 e em contrapartida, as secas hidrológicas e suas aplicações estão mais interligadas aos índices SPI-6 ao SPI-24.

Analisando os principais índices SPI, o SPI-1, por exemplo, é uma representação mais precisa de precipitação mensal porque a distribuição foi normalizada. O SPI-1 de abril de um determinado ano, compara a precipitação total para abril, nesse ano, com as precipitações totais de abril de todos os anos no registro, e daí, classifica-se o determinado evento como seco ou úmido. O SPI-1, portanto, reflete as condições de curto-prazo e a sua aplicação pode ser relacionada intimamente com secas meteorológicas, com a umidade do solo e com o estresse das culturas (WMO, 2012).

O SPI-3, por sua vez, proporciona uma comparação da precipitação ao longo de um determinado período de três meses com os totais de precipitação, a partir do mesmo período, de três meses para todos os anos incluídos no registro histórico. Calcular o SPI-3 de abril, significa comparar a precipitação total de fevereiro, março e abril, de determinado ano, com as precipitações totais acumuladas de fevereiro, março e abril de todos os anos. O SPI-3 reflete as condições de umidade de curto- e médio-prazo e fornece uma estimativa sazonal de precipitação (WMO, 2012).

Analogamente ao SPI-1 e ao SPI-3, o SPI-6 compara a precipitação ao longo de determinado período de seis meses e indica as tendências de médio-prazo na precipitação sazonal, sendo considerado mais sensível do que o Índice Palmer às condições a esta escala. Além disso, dá uma boa indicação da quantidade de precipitação que caiu durante a estação chuvosa, por exemplo, o que é muito importante para certas localidades do mundo que tem maior relação de necessidade com seus recursos hídricos (WMO, 2012).

Valores de SPI-9 abaixo de $-1,5$ por sua vez, é geralmente uma boa indicação de que a seca terá um impacto significativo na agricultura e pode estar afetando outros setores também. O período de nove meses começa a indicar uma seca sazonal de curto-prazo às quais podem se tornar secas hidrológicas de longo-prazo, ou multianual. Os valores do SPI-9 estão

provavelmente vinculados a vazões, níveis de reservatórios e níveis de águas subterrâneas, assim como os índices SPI nas escalas de tempo mais longas (WMO, 2012).

Por fim, analisando os valores de SPI-12 ou mais longos, têm-se que esses valores refletem os padrões de precipitação de longo-prazo. O SPI-12 é uma comparação da precipitação durante 12 meses consecutivos com o registrado nos mesmos 12 meses consecutivos em todos os anos anteriores de dados disponíveis. Estes prazos são o resultado acumulado de períodos mais curtos que podem estar acima ou abaixo do normal. Nos SPIs mais longos (SPI-24 e SPI-48), a oscilação dos valores SPI indicam que uma tendência úmida ou seca está ocorrendo e estes prazos são geralmente vinculados a vazões, níveis de reservatórios e níveis de águas subterrâneas (WMO, 2012).

Em função das diversas vantagens e da fácil aplicação e interpretação do índice SPI, diversos estudos têm sido feitos utilizando esse índice para realizar o monitoramento das secas nas mais diversas regiões do mundo. Wambua et al. (2015) estudaram o comportamento espaço-temporal da seca e de suas tendências no alto da bacia do Rio Tana, Quênia. Utilizando dados pluviométricos mensais de oito postos pluviométricos ao longo de 40 anos (1970–2010), os resultados mostraram que as regiões localizadas em menores altitudes e em áreas áridas e semiáridas foram mais vulneráveis à seca do que outras áreas que apresentavam outras condições de topografia e clima.

Na região da Índia, Thomas et al. (2016) analisaram a vulnerabilidade da seca na bacia de Bearma, na região de Bundelkhand, área frequentemente afetada por extremos climáticos. Analisando dados de cinco postos pluviométricos com no mínimo 33 anos de dados, os resultados indicaram que, ao aplicar os índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 e SPI-12 e calcular suas frequências, durações e intensidades, secas extremas e severas atingiram a região de maneira significativa e a utilização conjunta do SPI com outras aplicações permitiu uma boa caracterização de zonas vulneráveis à seca.

No Paquistão, Ashraf e Routray (2015) avaliaram o comportamento espaço-temporal da precipitação e das secas na província do Baloquistão. Utilizando dados 23 de postos pluviométricos ao longo de 36 anos (1975–2010), os resultados mostraram que a região apresenta uma grande variabilidade de precipitação, tendo sido algumas áreas mais afetadas por secas extremas e severas, enquanto outras foram frequentemente mais atingidas por secas moderadas e suaves. Além do mais, os estudos envolvendo o índice SPI nessa região auxiliaram

não só na identificação de regiões mais propensas às secas, como também na identificação dos períodos que essa seca poderia acontecer.

Na Paraíba, Macedo et al. (2010) estudaram o comportamento da seca ao longo de 36 anos (1965–2000) aplicando os índices SPI-12 e SPI-24 sobre as séries de 49 postos pluviométricos distribuídos pelo estado. Os resultados indicaram que foram detectadas 24 secas severas pelo SPI-12 e cinco secas extremas pelo SPI-24, confirmando a variabilidade da chuva, principalmente na região semiárida. Além do mais, mediante análise temporal da seca, estimou-se que as secas mais severas foram possivelmente intensificadas devido à ação do El Niño.

Um outro estudo foi feito na região paraibana por Farias et al. (2014), que analisaram a seca sobre o município de Taperoá, utilizando os índices SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 e SPI-24 para monitorar a seca do município ao longo de um período de 50 anos (1963–2013). Os resultados mostraram que as secas severas e extremas aconteceram principalmente durante as décadas de 80 e 90, e também comprovaram a grande variabilidade das séries temporais no semiárido paraibano.

Ainda sobre a análise de secas no estado da Paraíba, Brasil Neto et al. (2017) afirmaram que a região semiárida do estado vem enfrentando períodos de secas ao longo dos últimos anos. Segundo o estudo, as secas extremas no ano de 2015 afetaram consideravelmente as principais cidades do estado e, portanto, há uma necessidade premente de racionalização do uso dos recursos hídricos, agravado desde 2012.

Mediante ao que foi exposto, percebe-se a utilidade e a versatilidade em se utilizar o índice SPI para monitorar as secas em diferentes escalas temporais e em qualquer região do mundo. No entanto, é notório que ainda existe uma limitação em caracterizar completamente a seca, seja em função da baixa quantidade e má distribuição dos postos pluviométricos espalhados sobre cada região, seja pelo fato de que apenas alguns índices SPI são calculados na maioria dos estudos, ou seja pela dificuldade de interpretação dos resultados provenientes da utilização do SPI.

Em função dessas limitações, o presente estudo utiliza 187 séries de precipitação diárias contínuas e igualmente distribuídas ao longo de 18 anos (1998–2015), tendo cada uma das séries mais do que 6000 registros de precipitações diárias. Além do mais, diferentemente dos estudos apresentados previamente, são utilizados oito diferentes índices SPI para todas as 187

séries utilizadas, o que permite uma caracterização espaço-temporal das secas de curto-, médio- e longo-prazo.

Por fim, assim como feito por Santos et al. (2017) na Sub-Bacia 40, localizada no Alto São Francisco, uma classificação alternativa é utilizada para caracterizar a seca, identificando as regiões do estado da Paraíba que foram ou não atingidas por secas de curto-, médio- e longo-prazo em função dos eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos.

4. METODOLOGIA

4.1.ÁREA DE ESTUDO

O estado da Paraíba tem área total de 56.469,778 km² e está dividido em quatro mesorregiões, sendo elas: Agreste Paraibano, Borborema, Mata Paraibana e Sertão Paraibano (Figura 5). Além disso, a Paraíba representa a nona economia da região nordeste e a décima nona no Brasil, com uma população estimada de mais de 4 milhões de habitantes para o ano de 2017 (IBGE, 2017).

Quanto ao relevo, apresenta vasta diversificação, variando desde planícies no litoral a depressões no Sertão. Na região litorânea, o clima é classificado como tropical úmido, com temperaturas médias em torno de 24°C, e duas estações, uma seca no verão e outra chuvosa no outono e no inverno, e precipitação média anual de 1.400 mm (IBGE, 2017).

Mais para o interior, após a serra da Borborema, o clima abundante é o semiárido, caracterizado pelas chuvas escassas e irregulares, com baixa pluviosidade, que por vezes é inferior aos 500 mm por ano. Cabaceiras, na região da Borborema, possui o título de município mais seco do país, com pluviometria média anual inferior a 300 mm (IBGE, 2017).

A vegetação do estado é tal como o clima, variada conforme o relevo. Na região litorânea, a cobertura vegetal é formada pelos tabuleiros com abundância de arbustos e gramíneas. No Sertão, especialmente após a formação do Planalto da Borborema, a formação vegetal mais abundante é a caatinga, formada por algumas espécies de árvores, como a baraúna e arbustos (IBGE, 2017).

Assim, em função da metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, a área de estudo é convencionalmente definida como sendo o retângulo que envolve o estado da Paraíba, definido pelas coordenadas $-38,875^{\circ}\text{O}$ a $-34,625^{\circ}\text{O}$ e $-5,875^{\circ}\text{S}$ a $-8,625^{\circ}\text{S}$, assim conforme mostrado na Figura 5.

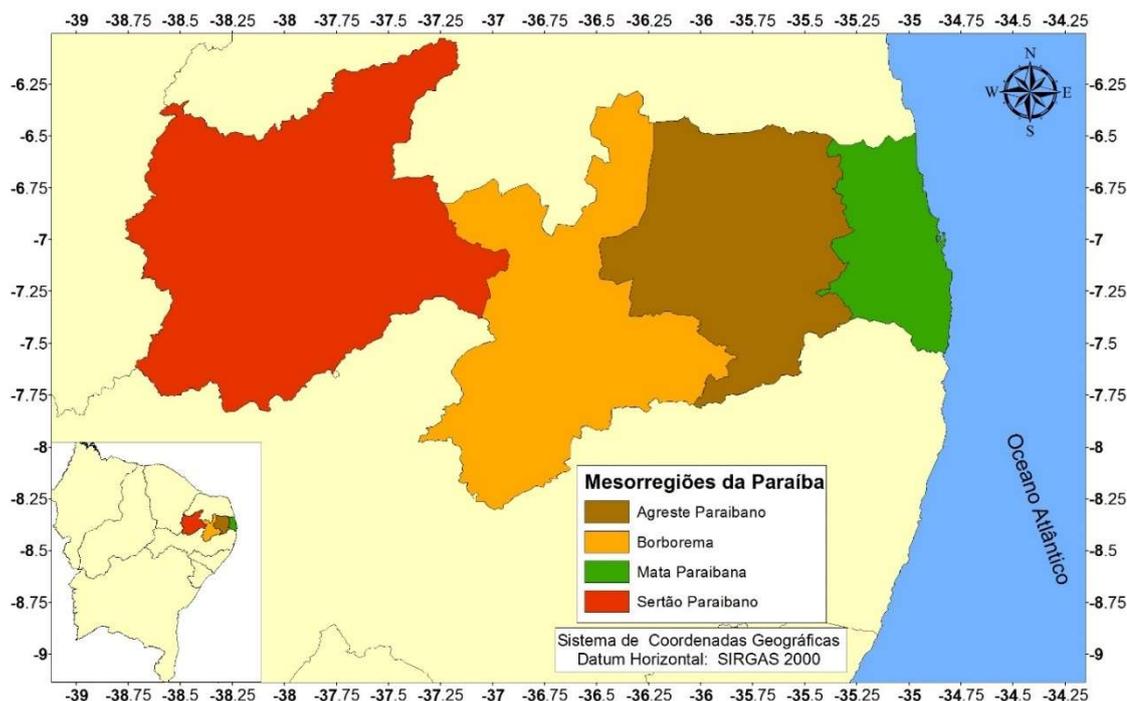


Figura 5– Localização geográfica e representação das mesorregiões da Paraíba

4.2. TRMM

Os dados referentes à precipitação da área de estudo foram obtidos através do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) da NASA, algoritmo 3B42 (versão 7) que coleta informações sobre o clima das regiões tropicais e subtropicais (Nóbrega et al., 2008; Pereira et al., 2013; Soares et al., 2016).

Como o funcionamento do satélite é recente (final do ano 1997), é impossível trabalhar com séries de dados mais longas. Em virtude disso, obteve-se uma série de dados diários de precipitação de recentes 18 anos, 01 de janeiro de 1998 a 31 de dezembro de 2015. Ainda sobre a utilização do satélite TRMM, visto que os dados obtidos não são pontuais, como seria o caso na utilização de postos pluviométricos, foi criada uma grade com 187 quadrículas equidistantes a cada $0,25^\circ$ (centroídes), formando dessa forma 187 quadrículas sobre a área a ser estudada. A grade composta para análise dos dados TRMM compreende uma matriz de 11×17 com 187 células, onde está inserido o estado da Paraíba, assim como mostrado na Figura 6.

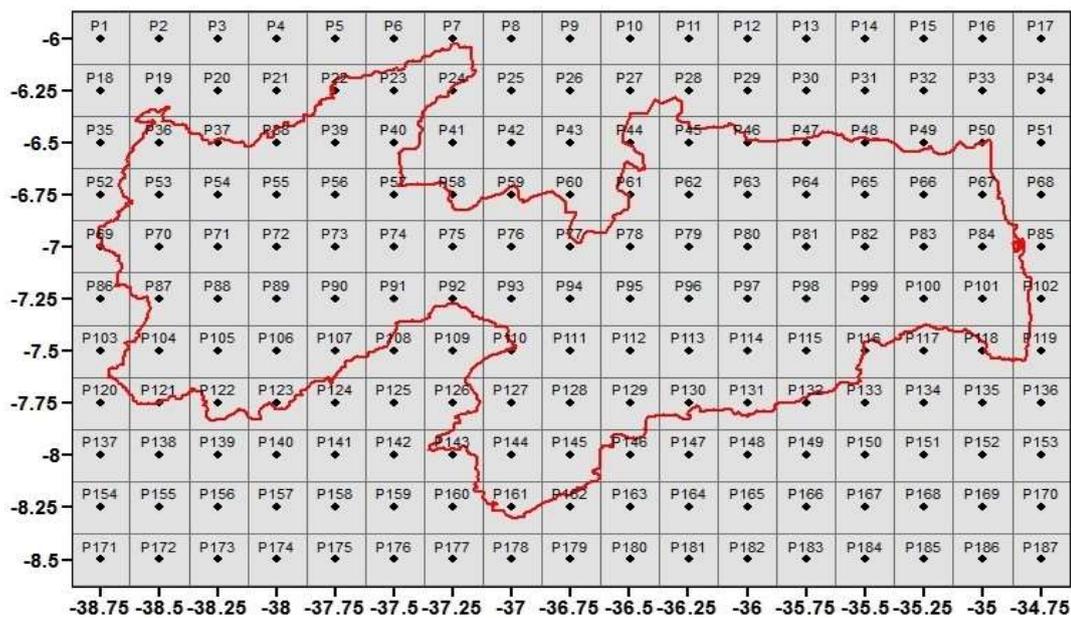


Figura 6– Grade TRMM sobre o estado da Paraíba

4.3.SPI

Os índices SPI foram gerados através de um *software*, disponibilizado gratuitamente pelo site <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>. O SPI foi formulado por Tom Mckee, Nolan Doesken e John Kleist do *Colorado Climate Center*, em 1993.

O cálculo do SPI para a área de estudo baseou-se nas precipitações mensais de 1998 a 2015, compreendendo um período de 18 anos. Estes dados de precipitação foram organizados em uma distribuição de probabilidade gama, e em seguida, foi transformada em uma distribuição normal padrão. Os valores positivos do SPI indicam que a precipitação foi maior que a precipitação média e vice-versa.

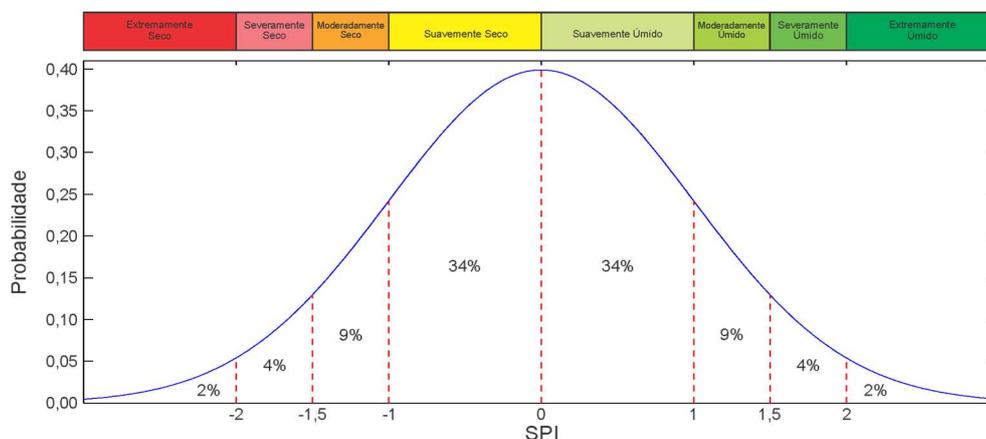


Figura 7– Classificação SPI e sua relação com a curva normal

A Figura 7 representa a relação entre a classificação SPI com a curva normal. A intensidade implícita por cada etiqueta corresponde ao grau de remoção de condições médias (isto é, a SPI = 0). As percentagens impressas dentro das regiões delimitadas pelas linhas tracejadas indicam a probabilidade dos valores SPI caírem no âmbito daquela região; probabilidades cumulativas globais exigem soma das probabilidades de um dado SPI de interesse através de uma cauda da curva. Por exemplo, os valores de SPI de -1,5 ou inferior ocorre em apenas seis por cento (2% + 4%) dos casos. A soma de todos os valores indicados é um pouco menor que 100% devido ao arredondamento.

Neste estudo, a precipitação total para a estação de interesse e escala de tempo está definido para a distribuição Gama como:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \text{ para } x > 0 \quad (1)$$

em que α e β são os parâmetros positivos que representam a forma da distribuição, x é a quantidade de precipitação ($x > 0$), e $\Gamma(\alpha)$ é a função gama.

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

Os parâmetros desconhecidos α e β são estimados como sugerido por Edwards e McKee (1997), utilizando a aproximação de Thom (1966) para o máximo de probabilidade para cada estação, cada escala temporal de interesse (3, 6, 9, 12 meses, etc) e cada mês do ano, como segue:

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

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

onde,

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (5)$$

n é o número de observações de precipitação, \bar{x} é a precipitação média ao longo da escala de tempo de interesse, e A é uma medida da assimetria de distribuição (Husak et al., 2007). A probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observada para um período e escala de tempo de interesse é calculada usando os parâmetros estimados como:

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}}\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (6)$$

Substituindo t por $x/\hat{\beta}$, esta equação torna-se a função Gama incompleta.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

Uma vez que a função Gama não está definida para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa se torna:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (8)$$

em que q é a probabilidade de um zero. Seja m o número de zeros na série de precipitação, então q pode ser estimada por m/n (Thom, 1966). Finalmente, a probabilidade cumulativa $H(x)$ é transformada na variável Z padrão normal com média zero e variância de um, que é o valor do índice SPI.

Uma conversão aproximada sugerida por Abramowitz e Stegun (1965) que converte a probabilidade cumulativa para a variável Z normal padrão foi utilizada neste trabalho:

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

$$Z = SPI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad 0,5 < H(x) < 1,0 \quad (10)$$

onde

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

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad 0,5 < H(x) \leq 1,0 \quad (12)$$

$c_0=2,515517$, $d_1=1,432788$, $c_1=0,802853$, $d_2=0,189269$, $c_2=0,010328$, e $d_3=0,001308$.

Para este estudo, foi definido que a classe próxima ao normal, i.e. $SPI = 0$, seria formada por duas classes: $-1.0 \leq SPI \leq 0.0$ (suavemente seco) e $0.0 < SPI \leq 1.0$ (suavemente úmido). Além disso, de acordo com o valor Z obtido, um evento pode ser classificado como seco por valores inferiores ou iguais a zero e úmido para valores positivos, e como suave ($0,0 < |SPI| \leq 1,0$), moderado ($1,0 < |SPI| \leq 1,5$), severo ($1,5 < |SPI| \leq 2,0$) e extremo ($2,0 < |SPI| \leq 3,0$).

4.4. ANÁLISE DE CLUSTER

Em função da quantidade de dados a serem analisados no presente estudo, utilizou-se o processo de análise de *cluster* no intuito de agrupar as regiões com base em alguma variável estatística. A análise de *cluster* é um método utilizado para identificação de grupos homogêneos de objetos chamados *clusters* e que tem o objetivo de identificar grupos com similaridades entre si. Para realizar a análise de *cluster*, a maioria dos métodos calcula uma medida de distância de similaridade para estimar a distância entre pares de objetos (Mooi e Sarstedt, 2010).

Neste estudo foi utilizado o processo de agrupamento das 187 séries de SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48 através da correlação existente entre as séries. Existem diversos outros métodos de agrupamento, por exemplo agrupamento por distância euclidiana, *cityblocks* e *Spearman*. No entanto, para atender ao propósito do trabalho, adotou-se o processo de agrupamento por correlação visto que a intenção deste estudo é analisar e identificar o comportamento espaço-temporal da seca, e no caso, a informação do comportamento das séries em si é mais importante do que suas médias, por exemplo.

Além disso, uma maneira comum de visualizar o progresso da análise de *cluster* é pelo desenho de um dendrograma, o qual exhibe o nível de distância entre uma combinação de objetos e *clusters*. Neste estudo, além de realizar o agrupamento das séries utilizando a correlação como parâmetro estatístico e identificar os *clusters* formados, também foram especializados os grupos homogêneos quanto ao comportamento da seca sobre todo o estado da Paraíba. Inúmeros são os exemplos de utilização dessa técnica para as diferentes regiões do Brasil (Santos et al., 2017a; Passos, 2013; Costa, 2017; Costa et al., 2017; Teodoro et al., 2016; Lyra et al., 2014; Lyra et al., 2006).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. VALIDAÇÃO DO TRMM

Uma vez que a rede de pluviômetros comumente apresenta uma má distribuição espacial e muitas falhas em suas séries históricas, dados do TRMM foram usados. Entretanto, com o objetivo de realizar uma validação entre os dados TRMM e os dados de pluviômetros, foi feita uma análise espacial da distribuição dos postos pluviométricos e da correlação entre os dados mensais do TRMM e dos pluviômetros, uma vez que para o cálculo de SPI, são utilizados totais mensais de precipitação.

A partir das coordenadas geográficas e das séries históricas de 267 postos pluviométricos no estado da Paraíba para o período de 1998 a 2015, foi realizada uma comparação entre valores de precipitação mensal de cada ponto de grade do TRMM com o valor médio dos dados observados nos pluviômetros localizados em cada *grid*, como feito por Nicholson et al. (2003) para o Oeste da África. A Figura 8 mostra a localização dos postos pluviométricos da Paraíba, cuja cor representa o percentual de falhas nas séries temporal daquele posto, e a distribuição espacial do coeficiente de correlação entre os dados de precipitação mensais do TRMM e a média dos totais mensais dos pluviômetros localizados no respectivo *grid*, desconsiderando as falhas, para o período de 1998 a 2015.

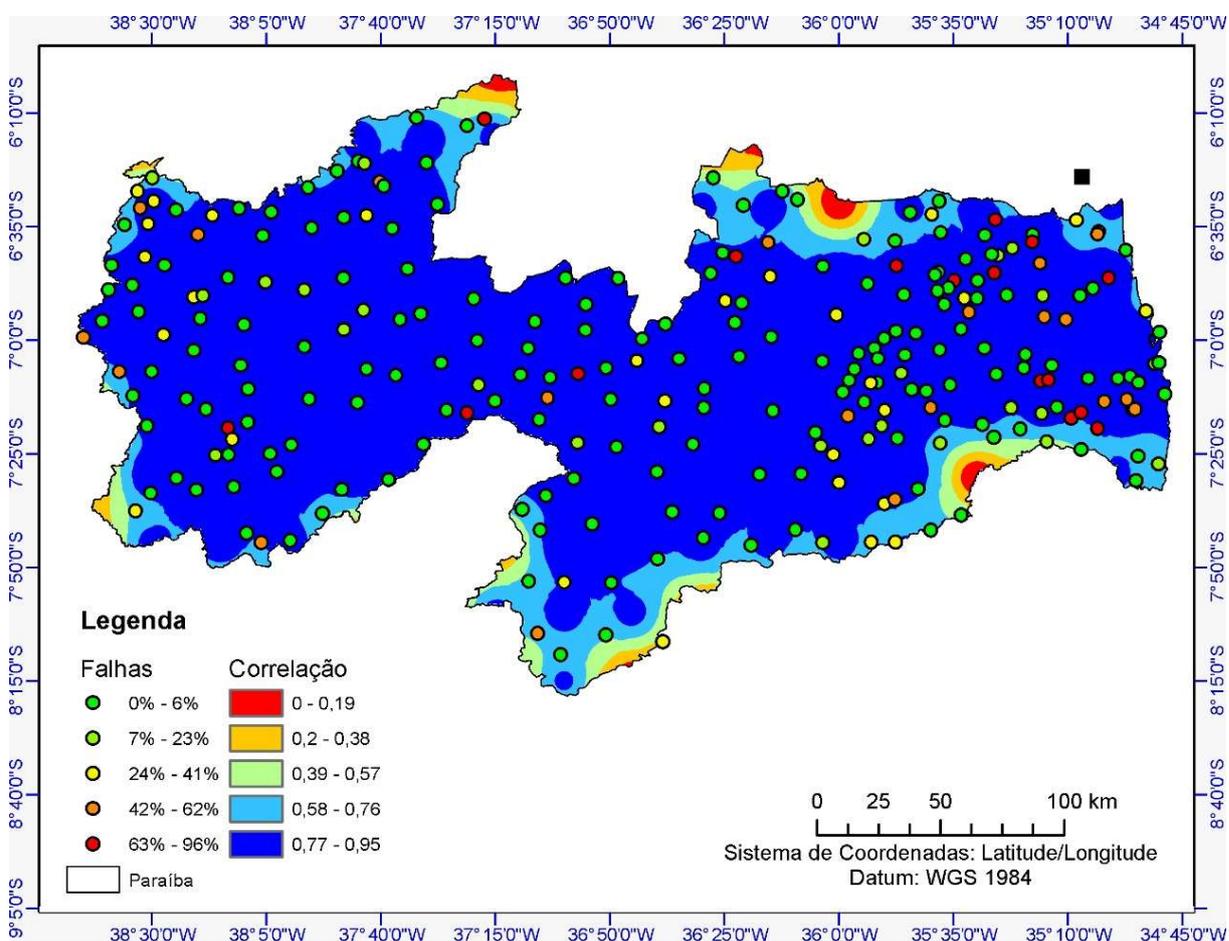


Figura 8– Localização dos postos pluviométricos e distribuição espacial do coeficiente de correlação entre os dados de precipitação mensais do TRMM e a média dos totais mensais dos pluviômetros no *grid* sobre o estado da Paraíba (1998–2015)

A partir da Figura 8, percebe-se pela distribuição espacial dos postos pluviométricos no estado da Paraíba que algumas áreas chegam a ter mais do que oito pluviômetros por *grid*, enquanto que outras regiões possuem apenas um único pluviômetro por *grid*. As mesorregiões

da Mata Paraibana e do Agreste são as que apresentam a melhor densidade de postos pluviométricos, enquanto que as regiões do Sertão e da Borborema têm a maior deficiência em relação à quantidade de postos pluviométricos.

Além do mais, percebe-se que a Mata Paraibana, por exemplo, apesar de apresentar uma das maiores concentrações de pluviômetros do estado, também apresenta pluviômetros com uma maior quantidade de falhas mensais. A falha média mensal em algumas regiões é de cerca de 30% e isso significa que dentro dos 216 meses possíveis (1998–2015), em cerca de 60 meses não existiam dados de precipitação em nenhum dos pluviômetros contidos em um mesmo *grid*. A situação se repete nas outras mesorregiões da Paraíba, que também apresentam quantidade significativa de falhas, evidenciando a má distribuição de pluviômetros no estado da Paraíba e a presença de várias séries com falhas ao longo do período analisado.

A Figura 8 também apresenta a distribuição das correlações entre os dados mensais de pluviômetros e os dados TRMM, pela qual se percebe que basicamente toda a Paraíba apresentou níveis de correlação significantes, superiores a 0,77 sobre basicamente todo o estado. Considerando a média dos valores mensais de todos os pluviômetros contidos em cada um dos 187 *grids*, calculou-se a correlação com os valores obtidos para o TRMM, desconsiderando-se as falhas existentes, e percebeu-se que no litoral paraibano, os valores do coeficiente de correlação foram um pouco inferiores, se comparados com os valores encontrados no interior do estado, mas, de qualquer maneira, a ordem de grandeza dos valores de correlação foi superior a 0.80 em basicamente toda a Paraíba.

Assim, pode-se observar que os dados TRMM ao longo do período estudado representam bem o comportamento das alturas pluviométricas ocorridas sobre todo o estado da Paraíba medidas por pluviômetros. De acordo com estudos realizados por Soares et al. (2016), sabe-se que quanto maior a escala temporal utilizada, maior a correlação encontrada entre os dados do TRMM e dos pluviômetros no estado da Paraíba. O mesmo fato foi observado no presente estudo, percebendo-se bastante similaridade entre os resultados encontrados e os de Soares et al. (2016), assim como mostrado pela Figura 8.

No intuito de realizar uma comparação a nível diário e validar o estudo sobre dias secos e úmidos, calculou-se o grau de correspondência diária entre o satélite TRMM e a média ao classificar um dia como seco ou úmido para cada *grid* com base no valor dos totais pluviométricos diários, desconsiderando as falhas. Em outras palavras, levando em conta a

definição de dias secos e úmidos, determinou-se quantas vezes as leituras entre o TRMM e as médias dos totais diários dos pluviômetros foram equivalentes, i.e., quando o TRMM e quando os dados dos pluviômetros foram, em ambos os casos, ou secos ou úmidos, e a esse valor, deu-se o nome de valor de correspondência diária.

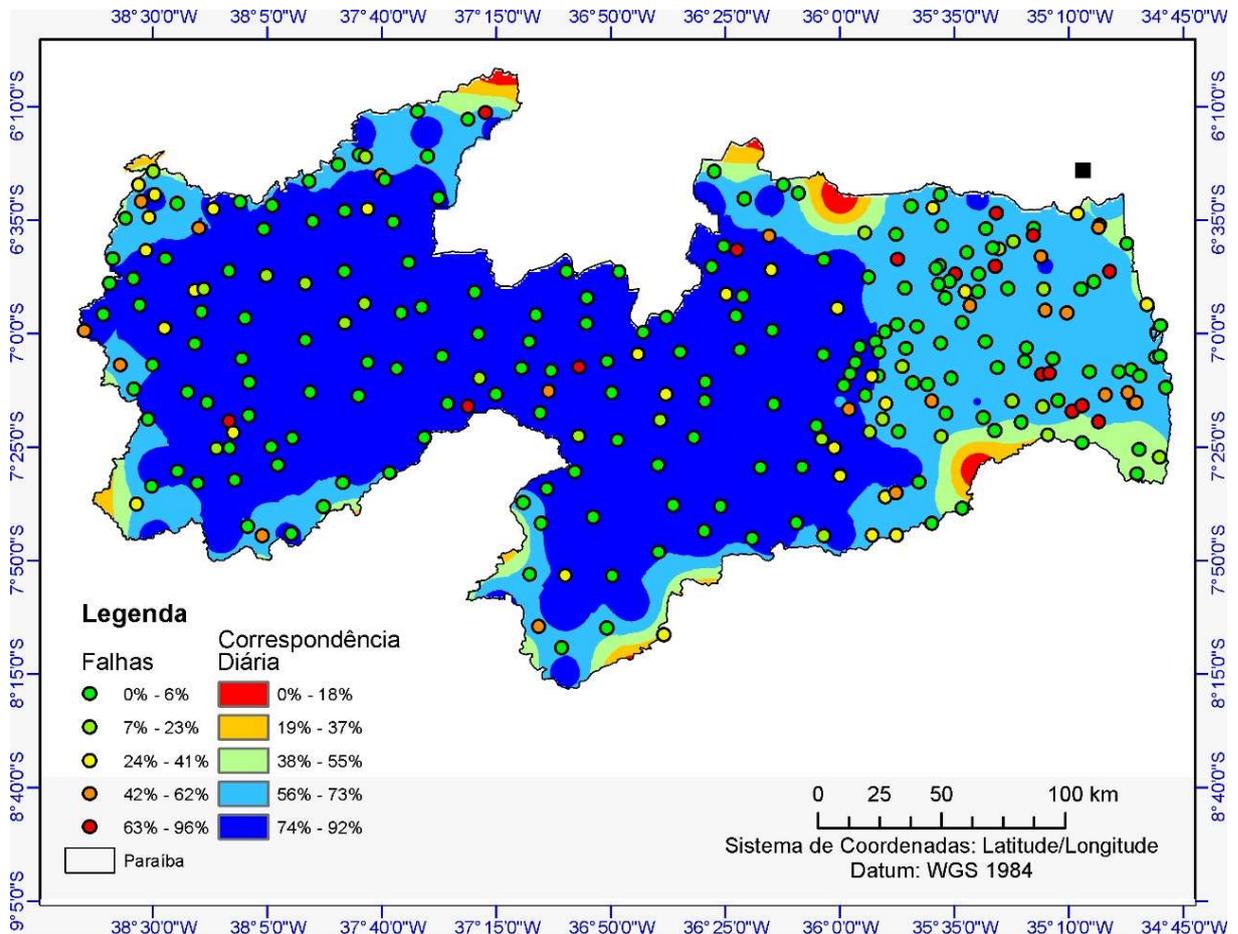


Figura 9– Distribuição espacial do coeficiente de correspondência diária sobre a Paraíba (1998–2015)

A Figura 9 mostra a distribuição espacial do coeficiente de correspondência diária sobre a Paraíba de 1998 a 2015. A partir da Figura 9, percebe-se que apesar de que os valores correspondências diárias não tenham sido tão altos se comparados com os valores de correlação obtidos a nível mensal, o coeficiente de correspondência diária ainda assim apresentou níveis satisfatórios por todo o estado.

Na região da Borborema e do Sertão, por exemplo, a média dos valores encontrados foi de 85%. Isso significa que, dentro das 6574 leituras diárias possíveis (1998–2015), em mais do

que 5500 leituras houve equivalência entre os dados do TRMM e dos pluviômetros em caracterizar o determinado dia como seco ou úmido.

Na região do Agreste e na Zona da Mata, houve uma diminuição em relação a esse coeficiente, mas de qualquer maneira, os valores encontrados indicam que em mais de cerca de 70% houve equivalência entre as leituras. Leva-se em consideração que os resultados encontrados são bastante semelhantes ao encontrados por Soares et al. (2016), e que, portanto, valida-se a utilização dos dados TRMM para cálculo do índice SPI e da quantidade de dias secos e úmidos.

5.2. TRMM

Analisando a distribuição espaço-temporal da precipitação sobre a região estudada, fez-se a análise da série temporal de precipitação de cada uma das 187 quadrículas da grade TRMM, totalizando 6574 dados diários ao longo dos 18 anos em análise para cada quadrícula. Calculando a precipitação anual acumulada para cada uma das séries analisadas, a Figura 10 mostra a evolução da precipitação anual sobre o estado da Paraíba nos 18 anos em estudo.

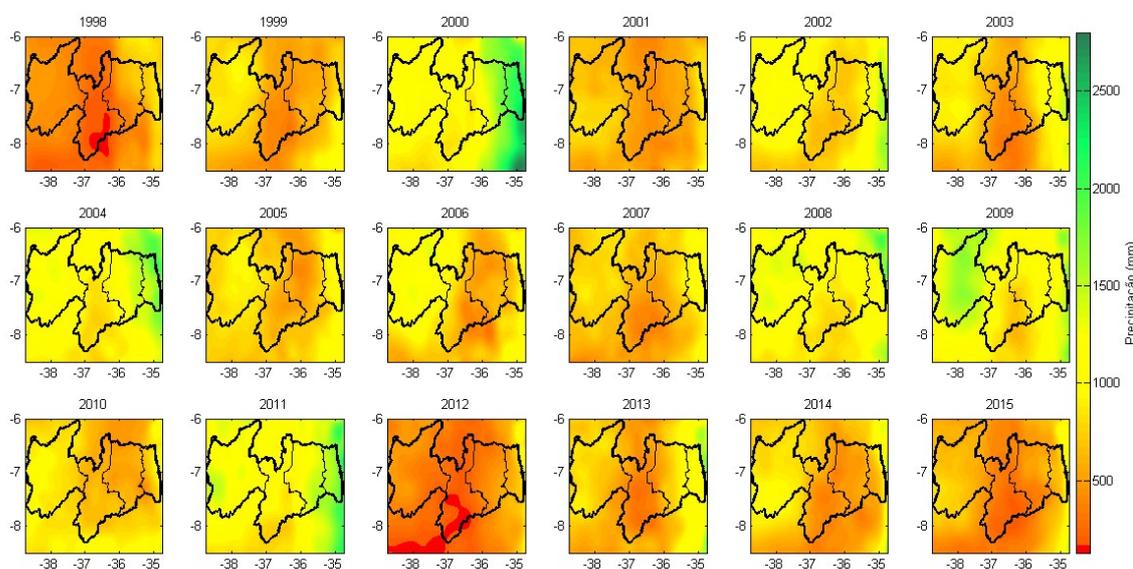


Figura 10– Distribuição da precipitação total anual sobre a Paraíba (1998–2015)

A Figura 10 mostra que 2000, 2011 e 2014 foram os anos mais úmidos da série, com níveis pluviométricos médios que ultrapassaram os 1200 mm anuais sobre basicamente todo o estado. Ainda em relação à precipitação acumulada anual, percebe-se que os anos mais secos foram 1998 e 2012, com valores médios de precipitação anual acumulada em torno dos 400 mm. Destaca-se também da distribuição espaço-temporal da precipitação anual que, ao longo

dos últimos quatro anos analisados, a precipitação diminuiu consideravelmente, sendo esse o período crítico quanto à pluviometria de todos os 18 anos analisados.

Percebe-se que na maior parte dos anos, o litoral apresentou os maiores níveis de precipitação, e na medida em que se percorre o caminho em direção ao interior do estado, a região da Borborema e do Agreste paraibano apresentam os menores índices pluviométricos, enquanto que no Sertão paraibano, os níveis pluviométricos voltam a aumentar. A Figura 11 apresenta uma análise espaço-temporal dos dias secos ao longo dos 18 anos analisados.

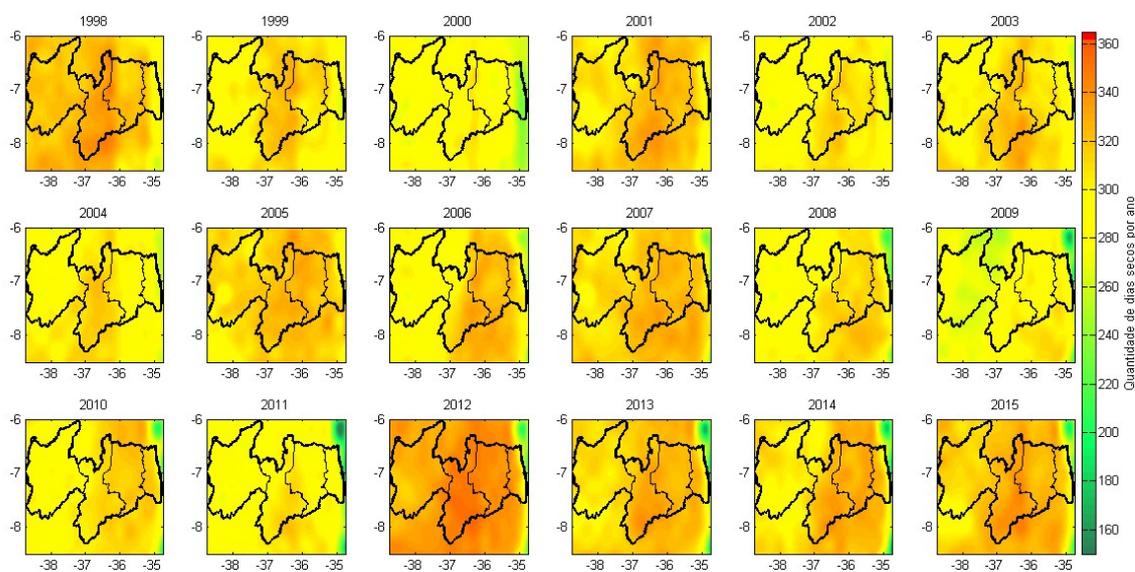


Figura 11– Distribuição da quantidade de dias secos anuais sobre a Paraíba (1998–2015)

Contabilizando a quantidade de dias secos em cada ano da série temporal analisada, a Figura 11 mostra que os anos de 2000 e 2009 foram os anos com a menor quantidade de dias secos, com valores médios em torno de 280 dias secos sobre todo o estado. Os anos de 1998 e 2012 foram os anos com as maiores quantidades de dias secos, com quantidade média de dias secos equivalente a 320 dias.

A exceção da região litorânea, a alta quantidade de dias secos mostra os baixos níveis pluviométricos da região estudada e deixa nítida a similaridade entre os dados da Figura 10 e Figura 11, revelando que o aumento na quantidade de dias secos resulta em baixos níveis pluviométricos ao longo de toda região. No intuito de caracterizar também o comportamento mensal da região, realizou-se a mesma análise da precipitação e da quantidade de dias secos para cada mês. A Figura 12 mostra a precipitação média mensal para cada mês ao longo da série temporal.

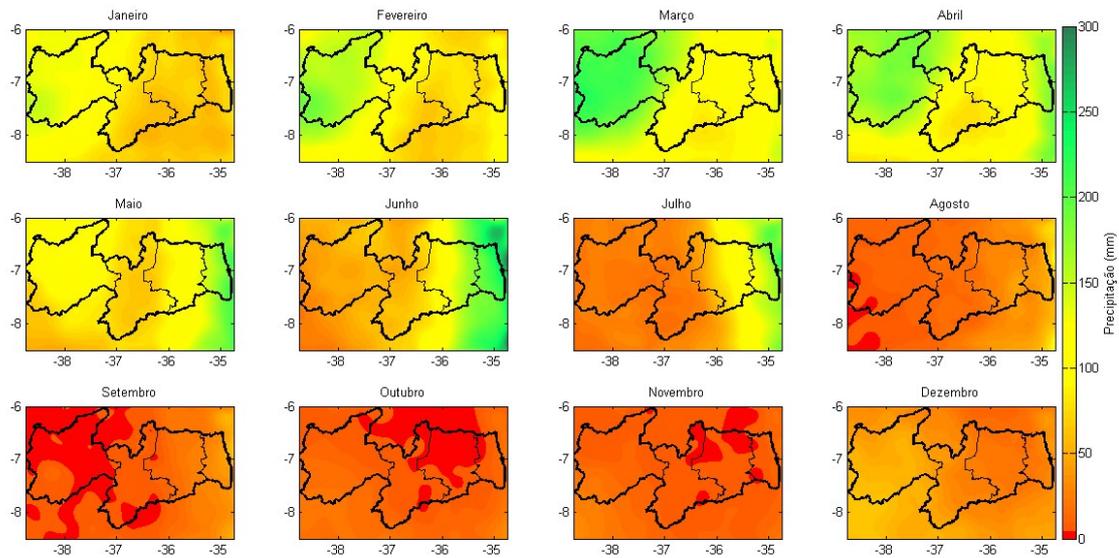


Figura 12– Distribuição da precipitação média mensal sobre a Paraíba (1998–2015)

A partir da Figura 12, percebe-se que há grande variedade a respeito da precipitação de mês a mês, com valores que variam de uma precipitação basicamente nula até níveis mensais próximos aos 300 mm. Os meses de agosto a dezembro constituem o período mais seco da área de estudo, sendo que, chove mais no litoral e no Agreste nos meses de agosto e setembro, e a precipitação passa a aumentar no Sertão e na Borborema no mês de dezembro.

De janeiro a julho, percebe-se aumento da precipitação em todas as mesorregiões do estado. No Sertão, a precipitação é relevante no período de fevereiro a abril, mas tende a diminuir consideravelmente em junho e julho; a Borborema apresenta, na maioria dos meses os menores níveis pluviométricos da região, a exceção do comportamento no mês de março; e o Agreste e o litoral apresentaram comportamento semelhante, apresentando níveis consideráveis de pluviometria a partir do mês de maio. Tendo analisado a precipitação média para cada mês, fez-se uma análise espaço-temporal dos dias secos ao longo dos 18 anos para cada mês, assim como mostrado na Figura 13.

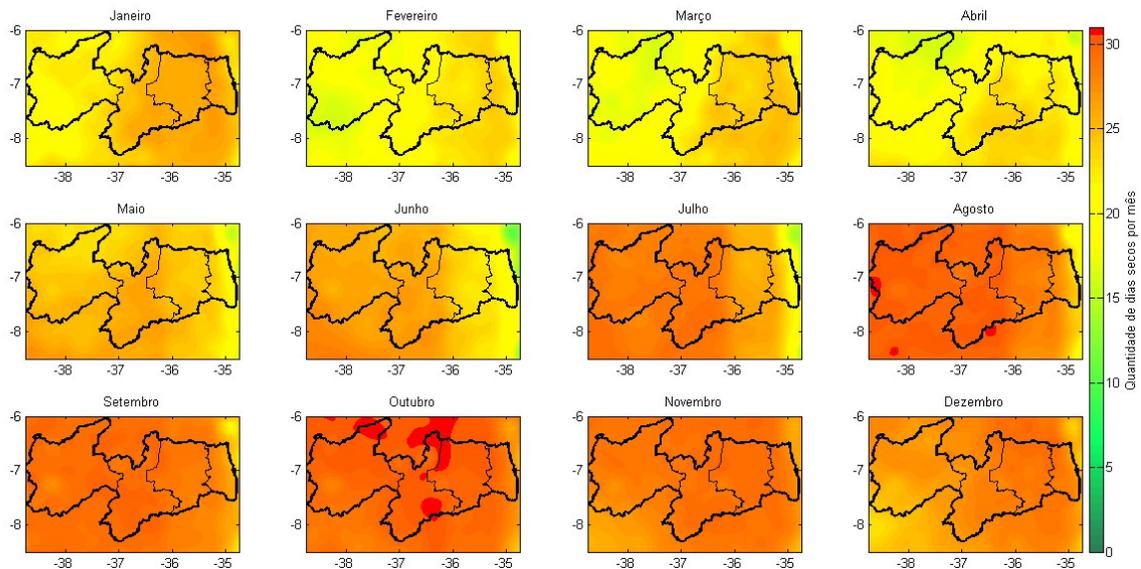


Figura 13– Distribuição da quantidade de dias secos mensais sobre a Paraíba (1998–2015)

A Figura 13 mostra a quantidade média de dias secos para cada mês ao longo da série temporal. A Figura 13 mostra que os meses de janeiro, fevereiro e março são os meses com as menores quantidades de dias secos, com valores em torno dos 20 dias ao longo de cada mês, enquanto os meses de setembro, outubro e novembro foram os que apresentaram as maiores quantidades de dias secos, apresentando uma média em torno de 29 dias secos para cada mês.

De maneira análoga ao que foi descrito na análise da precipitação e da quantidade de dias secos para cada ano, percebe-se que o aumento na quantidade de dias secos reflete na diminuição da precipitação mensal e que o comportamento espacial sobre o estado da Paraíba é basicamente o mesmo ao se analisar a precipitação mensal média e a quantidade média de dias secos. Tendo feito a análise da precipitação anual e mensal e a análise da distribuição espaço-temporal da quantidade de dias secos ao longo dos 18 anos, obteve-se a precipitação anual média assim como mostrado na Figura 14.

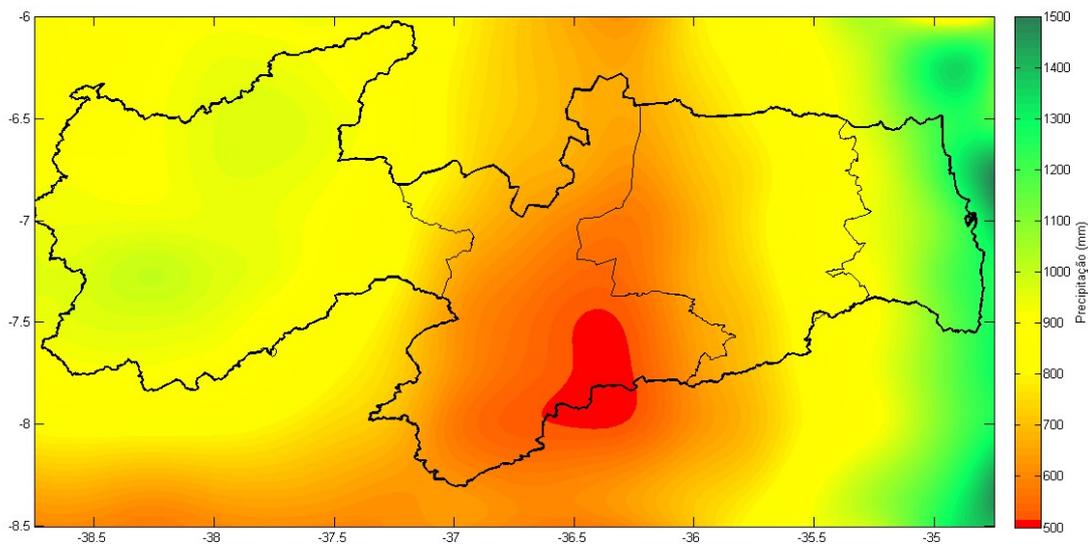


Figura 14– Precipitação anual média da Paraíba (1998–2015)

A Figura 14 mostra a precipitação anual média ao longo dos 18 anos estudados. A partir dessa figura, percebe-se que a região do Sertão paraibano tem níveis pluviométricos intermediários, com valores que chegam próximos aos 1000 mm anuais. As regiões do Agreste e da Borborema são aquelas mais carentes de chuva, com os níveis pluviométricos anuais médios mais baixos de toda a região e a região da Mata paraibana, localizada no litoral do estado da Paraíba, é a região que apresenta os maiores níveis pluviométricos, com níveis anuais médios que ultrapassam os 1300 mm anuais. Com a análise da precipitação anual média, realizou-se a análise da quantidade de dias secos de toda a série temporal, assim como mostra a Figura 15.

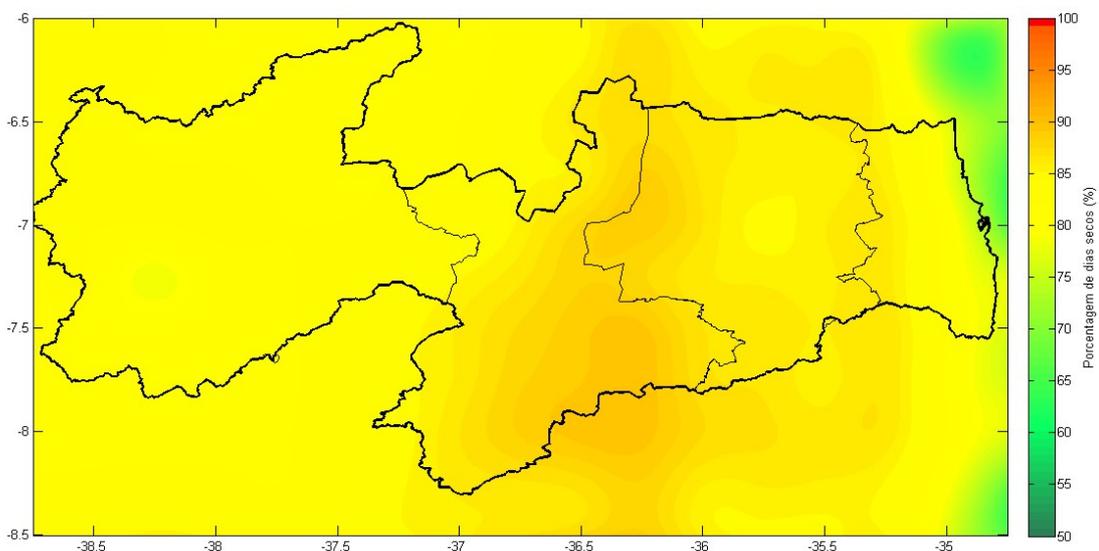


Figura 15– Distribuição percentual da quantidade de dias secos sobre a Paraíba (1998–2015)

A Figura 15 mostra a distribuição percentual da quantidade de dias secos ao longo da série temporal. Com uma série de 6574 dados diários de precipitação para cada quadrícula, calculou-se a quantidade total de dias secos que atingiram a região estudada, e fez-se assim, o cálculo da porcentagem de dias secos em relação ao total possível. Os resultados mostram que a região litorânea apresenta as menores quantidades percentuais de dias secos de toda região, mas que, ainda assim, apresenta percentuais de dias secos próximos aos 70%.

A região do Sertão paraibano por sua vez apresentou uma quantidade intermediária de dias secos, revelando percentuais que ultrapassaram os 70% e a região do Agreste e da Borborema foram as regiões que apresentaram maiores quantidades de dias secos, com níveis que chegaram aos 85%. Realça-se a similaridade entre as Figura 14 e Figura 15, demarcando praticamente as mesmas regiões. A análise conjunta da precipitação e da quantidade de dias secos em escala mensal, anual ou para toda a série mostram a semelhança entre os mapas produzidos e permitem a caracterização da precipitação na região estudada.

Realizando uma caracterização geral do comportamento da precipitação na área de estudo, a Figura 16 mostra a análise temporal da precipitação analisando não só o comportamento anual como também o mensal. A Figura 16b e Figura 16c representam o hietograma e a anomalia mensal, obtidas através do valor médio da precipitação das 187 quadrículas TRMM de cada mês durante toda a série histórica. Dessa figura, percebe-se que os meses mais secos da área de estudo como um todo compreendem o período que vai de agosto a dezembro, enquanto os meses mais úmidos compreendem um período que vai de janeiro a abril, com variação de precipitação mensal média nula até valores de 150 mm.

A Figura 16d representa o hietograma anual da série, obtido de maneira análoga ao que foi descrito para o hietograma mensal, e a Figura 16e, a anomalia anual. Dessa figura, confirma-se que os anos mais secos foram os de 2012 e de 1998, enquanto que os anos mais úmidos foram os de 2000 e 2011. A Figura 16a representa a interpolação desses dados, de maneira que se possa visualizar a faixa que demarca o início e o fim do período chuvoso, complementada pela informação do hietograma e anomalia mensal e anual.

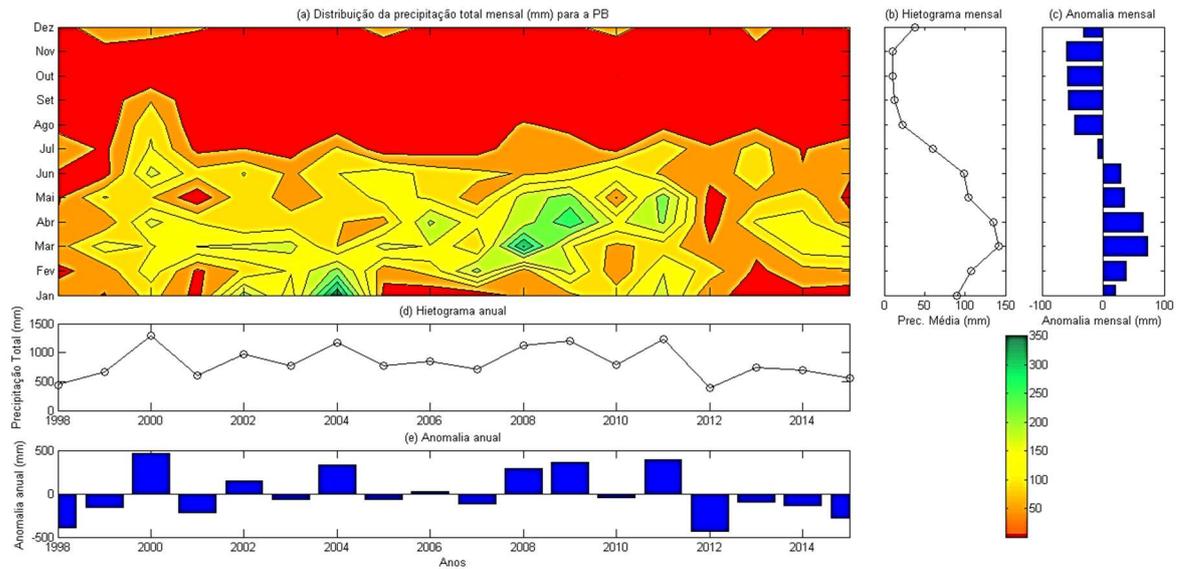


Figura 16– Análise temporal da precipitação da Paraíba (1998–2015)

Vale salientar que a Figura 16 foi feita considerando as 187 séries que compõem a grade TRMM e por isso, para realizar uma caracterização mais completa, seriam necessárias 187 figuras como essa para uma completa caracterização da área de estudo. Em função da demanda de dados, optou-se por utilizar a Figura 17, que mostra a distribuição espaço-temporal da precipitação total mensal para cada mês da série temporal.

Para a Figura 17, foram utilizadas 187 séries contendo 216 meses cada, totalizando uma matriz composta de 187 séries \times 18 anos \times 12 meses. A partir dela, pode-se notar o comportamento de toda a área de estudo ao longo dos 18 anos em análise, visualizando o comportamento dos anos e meses mais secos e úmidos sobre toda a região. Os dados utilizados para confecção da Figura 17 representam os dados de entrada para o cálculo dos oito índices SPI utilizados nessa pesquisa.

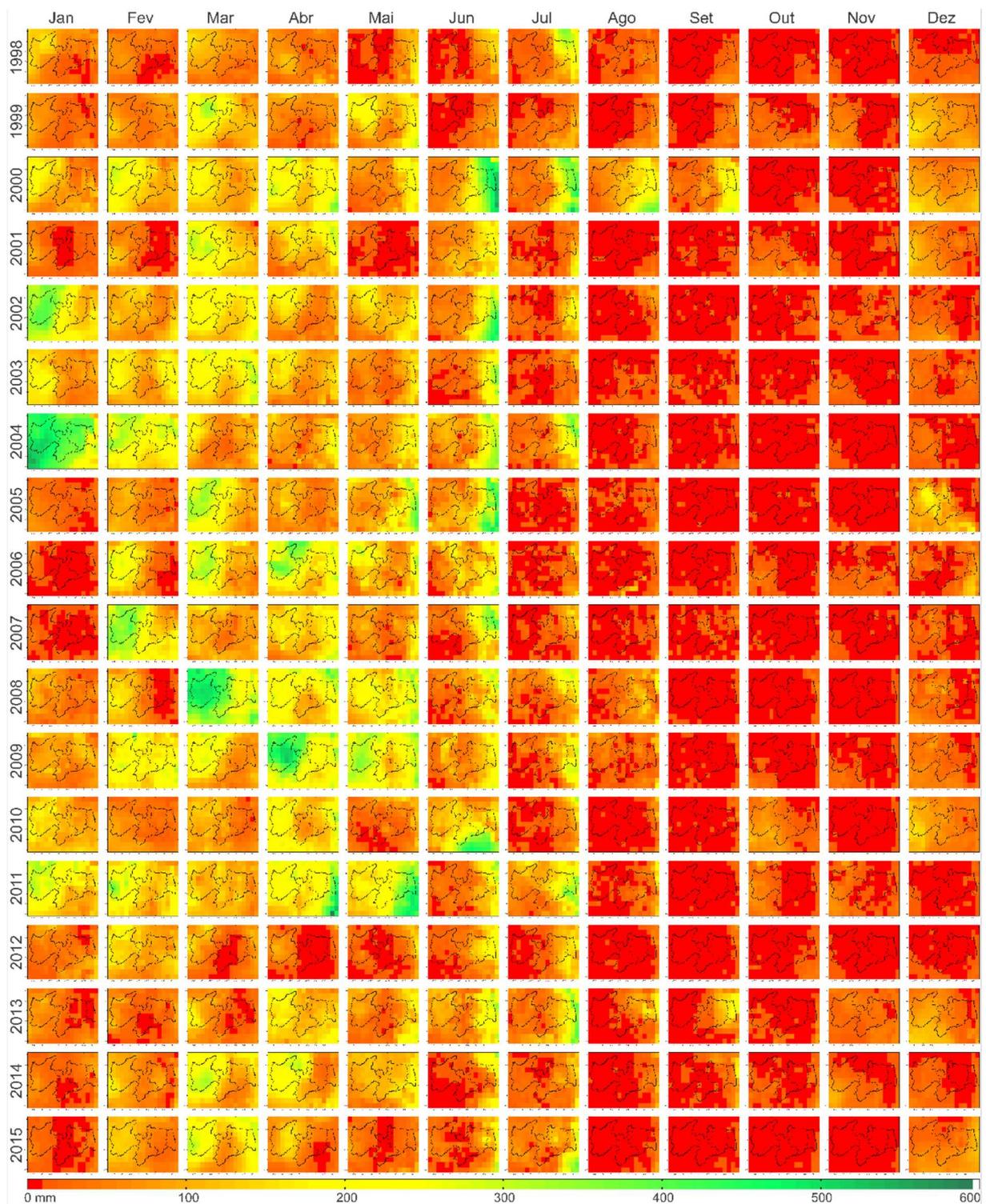


Figura 17– Distribuição da precipitação total mensal sobre o estado da Paraíba (1998–2015)

5.3.SPI

Para o entendimento inicial a respeito do índice SPI, fez-se um estudo a partir da precipitação média mensal de toda a região estudada, contendo as 187 quadrículas descritas na grade TRMM, assim conforme utilizado para Figura 16.

A Figura 18 mostra a o hietograma mensal médio ao longo de toda a série estudada (1998–2015) e em posse da precipitação média mensal ao longo da série histórica, calculou-se os índices SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48, indicados também na Figura 18, visando uma caracterização geral da seca em relação à precipitação média mensal de toda a região estudada, assim como mostrado nas Figuras 18(a–h). Admitiu-se que os índices SPI-1, SPI-3 e SPI-6 consistem em uma análise da seca de curto-prazo, os índices SPI-9 e SPI-12 consistem em uma análise da seca de médio-prazo e os índices SPI-18, SPI-24 e SPI-48 consistem em uma análise da seca de longo-prazo.

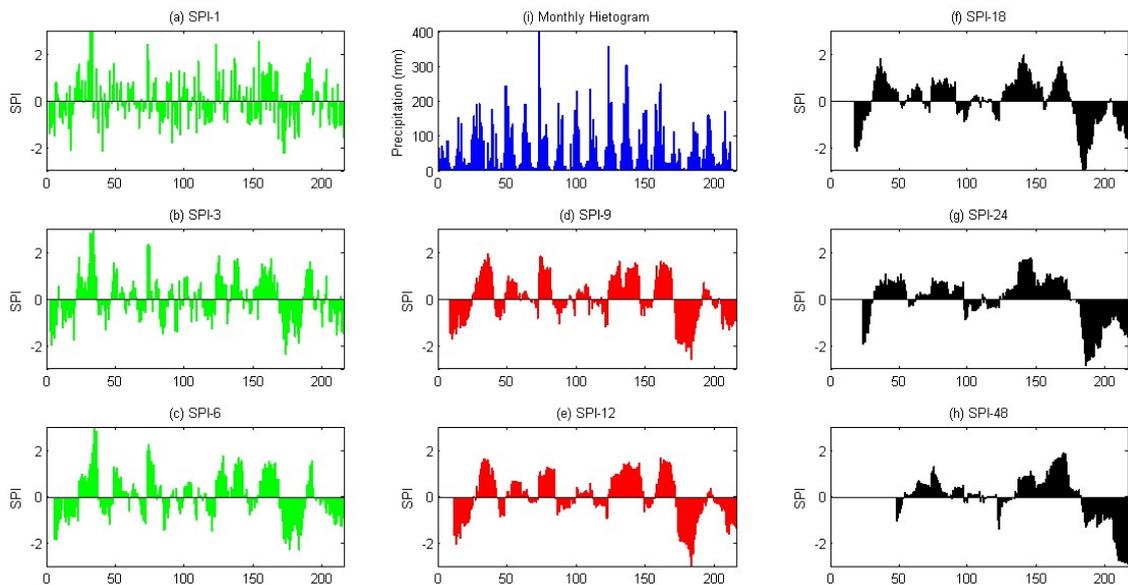


Figura 18– Análise de seca de curto-prazo do (a) SPI-1, (b) SPI-3 e (c) SPI-6, de médio-prazo do (d) SPI-9 e (e) SPI-12 e de longo-prazo do (f) SPI-18, (g) SPI-24 e (h) SPI-48 com base na (i) precipitação mensal média da Paraíba (1998–2015)

A partir dos gráficos mostrados na Figura 18, percebe-se que quanto menor o intervalo de análise da seca, maior a frequência com que os valores de SPI se alternavam entre valores positivos e negativos, quebrando a continuidade de um evento seco ($SPI \leq 0$) ou úmido ($SPI > 0$). Além do mais, percebe-se grande similaridade entre as séries de curto-, médio- e longo-prazo, existindo mudança basicamente na magnitude dos valores de SPI, mas mantendo o mesmo comportamento de continuidade de eventos secos e úmidos ao decorrer da série.

Realizando uma análise da seca em curto-prazo, houve a maior ocorrência de eventos secos, ultrapassando os 55% do total possível. Realizando uma análise da seca em médio-prazo, houve maior equilíbrio entre a quantidade de eventos secos e a quantidade de eventos úmidos

e realizando uma análise da seca em longo-prazo, houve uma menor ocorrência de eventos secos dentre todos os outros intervalos analisados.

Verificaram-se as porcentagens de cada tipo de eventos secos e úmidos ocorridas para cada índice SPI estudado, visando uma classificação mais detalhada a respeito das condições de secas encontradas para a série de precipitação mensal média sobre toda a região estudada, assim como mostrado no Gráfico 1.

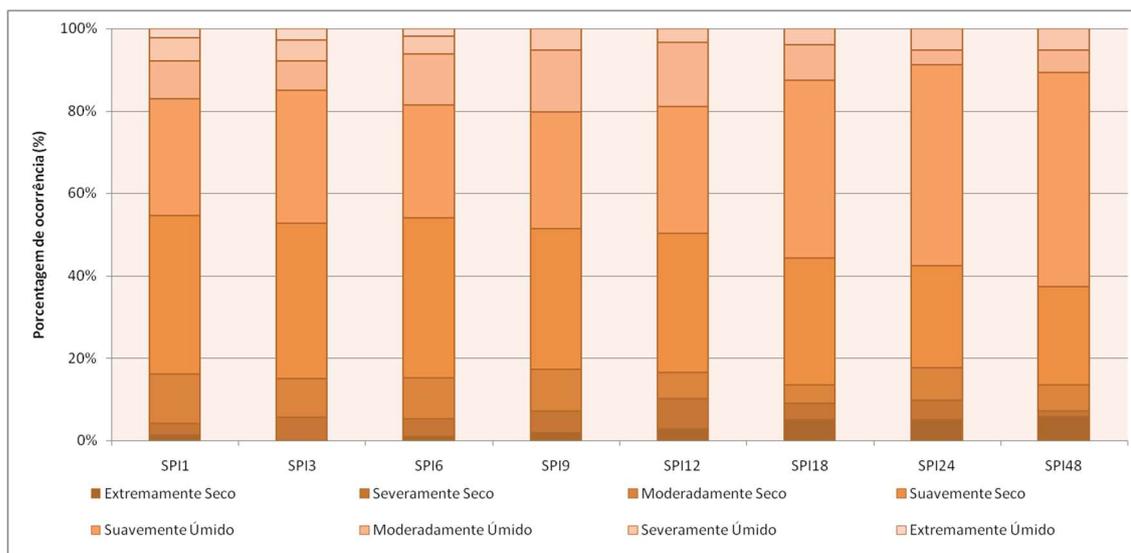


Gráfico 1– Porcentagem de ocorrência de cada tipo de evento seco e úmido para cada índice SPI utilizando a precipitação média mensal do estado da Paraíba (1998–2015)

O Gráfico 1 mostra a porcentagem de ocorrência de cada classificação de eventos seco e úmido ao longo de toda a série temporal sobre a precipitação mensal média da região do estado da Paraíba. Os resultados mostram que analisando uma seca de curto-prazo, i.e., séries de SPI-1, SPI-3 e SPI-6, há maior ocorrência de eventos secos. Aumentando o intervalo de análise da seca, percebe-se que a porcentagem de eventos secos diminui, chegando a pouco mais de 35% do total possível. No entanto, percebe-se que à medida que o intervalo de análise aumenta, há o aumento na severidade das secas, i.e., as secas passam a ser severas e extremas.

Os eventos extremamente secos, por exemplo, passaram de uma porcentagem de ocorrência basicamente nula em uma análise de secas de curto-prazo para valores que chegam próximos aos 6% do total possível em análises de secas de longo-prazo. Os eventos secos diminuíram em quantidade, mas passaram a acontecer de maneira mais severa com o aumento do intervalo de análise.

Os eventos extremamente e severamente úmidos se mantiveram de maneira basicamente constante para todos os índices SPI analisados, mas analisando os eventos moderadamente úmidos, por exemplo, percebeu-se aumento considerável da porcentagem de ocorrência desse tipo de evento em uma análise de médio-prazo, i.e., SPI-9 e SPI-12, enquanto que para os eventos suavemente úmidos, percebe-se aumento considerável à medida que o intervalo de análise de seca aumenta.

Assim como dito anteriormente, a análise proveniente do Gráfico 1 foi feita com base nos valores de precipitação médios mensais para todas as 187 séries TRMM que compõem a área de estudo. Desse modo, buscou-se realizar uma distribuição espaço-temporal de todos os índices SPI ao longo de toda a série temporal, para todas as 187 quadrículas que compõem a grade TRMM, realizando dessa forma uma análise completa e detalhada da seca em curto-, médio- e longo-prazo. Para entender o processamento dos dados, fez-se uma análise inicial para um único mês, que foi o de dezembro de 2015. A Figura 19 mostra a espacialização dos valores de SPI para o mês de dezembro de 2015, que para fins didáticos, foi escolhido porque foi o ano que apresentou a maior porcentagem de eventos secos para todos os índices SPI analisados.

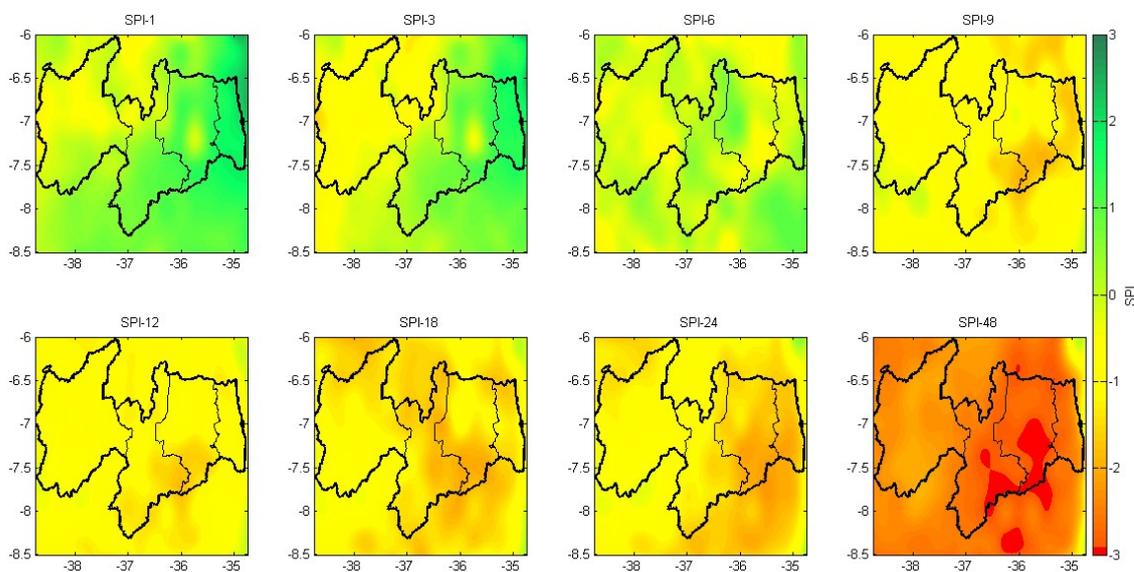


Figura 19– Distribuição espacial dos índices SPI sobre a Paraíba para dezembro de 2015

A Figura 19 mostra a distribuição espacial dos valores de cada índice SPI sobre toda a região estudada para dezembro de 2015. A partir de cada uma das 187 séries de precipitação totais mensais compostas por 216 valores cada (Figura 17), foram calculados os índices SPI utilizados neste estudo para toda a série temporal. De posse da série temporal de cada índice

SPI para cada quadrícula TRMM (8 índices \times 187 quadrículas), foi feita a distribuição espaço-temporal dos respectivos valores para o mês de dezembro no ano de 2015.

Percebe-se que realizando uma análise em curto-prazo, a maior parte da Paraíba sofreu com secas suaves, sendo a região litorânea a menos afetada pelos valores negativos do SPI. Realizando uma análise de médio-prazo, percebe-se um aumento na quantidade de eventos secos, sendo basicamente toda a região estudada afetada por esse tipo de evento. Realizando uma análise de longo-prazo, percebe-se que há maior severidade da seca através dos baixos valores de SPI encontrados, de modo que à exceção de alguns poucos pontos no litoral, toda a região está condicionada a ocorrência de eventos secos. Os resultados confirmam que à medida que o intervalo de análise de seca aumenta, maior a severidade das secas que atingem a região da Paraíba.

De maneira análoga ao que foi feito para o mês de dezembro do ano de 2015, foi realizada a distribuição espacial dos valores de todos os índices SPI ao longo de toda a série temporal para todos os pontos da grade TRMM. A Figura 20 mostra a evolução e o comportamento da seca ao longo de toda a série temporal para o SPI-1. As demais figuras contendo a evolução e o comportamento da seca dos outros sete índices SPI analisados neste estudo se encontram no Anexo A.

Percebe-se, por exemplo, que a Figura 19 tem elementos que compõem a Figura 20 no ano de 2015, mês de dezembro. Desse modo, realizou-se a análise detalhada de toda a região para todos os índices SPI estudados para todos os meses da série temporal, assim como mostrado na Figura 20 e no Anexo A.

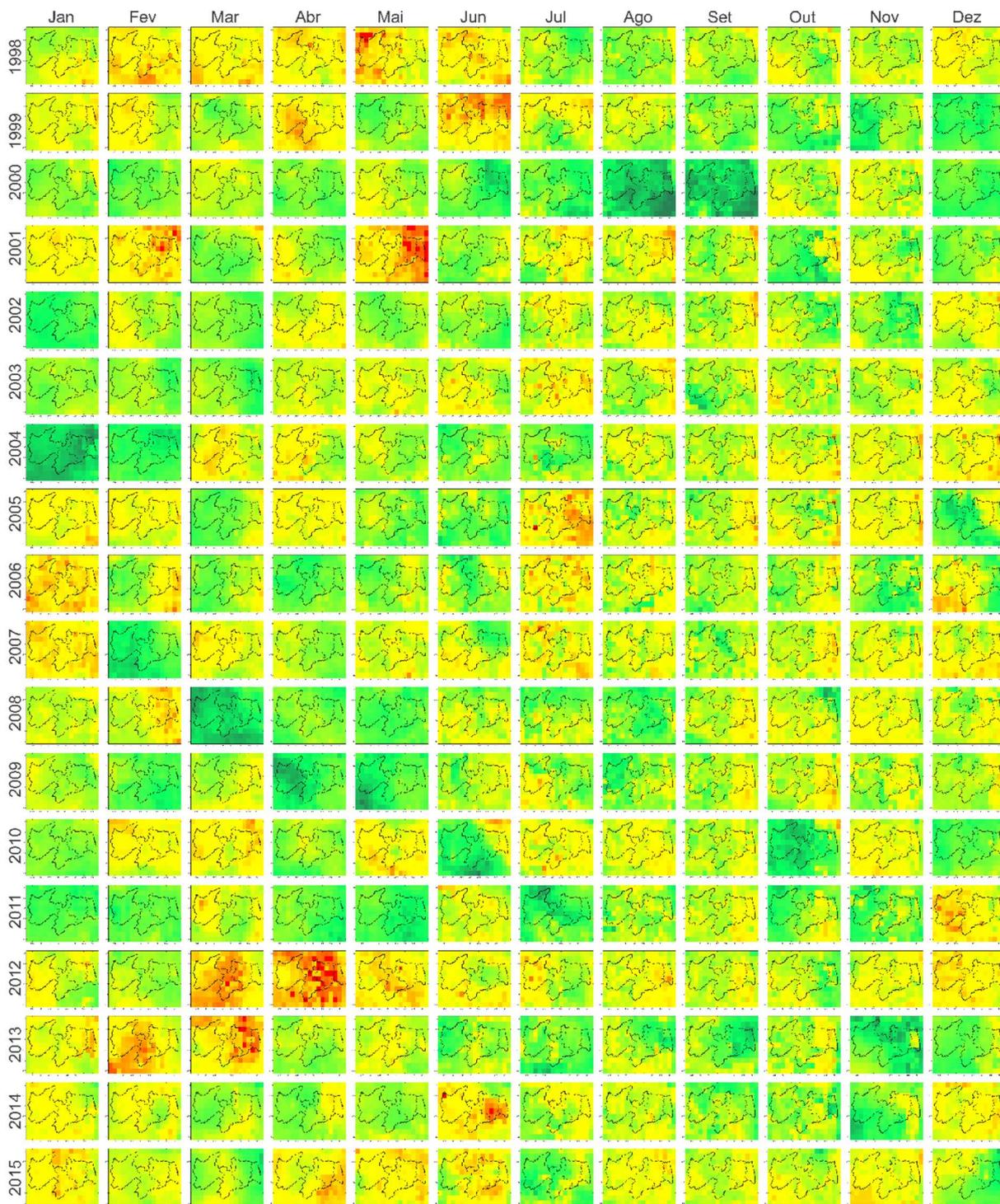


Figura 20– Distribuição espaço-temporal do SPI-1 sobre a Paraíba (1998–2015)

Mediante a quantidade de dados processados e de mapas a serem analisados, realizou-se a aplicação da análise de *clusters*, no intuito de agrupar as séries de cada índice SPI de cada quadrícula em *clusters* semelhantes. Desse modo, dividiu-se o estado da Paraíba em 4 grandes *clusters* adotando o critério de correlação baseado nas 187 séries de seca de curto-, médio- e

longo-prazo e, através da utilização dos dendrogramas, identificou-se como esses *clusters* estão correlacionados. A Figura 21 mostra o resultado da análise para as secas de curto-prazo.

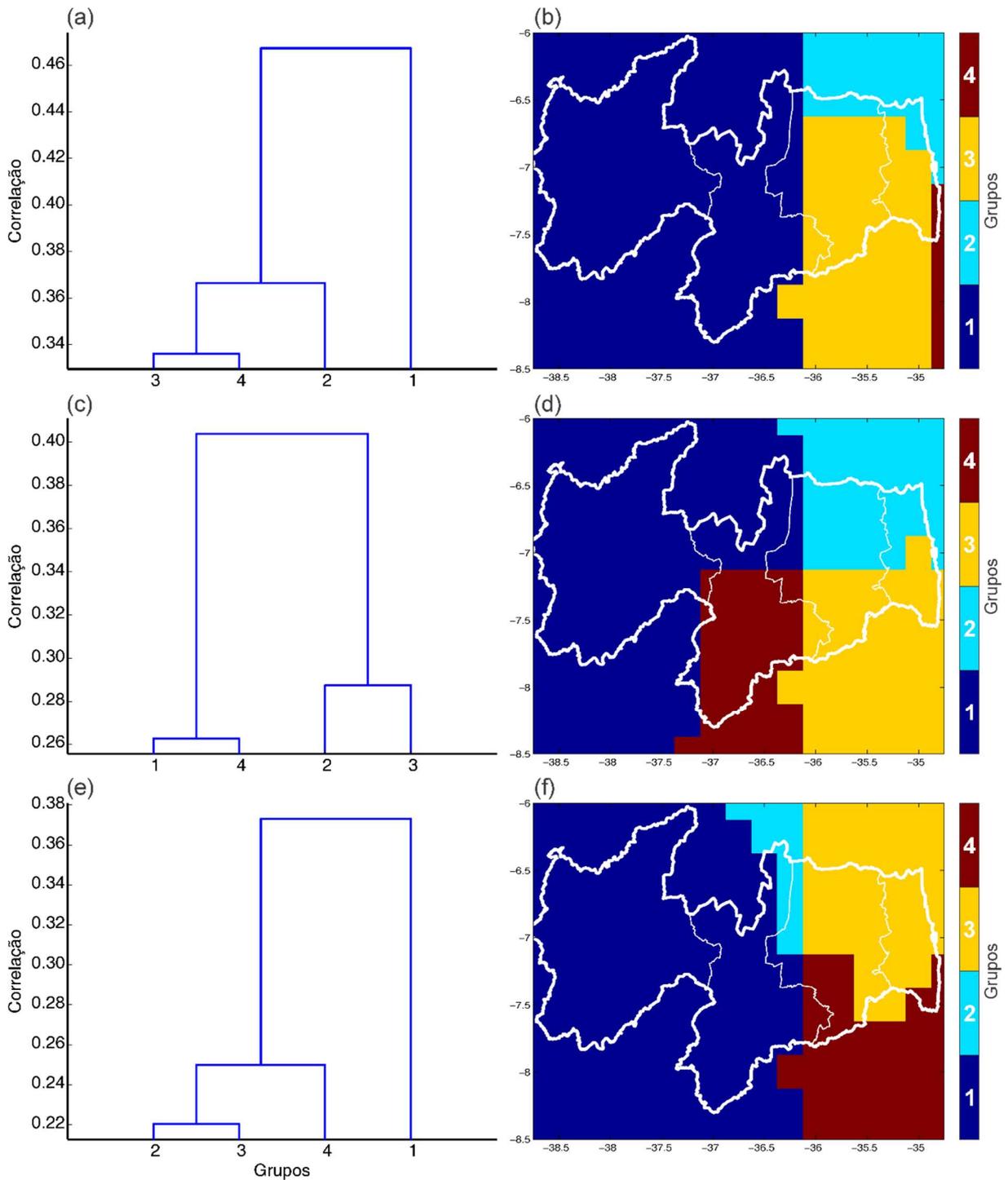


Figura 21– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro *clusters* ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-1, (c–d) SPI-3 e (e–f) SPI-6

A Figura 21 mostra a aplicação e espacialização dos resultados da análise de *clusters* utilizando o critério de correlação baseado nas séries de SPI-1, SPI-3 e SPI-6 e seus respectivos dendrogramas. Através dos mapas, percebe-se que para dividir a área de estudo em quatro grandes grupos, a distância de correlação necessária é de cerca de 0.30, 0.26 e 0.22 para os índices SPI-1, SPI-3 e SPI-6. Em todos os índices SPI que compõem a análise das secas de curto-prazo, percebe-se que há sempre um grande *cluster* que abrange as mesorregiões do Sertão e da Borborema (*cluster* 1 para o SPI-1; *clusters* 1 e 4 para o SPI-3; e *cluster* 1 para o SPI-6), e um outro grupo que abrange o Agreste e o litoral paraibano (*clusters* 2, 3 e 4 para o SPI-1; *clusters* 2 e 3 para o SPI-3; e *clusters* 2, 3 e 4 para o SPI-6).

Isso significa que, ao se utilizar um agrupamento por correlação, o comportamento das séries inseridas na mesorregião da Borborema é mais semelhante ao comportamento das séries do Sertão, do que com as séries do litoral paraibano. Entende-se como comportamento neste caso, a variação das séries e não os valores que eles assumem de maneira propriamente dita, i.e., se as variações das séries como um todo foram semelhantes, elas tendem a estar em um mesmo grupo, o que significa que o comportamento da seca no caso é semelhante, mas a magnitude pode ser ou não igual.

Realizando uma comparação com o estudo feito por Teodoro et al. (2016) e seguindo as indicações dos estudos de Lyra et al. (2006, 2014), vale salientar que utilizando uma distância de correlação de 0,50, todas as 187 séries de SPI-1, de SPI-3 e de SPI-6 estariam agrupadas em um único *cluster*, o que revela a similaridade no comportamento da seca da região.

De qualquer maneira, mesmo diminuindo a distância de correlação entre as séries, percebe-se que as séries de seca de curto-prazo para cada quadrícula apresentam bastante similaridade entre si, mantendo divisões regionais semelhantes às mesorregiões utilizadas. Ainda sobre a análise a respeito da distância de correlação, vale salientar também que ao diminuir essa distância, mais *clusters* com comportamentos cada vez mais distintos irão aparecer, de modo que, quando a distância de correlação entre os *clusters* for mínima, serão encontrados 187 *clusters* distintos sobre a área de estudo, sendo cada *cluster* equivalente ao comportamento de cada quadrícula. Seguindo com a mesma ideia de caracterização do índice de seca, aplicou-se a análise de *cluster* para as secas de médio-prazo.

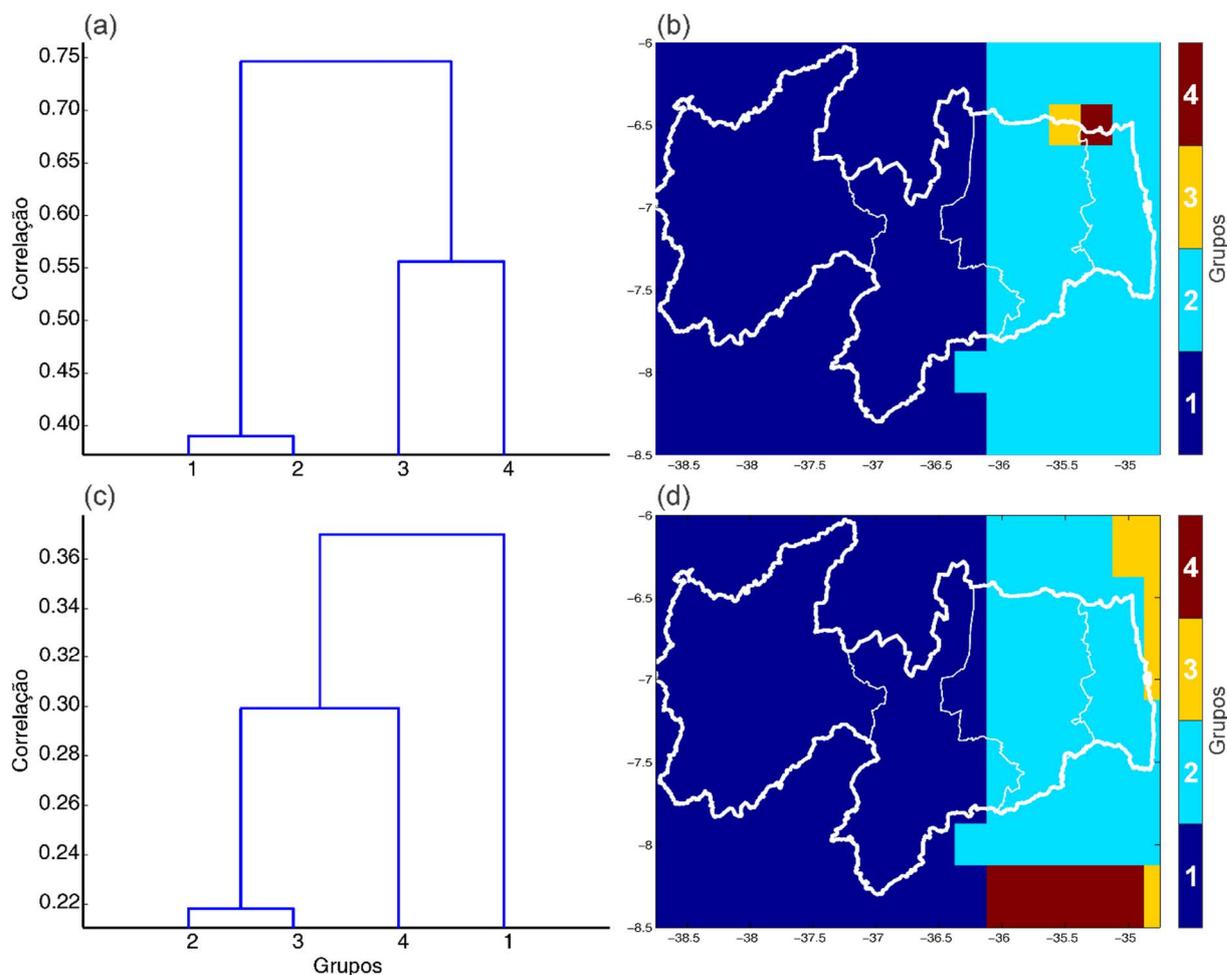


Figura 22– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro *clusters* ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-9 e (c–d) SPI-12

A Figura 22 mostra a aplicação e espacialização dos resultados da análise de *clusters* utilizando o critério da correlação baseado nas séries de SPI-9 e SPI-12. Percebe-se que diferentemente do que aconteceu na análise das secas de curto-prazo, o estado da Paraíba foi basicamente dividido basicamente em dois grandes *clusters*, sendo um *cluster* que compreende o Sertão paraibano e a região da Borborema (*cluster* 1 para SPI-9 e SPI-12) e um outro grupo que abrange basicamente toda a região do litoral e do Agreste paraibano (*cluster* 2 para SPI-9 e SPI-12).

Nota-se um comportamento distinto em relação à análise do SPI-9 e do SPI-12 entre si. Para o SPI-9, os comportamentos das séries são mais distintos entre si, visto que para uma distância de correlação de 0,50, teríamos três grupos sobre a grade TRMM (grupo formado pelos *clusters* 1 e 2, um outro formado pelo *cluster* 3 e um outro, pelo *cluster* 4), enquanto que, para a mesma distância de correlação analisando as séries do SPI-12, todas as quadrículas

estariam agrupadas em um único *cluster*. Percebe-se que a análise de *clusters* para o SPI-12 teve um resultado bastante semelhante aos encontrados para a seca de curto-prazo, visto que houve a formação de um grande *cluster* que abrange toda a região do Sertão e da Borborema, e de um outro *cluster* que abrange o litoral e o Agreste paraibano. Por fim, realizou-se a identificação das regiões homogêneas em relação às secas de longo-prazo.

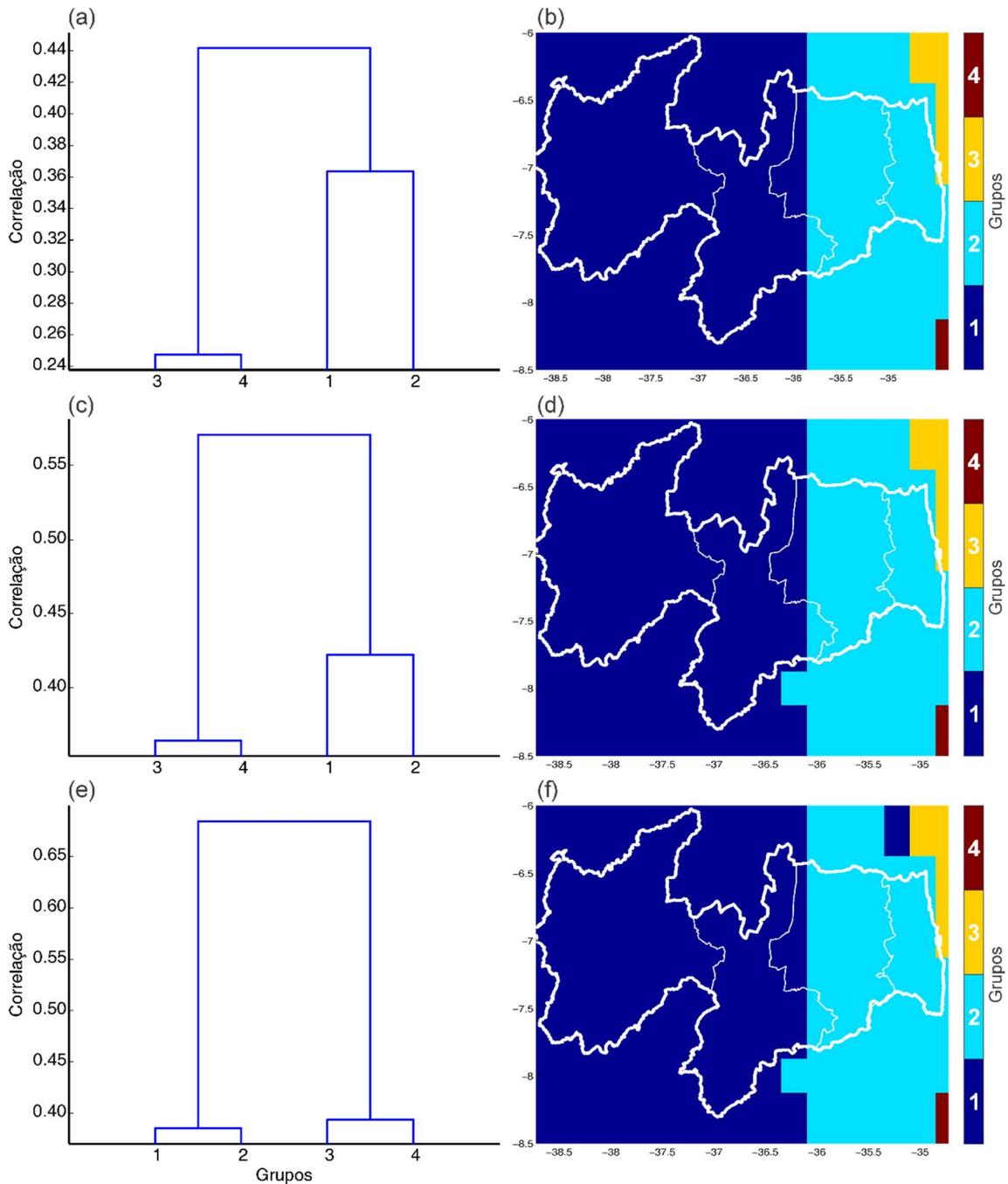


Figura 23– Dendrogramas (lado esquerdo) e distribuição espacial dos quatro *clusters* ou grupos (lado direito) com base nas séries temporais de (a–b) SPI-18, (c–d) SPI-24 e (e–f) SPI-48

A Figura 23 mostra a aplicação e espacialização dos resultados da análise de *clusters* utilizando o critério de correlação baseado nas séries de SPI-18, SPI-24 e SPI-48 e seus respectivos dendrogramas. Percebe-se que assim como na análise e identificação de regiões homogêneas de secas de médio-prazo, para as secas de longo-prazo houve divisão da Paraíba em basicamente dois *cluster* (*cluster 1* e *cluster 2*) e através dos respectivos dendrogramas, percebe-se que esses grupos são os que apresentam a maior correlação entre si, analisando o SPI-18, SPI-24 e SPI-48.

Fixando uma distância de correlação de 0,50, basicamente toda a área de estudo tende a se comportar da mesma maneira e a estar inserida em um grande grupo (*cluster 1, 2, 3 e 4* para SPI-18; *cluster 1 e 2* para SPI-24 e SPI-48). Dessa forma, através da aplicação da análise de *cluster*, conclui-se que analisando as secas de longo-prazo, a Paraíba apresenta basicamente o mesmo comportamento, ou seja, da região do Sertão até a Mata paraibana.

Tendo realizado toda a espacialização e identificação das regiões com comportamento homogêneo ao longo da série temporal, realizou-se a caracterização temporal dos eventos secos para todos os índices SPI analisados durante os 18 anos em análise. O intuito dessa análise é visualizar o comportamento temporal de acordo com a classificação dos eventos secos, i.e., eventos suavemente, moderadamente, severamente e extremamente secos, caracterizando os anos e os meses que tiveram as maiores porcentagens de eventos secos em relação a uma análise de seca de curto-, médio- e longo-prazo.

Os Gráficos 2 a 11 foram organizados fixando a classificação do evento seco e variando os intervalos de análise de seca e a escala de tempo, analisando não só os meses como também os anos. O Gráfico 2 e o Gráfico 3 mostram a caracterização temporal dos eventos extremamente secos ao longo dos 18 anos em análise.

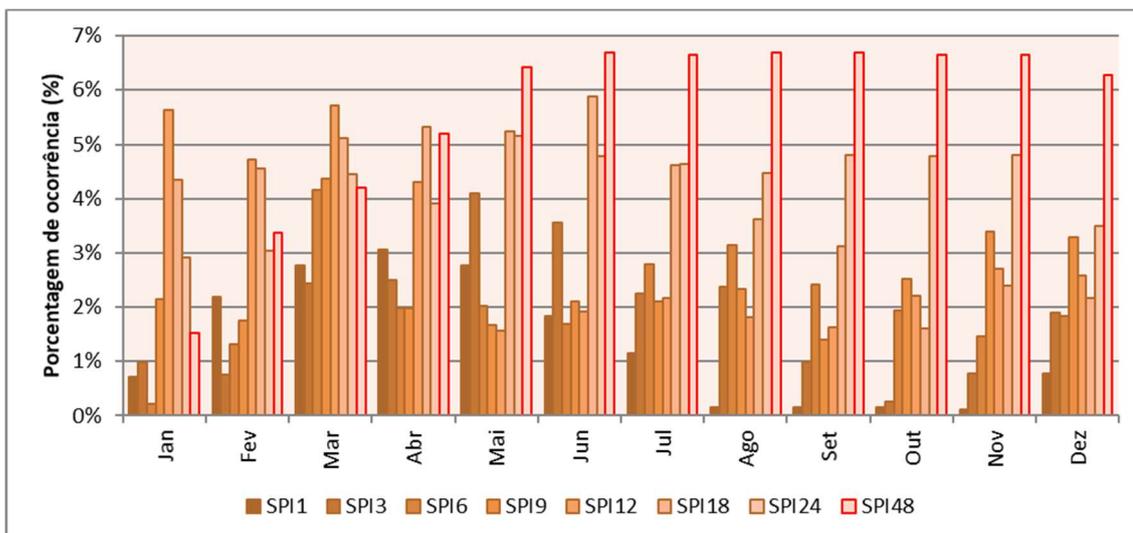


Gráfico 2– Porcentagem mensal de eventos extremamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

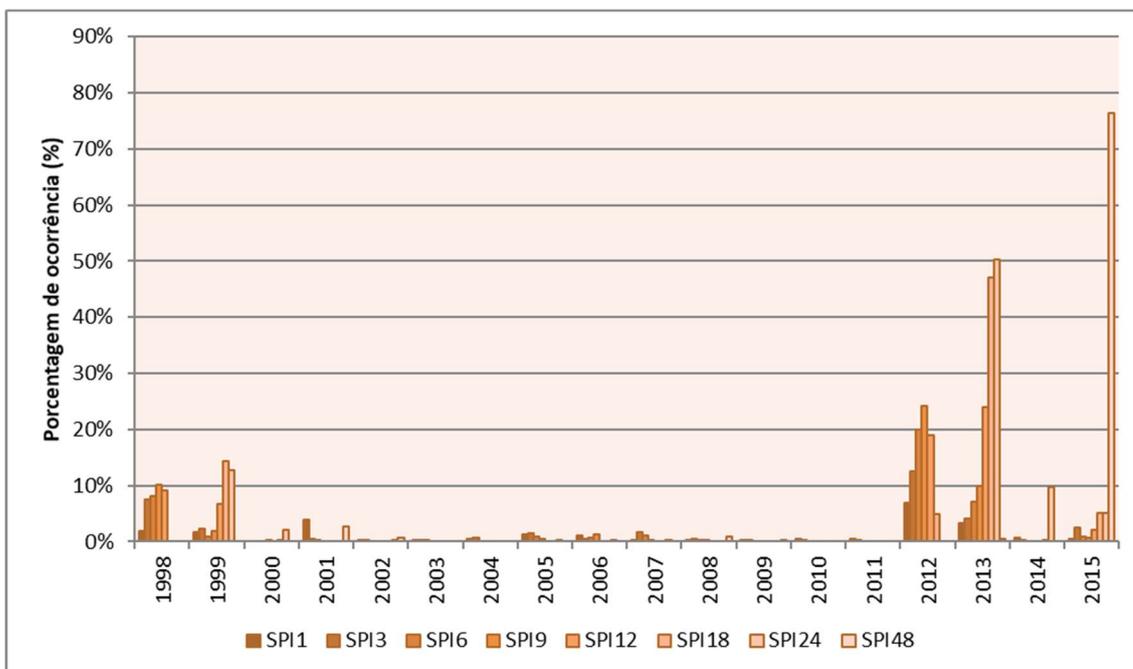


Gráfico 3– Porcentagem anual de eventos extremamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Os Gráficos 2 e 3 mostram a porcentagem de eventos extremamente secos em escala mensal e anual ao longo dos 18 anos para todos os 187 pontos que compõem a grade TRMM estudada. Realizando uma análise mensal, os resultados mostram que quanto maior o intervalo de análise da seca, maior a porcentagem de ocorrência de eventos extremamente secos na região.

Para as secas de longo-prazo, em destaque para o SPI-48, percebe-se que de abril a dezembro, a porcentagem de ocorrência ao longo dos anos foi superior a 5%, enquanto os valores de SPI-1 não chegaram a ultrapassar a porcentagem de ocorrência de 1% para o mês de janeiro, por exemplo. Isso significa que, dentro dos 18 janeiros contidos na série histórica ao se analisar o SPI-1, para as 187 séries analisadas (18×187), nem 30 valores de SPI-1 sobre toda a área de estudo foram inferiores ao valor de -2 .

Realizando uma análise anual, percebe-se que para as secas de médio- e longo-prazo não houve ocorrência de eventos extremamente secos na região estudada em grande parte dos anos. No entanto, os anos de 1998, 1999, 2012 e 2013 foram anos com porcentagens consideráveis de eventos extremamente secos em todos os intervalos de análise de seca, seja ele de curto-, médio- ou longo-prazo. O ano de 2015 merece destaque na análise anual visto que mais do que 75% dos eventos que aconteceram sobre o estado da Paraíba foram extremamente secos ao se realizar uma análise do SPI-48.

Isso significa que, dentro dos 12 meses do ano de 2015, para as 187 séries analisadas (12×187), mais do que 1600 valores de SPI-48 sobre toda a área de estudo foram inferiores a valor de -2 ao longo do ano de 2015 e, logo, foram classificados como eventos extremamente secos. Um resultado que complementa esse fato foi produzido na Figura 19, onde através da espacialização do SPI para o mês de dezembro do ano de 2015, percebe-se a alta taxa de eventos extremamente secos que ocorreram na região nesse mês para esse ano, ao se realizar uma análise desse índice SPI. Seguindo com a ideia da análise dos eventos extremamente secos, realizou-se o mesmo estudo para os eventos severamente secos, assim como mostrado nos Gráficos 4 e 5.

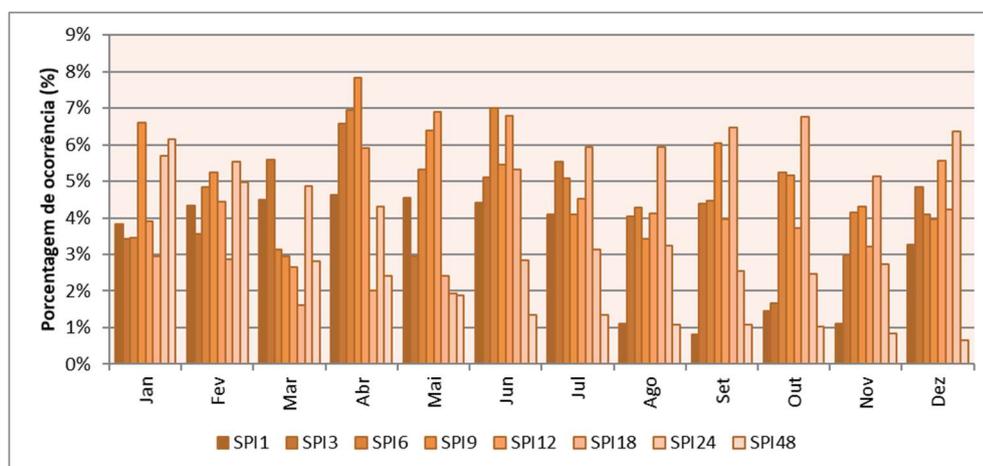


Gráfico 4– Porcentagem mensal de eventos severamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

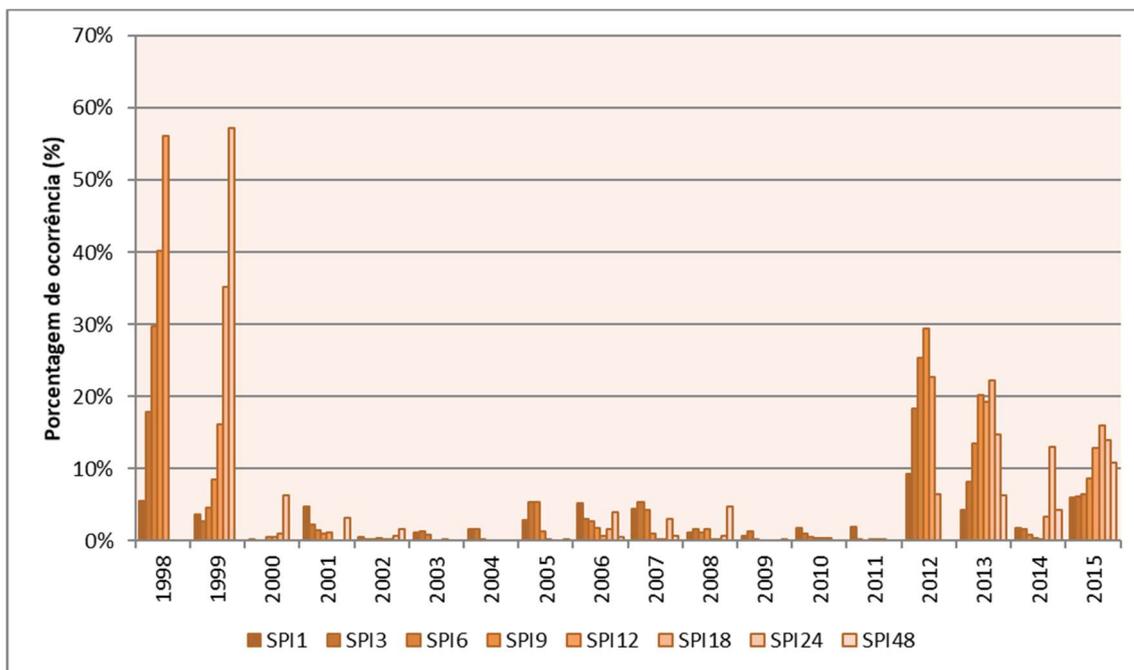


Gráfico 5– Percentagem anual de eventos severamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Os Gráficos 4 e 5 mostram a porcentagem mensal e anual de eventos severamente secos que atingiram a Paraíba ao longo dos 18 anos. Realizando uma análise mensal, percebe-se que a região da Paraíba foi mais atingida por secas de curto- e médio-prazo, diferentemente do que aconteceu ao se analisar os eventos extremamente secos. Percebe-se também que os meses de março, abril, maio e junho foram os meses mais atingidos pelos eventos severamente secos.

Realizando uma análise anual, percebe-se similaridade entre os resultados da análise dos eventos extremamente secos, visto que os anos de 1998, 1999, 2012 e 2013 continuaram sendo os anos de maior nível de ocorrência desse tipo evento seco. Percebe-se que ao longo da série temporal, houve uma diminuição de porcentagens nulas de ocorrência de eventos severamente secos em comparação com a quantidade de porcentagens nulas de eventos extremamente secos, revelando aumento da ocorrência dos eventos secos ao longo dos anos.

Percebe-se também através da análise anual que, em grande parte dos anos, os eventos severamente secos aconteceram de maneira mais significativa, com base na análise de curto- e médio-prazo. Seguindo com a ideia da análise dos eventos extremamente e severamente secos, realizou-se o mesmo estudo para os eventos moderadamente secos, assim como mostrado nos Gráficos 6 e 7.

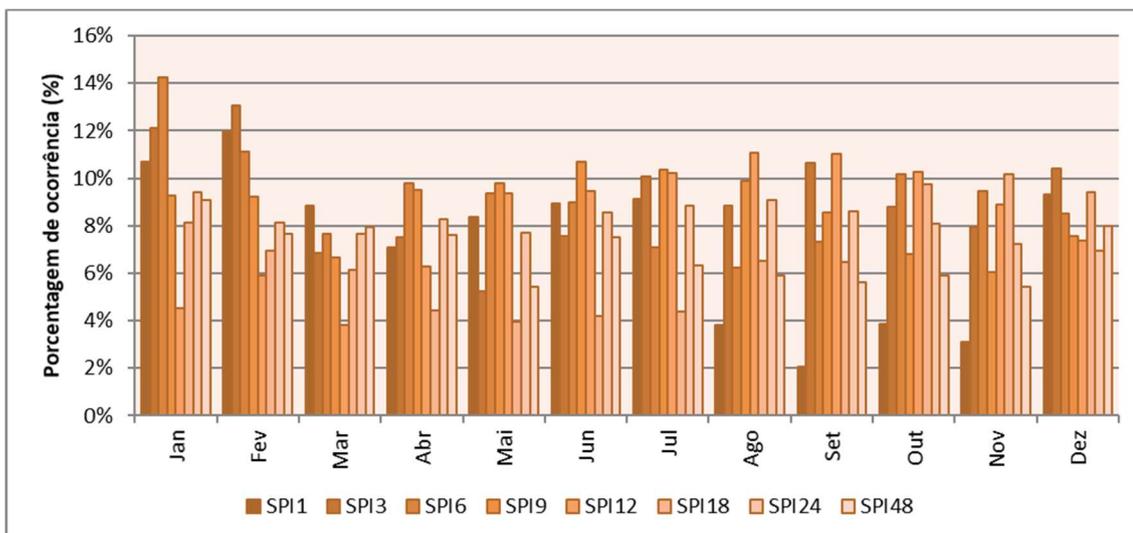


Gráfico 6– Porcentagem mensal de eventos moderadamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

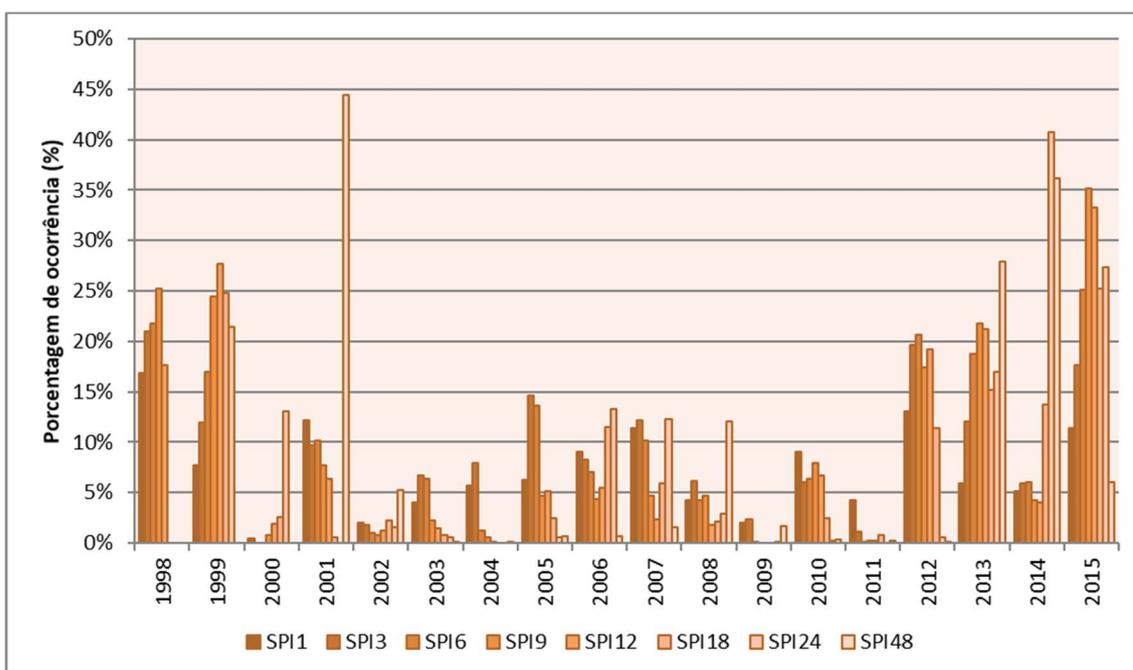


Gráfico 7– Porcentagem anual de eventos moderadamente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Os Gráficos 6 e 7 mostram a porcentagem mensal e anual de eventos moderadamente secos sobre o estado da Paraíba ao longo da série histórica. Realizando uma análise mensal, percebe-se o aumento considerável nas porcentagens de ocorrência de eventos moderadamente secos em comparação com os eventos extremamente e severamente secos. Através da análise mensal, percebe-se que os eventos moderadamente secos acontecem de maneira mais frequente

em análise de secas de curto-prazo, sendo o intervalo de dezembro a fevereiro, o intervalo com maior ocorrência de eventos moderadamente secos.

Realizando uma análise anual a respeito dos eventos moderadamente secos, percebe-se maior ocorrência de secas de médio-prazo ao longo dos 18 anos e a menor ocorrência de porcentagens nulas ao longo da série. Os anos de 1998, 1999, 2012, 2013, 2014 e 2015 foram os anos que tiveram as maiores porcentagens de ocorrência de eventos moderadamente secos. Continuando com a análise temporal dos eventos secos sobre o estado da Paraíba, fez-se uma análise análoga para os eventos suavemente secos, assim como mostrado nos Gráficos 8 e 9.

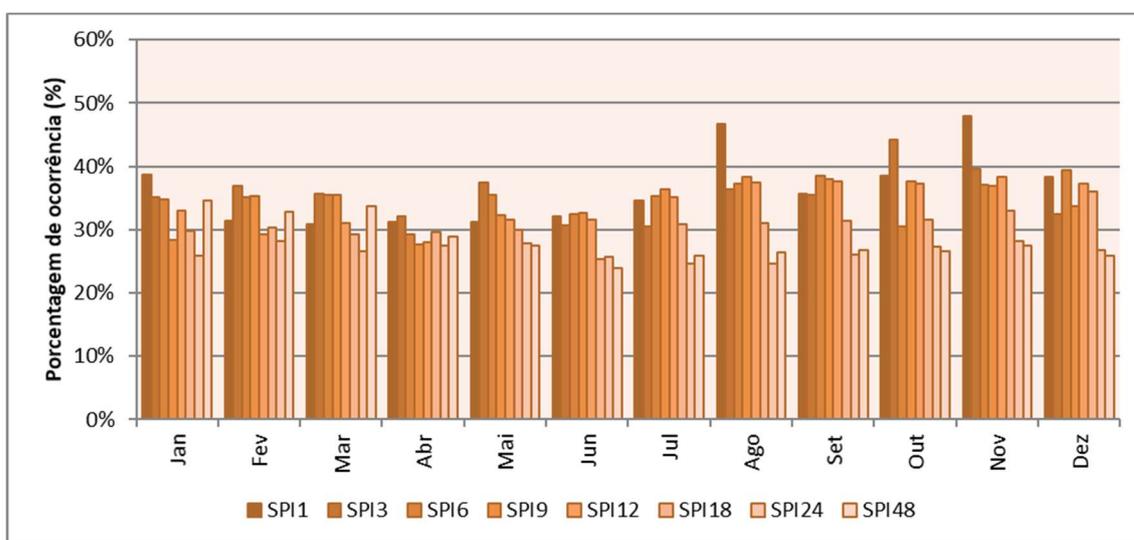


Gráfico 8– Porcentagem mensal de eventos suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

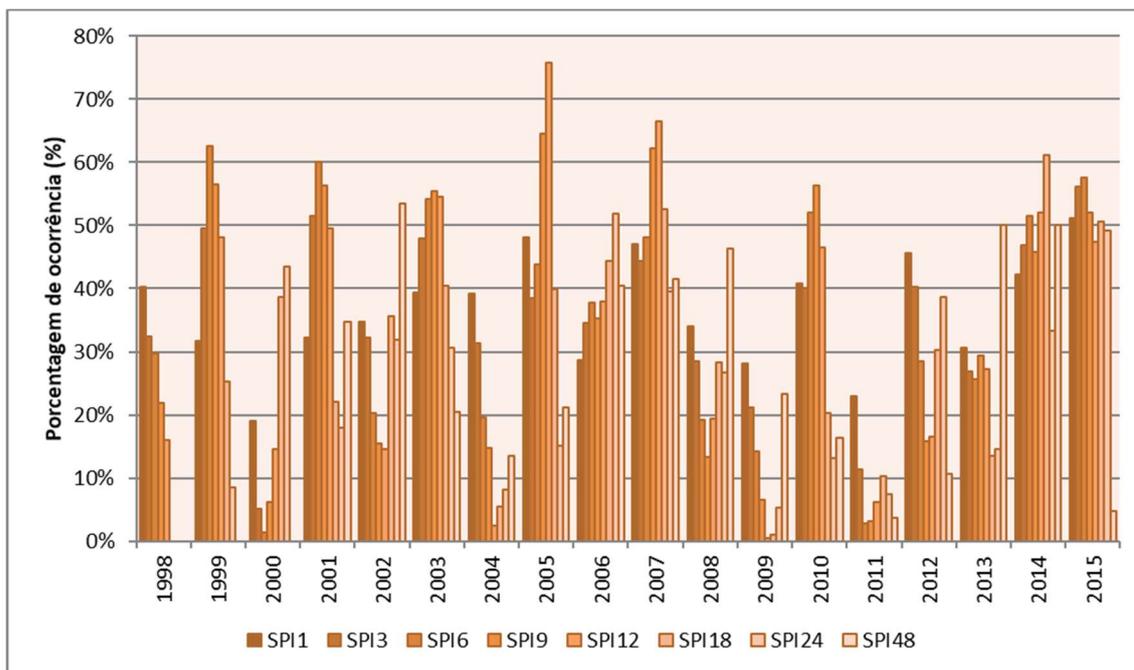


Gráfico 9– Porcentagem anual de eventos de suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Os eventos suavemente secos foram os que apresentaram as maiores porcentagens de ocorrência tanto em escala mensal quanto em escala anual. Em escala mensal, os eventos suavemente secos aconteceram de maneira mais significativa quando da análise de secas de curto-prazo, sendo os meses de agosto a novembro os que apresentaram as maiores porcentagens de ocorrência. Realizando uma análise anual, percebe-se que em todos os anos aconteceram eventos suavemente secos, visto que não existem porcentagens nulas de ocorrência ao longo da série temporal.

Ainda sobre a análise anual, percebe-se maior ocorrência de eventos suavemente secos na análise de seca de curto- e médio-prazo, sendo os anos 2007, 2014 e 2015 os mais afetados com esse tipo de evento seco. Por fim, levando em consideração que foi feita a caracterização para todos os tipos de eventos secos, fez-se a análise análoga para todos esses eventos secos, realizando a soma das porcentagens de todos os tipos de eventos citados anteriormente. Os resultados estão listados nos Gráficos 10 e 11 e mostram a porcentagem mensal e anual de eventos secos sobre o estado da Paraíba ao longo da série temporal estudada.

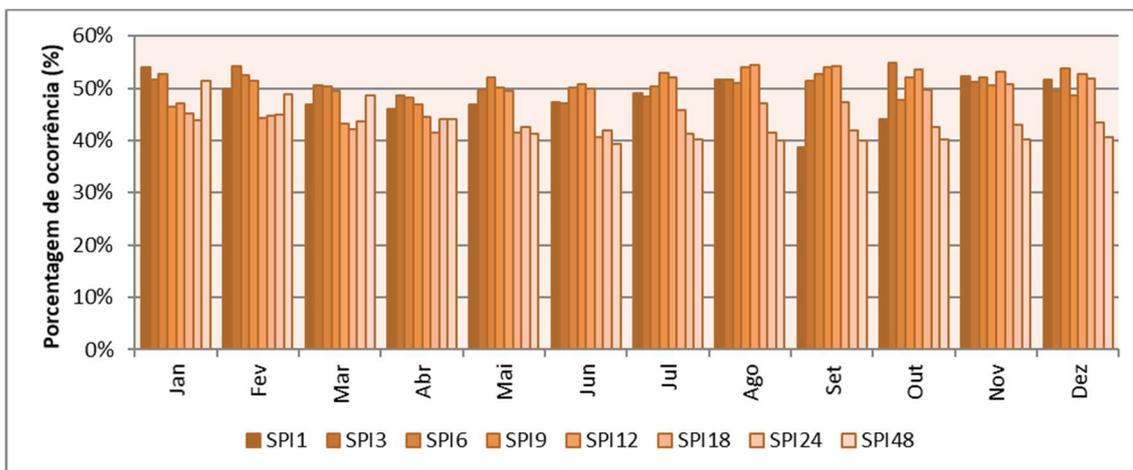


Gráfico 10– Percentagem mensal de eventos secos sobre a Paraíba (1998–2015)

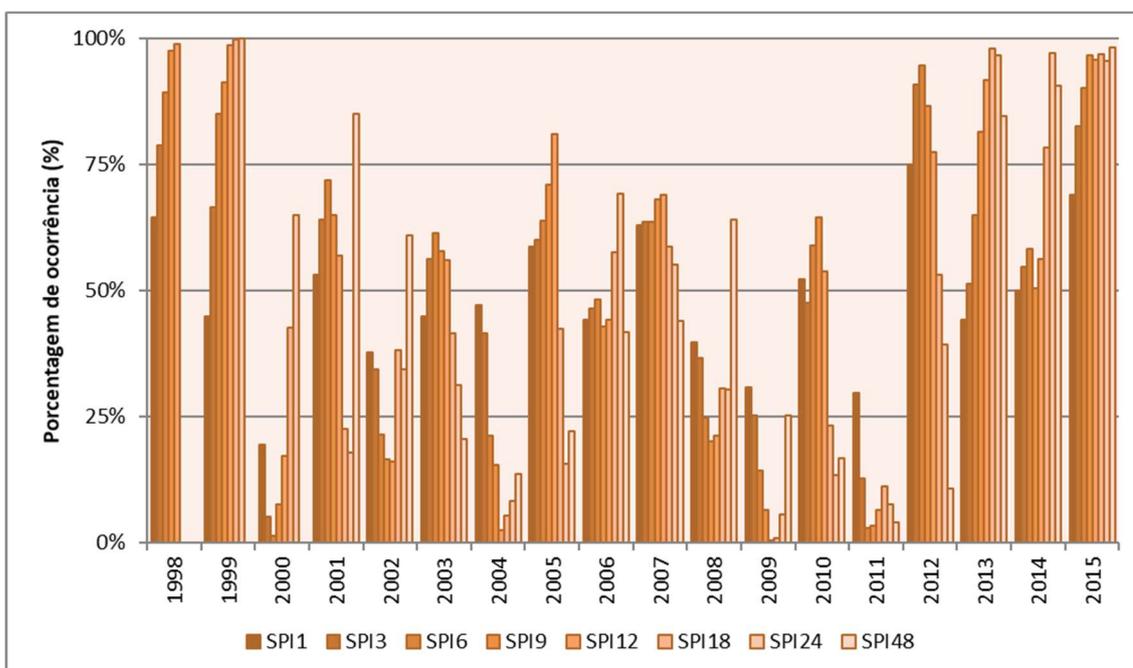


Gráfico 11– Percentagem anual de eventos secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Os Gráficos 10 e 11 mostram a percentagem dos eventos secos em escala mensal e anual sobre a Paraíba. Realizando uma análise mensal, percebe-se que as maiores percentagens de eventos secos acontecem em secas de curto- e médio-prazo, enquanto que as menores percentagens de ocorrência de eventos secos acontecem em secas de longo-prazo. No entanto, vale à pena ressaltar que as percentagens de eventos secos mostrados nos referidos gráficos anteriores são resultado da soma das percentagens de todos os tipos de eventos secos, i.e., eventos suavemente, moderadamente, severamente e extremamente secos para cada índice SPI.

Dessa forma, confirma-se que apesar que os níveis de ocorrências dos eventos secos sejam maiores para análises de curto- e médio-prazo, as secas de maior intensidade acontecem à medida que o intervalo de análise da seca aumenta. Ainda em relação à análise mensal, percebe-se que os meses de agosto, setembro e outubro são os mais atingidos por secas de médio-prazo, enquanto que os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro são os mais atingidos pelas secas de curto-prazo. Para análise anual, percebe-se que os anos de 1998, 1999, 2012, 2013, 2014 e 2015 foram os anos que apresentaram as maiores porcentagens de eventos secos da série temporal, sendo esse último o ano com as maiores porcentagens de eventos secos para todos os tipos de seca, sejam elas de curto-, médio- ou longo-prazo.

Tendo realizado a análise temporal em escala mensal e anual dos eventos secos que atingiram a área de estudo, uma análise espacial das porcentagens de eventos secos é apresentada na Figura 24, de modo que, para cada série SPI (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24, SPI-48) de cada um dos 187 *grid*, foi realizada uma análise de porcentagem para cada série de SPI, de forma análoga ao que foi feito no Gráfico 1 para a série de precipitação mensal média para toda a área de estudo.

De acordo com as porcentagens de ocorrência de cada tipo de evento seco para cada índice SPI analisado ao longo de todas as séries temporais apresentadas na Figura 24, observa-se que para o SPI-1, por exemplo, na maior parte da Paraíba, cerca de 30% dos eventos que aconteceram de 1998 até 2015 foram eventos suavemente secos. Isso significa que dentro dos 216 meses (1998–2015), cerca de 60 meses tiveram valor de SPI maior ou igual a -1.0 e menor ou igual a 0.0 , i.e., o valor de 30%.

A análise segue de maneira análoga para as demais classificações e demais índices SPI. Para o SPI-48, por exemplo, nota-se que principalmente na região da Borborema, houve uma alta porcentagem de eventos extremamente secos, totalizando valores próximos aos 8%. Para esse índice SPI, dos 169 meses (216 – 47), mais do que 10 eventos que aconteceram tiveram valor de SPI menor que -2.0 .

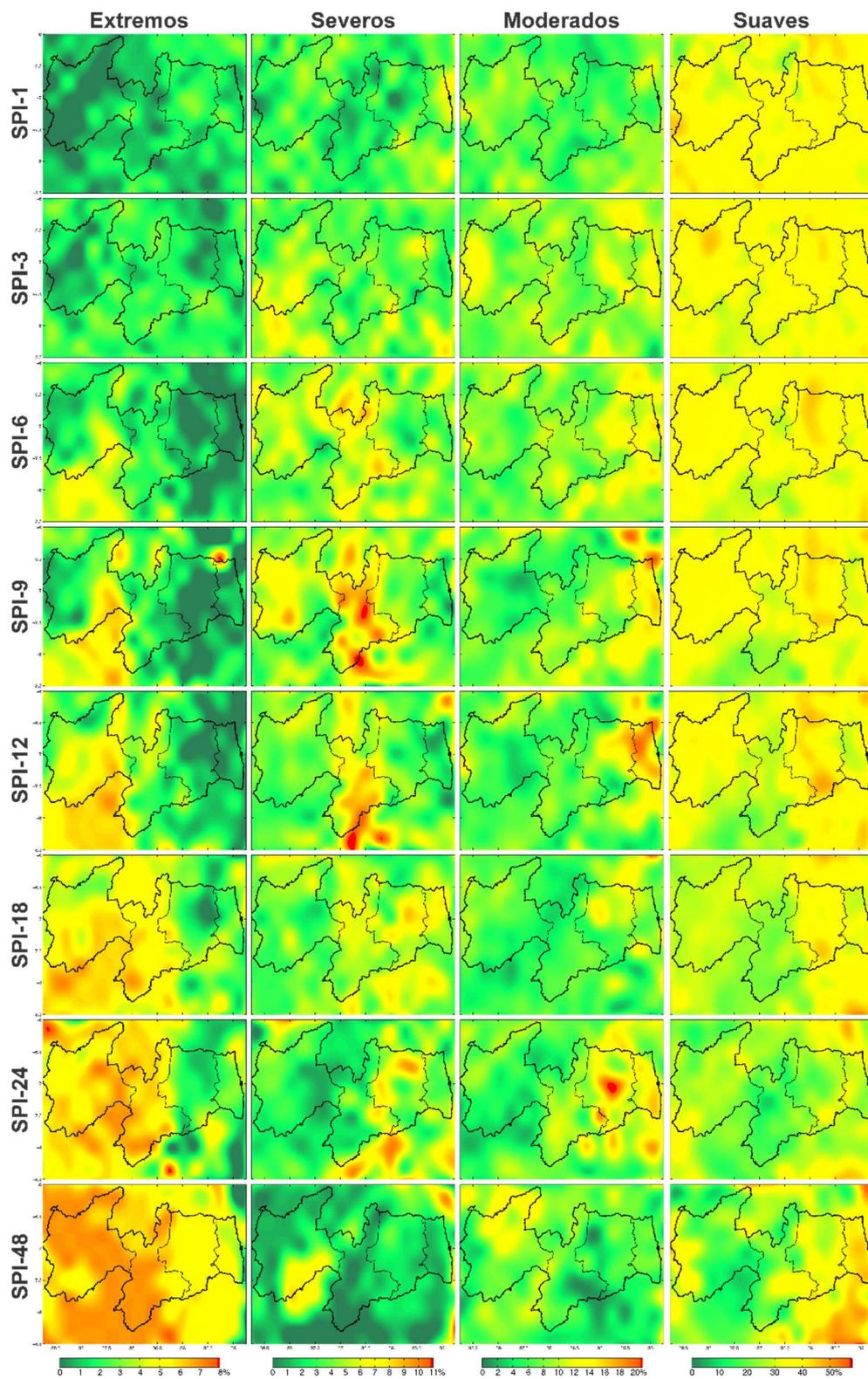


Figura 24– Porcentagem de ocorrência para cada tipo de evento seco (extremo, severo, moderado e suave) para cada índice SPI sobre a Paraíba (1998–2015)

Visando uma total caracterização dos eventos secos que atingiram a Paraíba, foi desenvolvida uma classificação alternativa que caracteriza o tipo de seca que afetou determinada região (curto-, médio- e longo-prazo) dependente do tipo de evento seco (extremo, severo, moderado e suave) que está sendo analisado. Utilizando a probabilidade cumulativa global, apresentada na curva de distribuição normal do SPI (Figura 7), como porcentagem limite para determinar qual região tinha sido ou não afetada pela seca, realizou-se a caracterização da seca que atingiu determinada região, de acordo com o tipo de evento seco.

Para eventos suavemente secos, por exemplo, qualquer *grid* que obtivesse porcentagem de ocorrência de qualquer tipo de seca (curto-, médio- ou longo-prazo) superior a 34% ao longo da sua série temporal, revelaria que aquele evento seco foi superior ao que era esperado de acordo com a distribuição normal da curva SPI e que, portanto, aquela quadrícula seria afetada pela determinada seca.

Para os eventos extremamente secos, por exemplo, ao analisar a série do SPI-1 de uma determinada quadrícula, se a porcentagem de eventos extremamente secos encontrados fosse superior a 2% (i.e., 5 vezes dentro de 216 meses analisados), isso significa que essa determinada quadrícula foi afetada pela seca de curto-prazo, ao se analisar os eventos extremamente secos.

Dessa maneira, seguiu-se uma ideia análoga para todas as outras classificações e para cada índice SPI analisado, resultando na Figura 25. A Figura 25 representa uma espécie de resumo da Figura 24, visto que, sabendo-se as probabilidades cumulativas globais e a porcentagem de ocorrência de cada tipo de evento seco, em cada quadrícula, para cada índice SPI (Figura 24), as regiões que apresentam porcentagens de ocorrência superiores às probabilidades pré-definidas são identificadas.

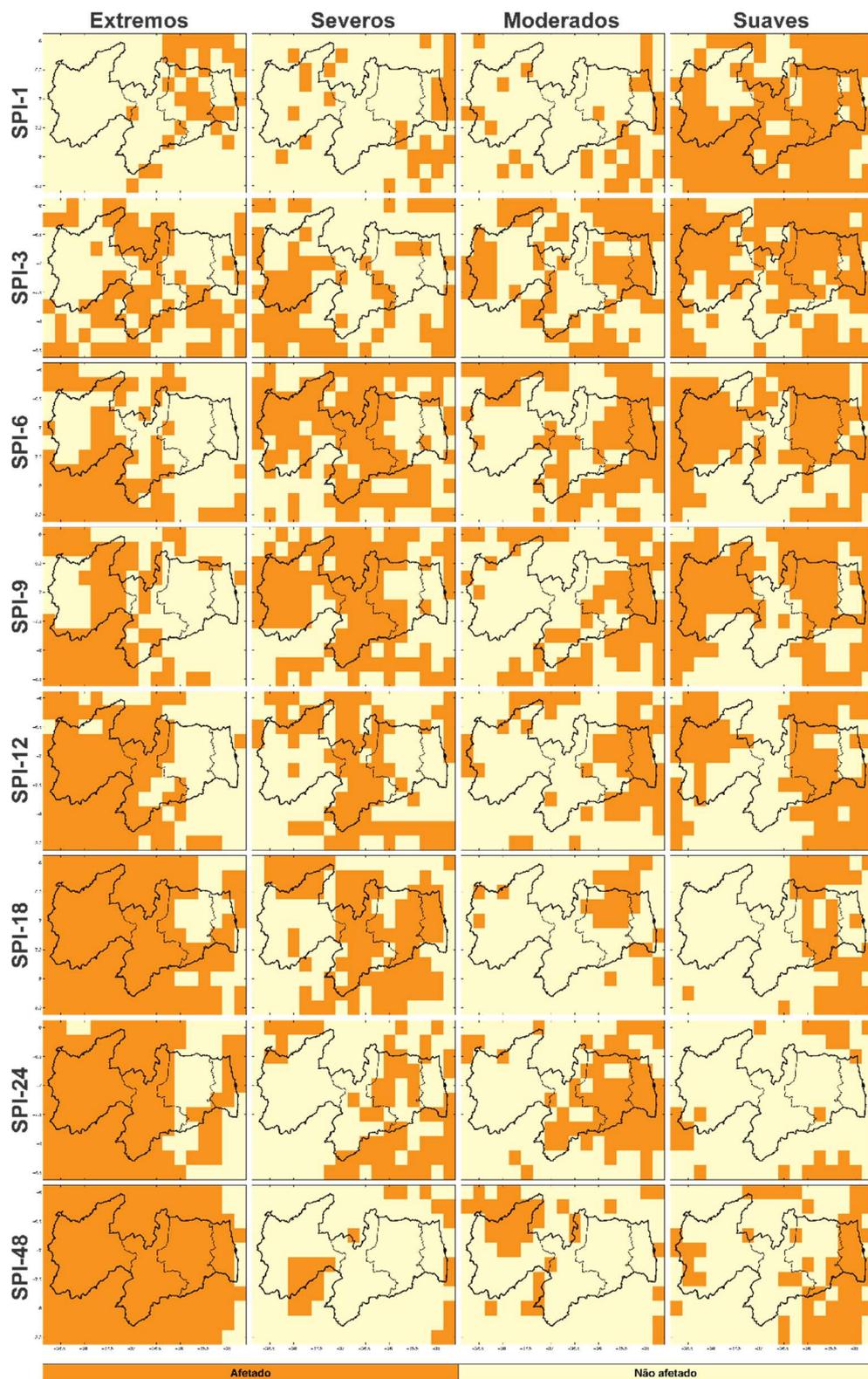


Figura 25– Distribuição espacial das áreas afetadas por secas (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48) para eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

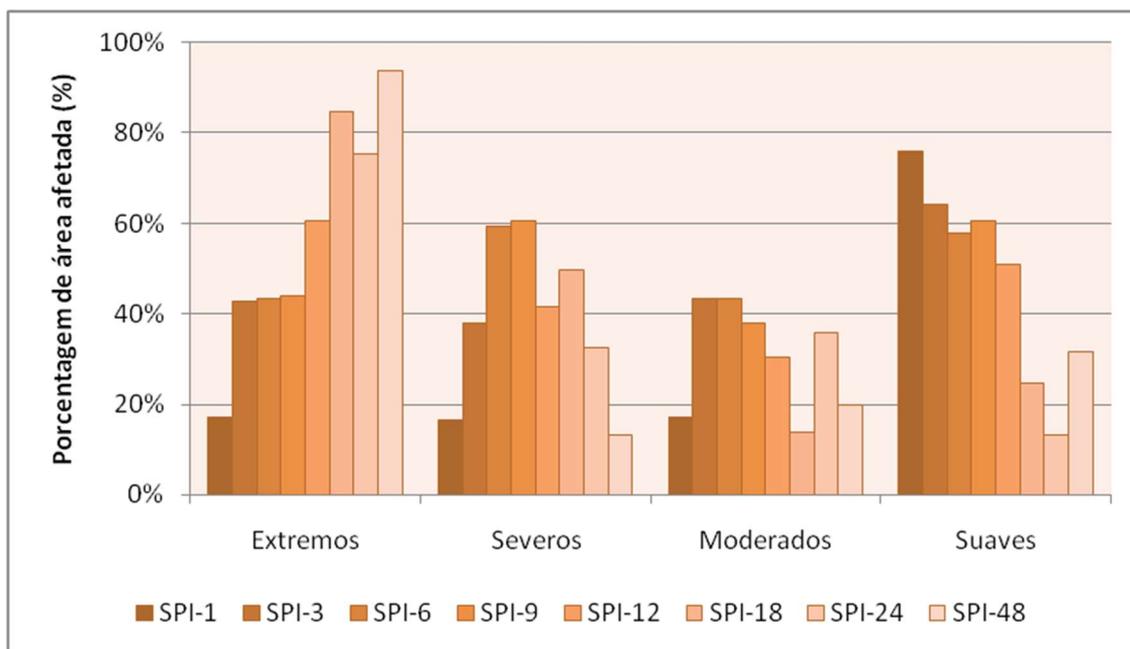


Gráfico 12– Porcentagem de área afetada por secas (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18, SPI-24 e SPI-48) para eventos extremamente, severamente, moderadamente e suavemente secos sobre a Paraíba (1998–2015)

Assim, a Figura 25 mostra a distribuição espacial das áreas afetadas por secas de curto-, médio- e longo-prazo para todos os tipos de eventos secos. O Gráfico 12 mostra o percentual da área afetada por cada índice SPI com relação a determinado tipo de evento seco. Através dos resultados, percebe-se que as secas de longo-prazo atingem a Paraíba de maneira mais significativa, tal que para os eventos extremamente secos, os índices SPI-18, SPI-24 e SPI-48 afetaram mais do que 75% da região.

As secas de médio-prazo, por sua vez, mantiveram basicamente o mesmo comportamento, afetando mais que 50% da região estudada para todos os tipos de eventos secos, a exceção da análise para eventos moderadamente secos. Já as secas de curto-prazo afetaram a Paraíba de maneira mais significativa quando analisados os eventos suavemente secos. Mais uma vez, percebe-se que à medida que se aumenta o intervalo de análise da seca, i.e., de curto- para longo-prazo, maior é a severidade dos eventos secos que atingem a região.

Unificando os resultados produzidos pela Figura 25, criou-se uma classificação que une todas as informações de maneira mais eficaz. Através da classificação CML (Curto-, Médio-, Longo-Prazo), pode-se caracterizar quais regiões foram atingidas por quais tipos de secas para determinado tipo de evento seco. Por exemplo, analisando os eventos extremamente secos,

qualquer quadrícula que fosse afetada simultaneamente por secas de curto-, médio- e longo-prazo, foi classificada como CML. Seguindo o mesmo raciocínio, a quadrícula que foi afetada exclusivamente por secas de curto- e médio-prazo foi classificada como CM. Desse modo, analisando os diferentes tipos de eventos secos, i.e., eventos suavemente, moderadamente, severamente e extremamente secos, pode-se realizar uma caracterização do comportamento das secas que afetaram a Paraíba ao longo da série histórica.

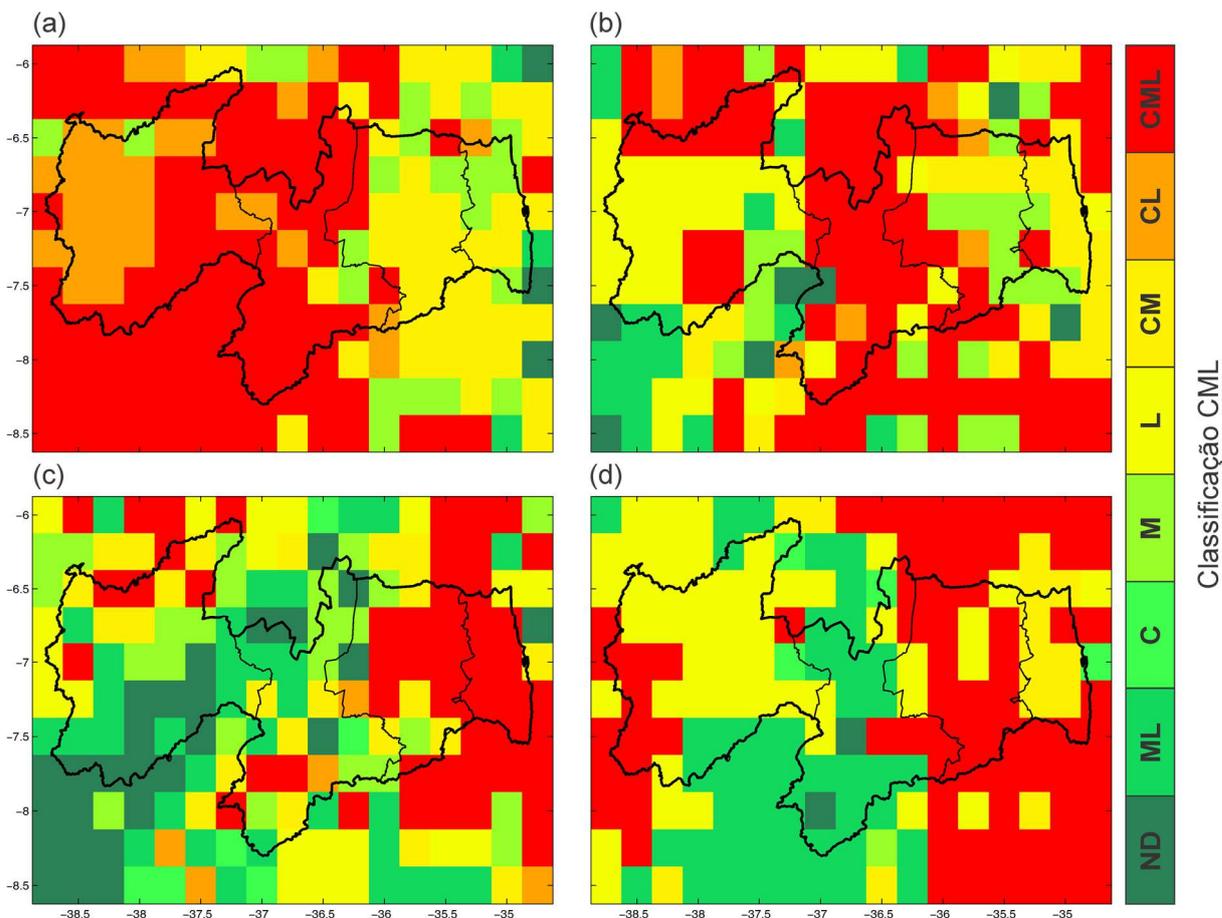


Figura 26– Distribuição espacial das secas (C-curto, M-médio e L-longo) sobre o estado da Paraíba (1998–2015) para eventos (a) extremamente, (b) severamente, (c) moderadamente e (d) suavemente secos

A Figura 26 mostra a classificação CML para cada tipo de evento seco. Para a condição de eventos extremamente secos, percebeu-se que grande parte da região foi atingida pela classificação CML; isso traz o resultado de que, analisando os eventos extremamente secos, a maior parte do estado da Paraíba foi atingida de maneira significativa por secas de curto-, médio- e longo- prazo. As regiões do litoral e do Agreste paraibano foram as mais atingidas por eventos extremamente secos analisando secas de curto- e longo-prazo, enquanto que a região da

Borborema foi mais atingida por secas do tipo CML e a porção oeste do Sertão paraibano sofreu com secas do tipo ML.

Desse modo, conclui-se que as secas mais extremas tendem a acontecer de maneira mais significativa à medida que se aumenta o intervalo de análise da seca, visto que os eventos de longo-prazo (SPI-18, SPI-24 e SPI-48) obtiveram porcentagens de ocorrência de eventos extremamente secos superiores ao mínimo estabelecido em quase todos os pontos da grade TRMM. Fazendo um paralelo com a definição de área afetada ou não, percebe-se que a Figura 26a representa a união dos resultados obtidos na primeira coluna da Figura 25, de onde se percebe que realmente grande parte da Paraíba foi realmente atingida por secas de curto-, médio- e longo-prazo.

Analisando os eventos severamente secos, percebeu-se que a maior parte da região foi atingida por secas de curto-, médio- e de longo-prazo. No entanto, houve maior distribuição entre as classificações existentes ao analisar o comportamento dos eventos severamente secos. O litoral paraibano foi marcado por secas de curto- e longo-prazo, o Agreste foi marcado por secas de longo-prazo, o Sertão foi marcado por secas de médio- e longo-prazo e a região da Borborema foi mais uma vez atingida por secas de curto-, médio- e longo-prazo. Conclui-se com esses resultados que a região da Borborema é a mesorregião da Paraíba mais afetada pelos eventos secos extremos e severos, com níveis de ocorrência superior ao esperado em análises de seca de curto-, médio- e longo-prazo.

Analisando os eventos moderadamente secos, percebe-se que a maior parte do estado da Paraíba foi atingida por secas de curto-prazo e alguns pontos também foram atingidos por secas de médio- e longo-prazo. As regiões do litoral e do Agreste paraibano foram fortemente atingidas por secas do tipo CML, enquanto o Sertão e o Agreste não mostraram nenhuma região fortemente marcada por determinado tipo de seca. Além do mais, percebe-se, através da Figura 25, que houve aumento considerável de *grids* que não apresentaram valores significantes de níveis de ocorrência. Esse resultado traz à tona o fato de que para a região demarcada pela classificação ND, não houve porcentagem de ocorrência de eventos moderadamente secos superiores ao mínimo estabelecido pela curva de distribuição normal do SPI, que é em torno de 9%.

Analisando os eventos suavemente secos, percebe-se que basicamente toda a região do litoral e do Agreste paraibano foi atingida por secas de curto-, médio- e longo-prazo, enquanto

que a região da Borborema foi atingida por secas exclusivamente curtas e o Sertão por secas de curto- e médio-prazo. Ainda a respeito da classificação CML, fez-se a contabilidade e a discriminação da porcentagem de pontos da grade TRMM que foram atingidos por cada tipo de seca (curto-, médio- e longo-prazo) para cada classificação de evento seco (extremo, severo, moderado e suave).

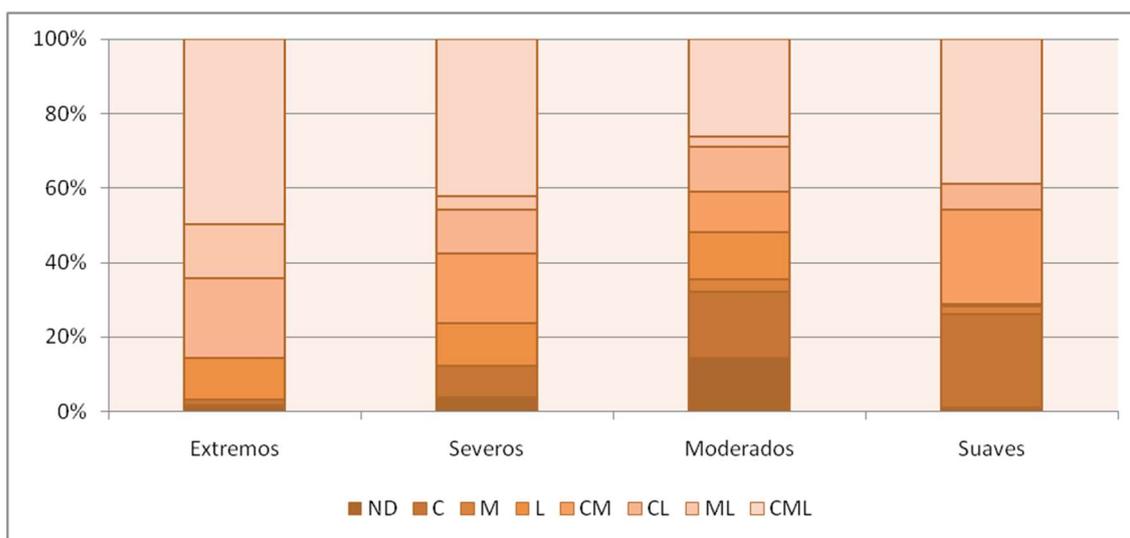


Gráfico 13– Porcentagem de pontos da grade TRMM afetados por cada classificação CML para cada tipo de evento seco sobre a Paraíba (1998–2015)

O Gráfico 13 mostra a porcentagem de ocorrência de cada classificação CML para cada tipo de evento seco. Os resultados mostram que analisando os eventos extremamente secos, há maior ocorrência de eventos do tipo CML, revelando que cerca de 50% da região foi atingida por secas de curto-, médio- e longo-prazo. Percebe-se também ao se somar todas as classificações que incluem secas de longo-prazo, i.e., L, CL, ML e CML, que quase toda a região foi atingida por esse tipo de seca, revelando desse modo, que para maiores intervalos de análise de seca, há maior ocorrência de eventos extremamente secos.

Em relação aos eventos severamente secos, os resultados mostram diminuição da ocorrência de secas de curto-, médio- e longo-prazo atuando de maneira simultânea nas mesmas regiões. Para esse tipo de evento seco, houve aumento considerável no tipo de seca CM, mas ainda assim, cerca de 130 das 187 quadrículas ainda foram atingidas por secas de longo-prazo, revelando uma diminuição no percentual de ocorrência de cerca de 97% para cerca de 63% dos pontos atingidos por eventos severamente secos em análise de longo-prazo.

Em relação aos eventos moderadamente secos, percebe-se que houve uma diminuição ainda mais significativa nas secas do tipo CML, chegando a valores próximos dos 26%. Para esse tipo de evento seco, percebe-se uma mudança no cenário da classificação CML não só pelo aumento considerável da classificação ND como também pelo aumento considerável da ocorrência de secas exclusivamente de curto-prazo, de modo que a região estudada passou a ser atingida em cerca de 67% (classificações C, CM, CL, CML) das ocorrências totais por secas de curto-prazo.

Em relação aos eventos suavemente secos, percebe-se que apesar de haver diminuição do percentual de classificação ND e aumento do percentual da classificação CML, as secas de curto- e médio-prazo passam a ter maiores níveis percentuais, tal que as secas de curto-prazo afetaram quase toda a área de estudo e as secas de médio-prazo afetaram quase 70% da área de estudo. Os resultados confirmam que os eventos moderadamente e suavemente secos acontecem de maneira mais significativa ao analisar as secas de curto- e médio-prazo, enquanto que, a partir do momento em que se aumenta o intervalo de análise da seca, começam a aparecer eventos secos mais severos com maiores níveis de ocorrência.

6. CONCLUSÃO

Analisando a precipitação, conclui-se que os anos com maiores níveis de precipitação foram os anos de 2000 e 2011, enquanto os anos de 1998 e 2012 foram os anos com os menores níveis pluviométricos. O primeiro semestre do ano é, em geral, o período mais chuvoso enquanto o segundo semestre é o período menos chuvoso, de modo que a variação dos meses menos chuvosos para os mais chuvosos vai de 0 a 300 mm mensais em média.

A região do Sertão paraibano apresenta níveis pluviométricos medianos, com valores que chegam próximos aos 1000 mm anuais. As regiões do Agreste e da Borborema são as regiões mais carentes de chuva e a região da Mata paraibana, localizada no litoral do estado da Paraíba, é a região que apresenta os maiores níveis pluviométricos, com níveis anuais médios que ultrapassam os 1300 mm.

Analisando a quantidade de dias secos, concluiu-se que os anos de 2000 e 2009 foram os anos com a menor quantidade de dias secos, com valores médios em torno de 280 dias secos ao longo do ano, enquanto os anos de 1998 e 2012 foram os anos com as maiores quantidades de dias secos, com quantidade média de dias secos equivalente a 320 dias. Os meses de janeiro, fevereiro e março são os meses com as menores quantidades de dias secos, com valores em

torno dos 20 dias ao longo de cada mês enquanto os meses de setembro, outubro e novembro foram os que apresentaram as maiores quantidades de dias secos, apresentando uma média em torno de 29 dias secos para cada mês.

A região litorânea apresenta as menores quantidades percentuais de dias secos de toda região com valores próximos aos 70%. A região do Sertão paraibano apresentou uma quantidade intermediária de dias secos e as regiões do Agreste e da Borborema foram as que apresentaram maiores quantidades de dias secos, com níveis que chegaram aos 85% do total possível. Além do mais, notou-se uma alta similaridade entre as análises de precipitação e as análises da quantidade de dias secos.

Adotando o SPI-1, SPI-3 e SPI-6 como uma análise de secas de curto-prazo, percebe-se que:

(a) quanto à análise de *clusters*, percebe-se que as distâncias de correlação são menores entre os *clusters* formados se comparados com as secas de médio- e longo-prazo. Para essa análise, há sempre um grande *cluster* que abrange as mesorregiões do Sertão e da Borborema e um outro *cluster* que abrange o Agreste e o litoral paraibano;

(b) para os eventos extremamente secos, tanto em uma análise mensal quanto em uma análise anual, não houve porcentagens de ocorrência significativas sobre a região estudada ao longo da série temporal. No entanto, apesar das baixas porcentagens de ocorrência desse tipo de evento ao longo dos anos, mais que 70% da região foi afetada realizando uma análise de secas de curto-prazo, sendo a região a oeste do Sertão paraibano a menos afetada por esse tipo de seca;

(c) para os eventos severamente secos, percebeu-se um aumento considerável da porcentagem de ocorrência desse tipo de evento em comparação com os eventos extremamente secos, principalmente no período entre abril e junho, em escala mensal, e para os anos de 1998, 2012 e 2015, em escala anual. Com mais de 80% da área afetada pelos SPI-1, SPI-3 e SPI-6, basicamente todas as mesorregiões foram afetadas por essas secas de curto-prazo, e a porcentagem de área afetada foi a maior dentre os outros tipos de seca analisados, i.e., secas de médio-prazo (64,71%) e secas de longo-prazo (68,98%);

(d) para os eventos moderadamente secos, percebeu-se maior representatividade desse tipo de evento principalmente em escala mensal, no período entre dezembro e fevereiro. Além

disso, assim como na análise para os eventos severamente secos, para os eventos moderadamente secos, a área afetada por secas de curto-prazo foi a maior dentre os outros tipos de seca, i.e., secas de médio-prazo (42,78%) e secas de longo-prazo (54,01%), e a região litorânea e do Agreste paraibano foram as mais atingidas por esse tipo de seca, ao se analisar os eventos moderadamente secos;

(e) para os eventos suavemente secos, houve uma considerável porcentagem de ocorrência principalmente nos meses de agosto a novembro e nos anos de 2014 e 2015. Além disso, basicamente todas as mesorregiões da Paraíba foram atingidas por secas de curto-prazo, com destaque para a região da Borborema, que foi atingida, em sua grande maioria, exclusivamente por secas de curto-prazo.

Adotando o SPI-9 e SPI-12 como uma análise de secas de médio-prazo, percebe-se que:

(a) quanto a análise de *clusters*, percebeu-se que o estado da Paraíba foi basicamente dividido basicamente em dois grandes grupos, um que compreende o Sertão paraibano e a região da Borborema, e outro que abrange basicamente toda a região do litoral e do Agreste paraibano. No entanto, para uma distância de correlação de 0,50, todo o estado da Paraíba apresenta basicamente o mesmo comportamento quanto a seca;

(b) para os eventos extremamente secos, percebeu-se um aumento das porcentagens de ocorrência desse tipo de evento, quando comparados com a análise para as secas de curto-prazo, principalmente no intervalo mensal de janeiro a março. No entanto, analisando as secas de médio-prazo, apenas cerca de 60% da região foi atingida por secas de médio-prazo, sendo a região do litoral e do Agreste, as menos atingidas por esse tipo de seca ao se analisar os eventos extremamente secos;

(c) para os eventos severamente secos, as maiores porcentagens de ocorrência aconteceram nos meses de abril, maio e junho e nos anos de 1998 e 2012. Mais uma vez, percebeu-se que enquanto as regiões do Sertão e da Borborema foram consideravelmente atingidas por esse tipo de seca, grande parte da região litorânea e o Agreste paraibano não foram significativamente atingidos por esse tipo de seca;

(d) para os eventos moderadamente secos, percebeu-se que junho, julho e agosto são os meses em que esses eventos aconteceram com maior frequência. Em uma análise anual, percebeu-se que esses foram os eventos com maior ocorrência ao longo dos 18 anos analisados

de uma maneira geral. Diferente do que aconteceu ao se analisar os eventos extremamente e severamente secos, a região litorânea e o Agreste paraibano, dessa vez, foram consideravelmente atingidas por secas de médio-prazo, enquanto o Sertão e a Borborema, não foram;

(e) para eventos suavemente secos, em todos os meses a porcentagem de ocorrência foi sempre superior a 30%, e em se tratando da análise anual, houve ocorrência significativa desse tipo de evento nos anos de 2005 e 2007, ocorrendo em mais do que 60% sobre toda a área de estudo. De maneira geral, a exceção da região da Borborema e uma porção do litoral, todas as regiões foram afetadas por secas de médio-prazo.

Adotando o SPI-18, SPI-24 e SPI-48 como uma análise de secas de longo-prazo, percebe-se que:

(a) quanto a análise de *clusters*, basicamente toda a área de estudo tende a se comportar da mesma maneira e a estar inserida em um grande *cluster*, o que revela que a Paraíba apresenta basicamente o mesmo comportamento das secas de longo-prazo, seja da região do Sertão até a Mata paraibana;

(b) para os eventos extremamente secos, houve a maior porcentagem de ocorrência se comparados aos outros índices SPI tanto em escala de análise mensal, quanto anual. Com destaque para o período de junho a dezembro e para o ano de 2015, basicamente todo o estado da Paraíba foi atingido por secas de longo-prazo, representando a maior porcentagem de ocorrência dentre os outros intervalos de análise de seca, i.e., secas de curto- e médio-prazo. Espacialmente, todas as mesorregiões foram consideravelmente atingidas por secas de longo-prazo ao longo dos 18 anos;

(c) para os eventos severamente secos, percebeu-se que ao longo dos meses, as porcentagens de ocorrência variaram consideravelmente dentre os índices analisados. Percebe-se também que a exceção do ano de 1999, os valores de porcentagem de ocorrência encontrados foram muito baixos, se comparados, por exemplo, com a análise dos eventos extremamente secos. À exceção da região do Sertão, todas as demais regiões foram significativamente atingidas por secas de longo-prazo;

(d) para os eventos moderadamente secos, os meses apresentaram comportamento bastante regular quanto à ocorrência de eventos moderadamente secos, e em se tratando da

análise anual, os anos de 2001, 2014 e 2015 foram anos em que esse tipo de evento ocorreu a níveis de porcentagem significativa. Quanto à análise espacial, percebeu-se que a região do litoral e do Agreste paraibano foram as mais atingidas por esse tipo de seca, mas que algumas outras regiões do Sertão e da Borborema também foram afetadas;

(e) para eventos suavemente secos, o segundo semestre do ano apresentou as menores porcentagens de ocorrência se comparados com secas de curto- e médio-prazo, e em escala anual, as porcentagens de ocorrência foram consideráveis nos últimos anos analisados. As regiões do Agreste, da Mata paraibana e o oeste do Sertão foram as mais afetadas por esse tipo de seca.

Por fim, conclui-se que foi possível realizar a caracterização da seca sobre o estado da Paraíba utilizando o índice SPI ao longo do período de 1998 a 2015, através de dados TRMM, para cada uma das 187 séries diárias que abrangem a área de estudo. Com este estudo, foram encontrados resultados valiosos que podem ser usados para adoção de políticas contra a seca, auxiliando o processo de tomada de decisões e de manejo dos recursos hídricos a fim de diminuir dos efeitos danosos que a seca possa causar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical table. New York: Dover, 1965.

AESA. Agência Executiva e de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado da Paraíba*, 2017.

ALI, A.F.; XIAO, C.; ANJUM, M.N.; ADNAN, M.; NAWAZ, Z.; IJAZ, M.W.; SAJID, M.; FARID, H.U. Evaluation and Comparison of TRMM Multi-Satellite Precipitation Products with Reference to Rain Gauge Observations in Hunza River Basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Sustainability*, v. 9, n. 11, 2017. doi: 10.3390/su9111954

ALLMETSAT. Disponível em: <http://pt.allmetsat.com>. Acesso em: nov. de 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: nov. de 2017.

ANA. Evolução da rede hidrometeorológica nacional. *Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica*, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2007. Disponível em:

<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/EvolucaoDaRedeHidrometeorologicaNacional.pdf>. Acesso em: nov. de 2017.

AQUAFLUXUS. Hidrologia, ciência aplicada que estuda o ciclo da natureza. Disponível em: <http://www.aquafluxus.com.br>. Acesso em nov. de 2017.

ASHRAF, M.; ROUTRAY, J. K. Spatio-temporal characteristics of precipitation and drought in Balochistan Province, Pakistan. *Natural Hazards*, v. 77, n. 1, p. 229-254, 2015. doi:10.1007/s11069-015-1593-1

BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Análise espacial da seca no estado da Paraíba em 2015 utilizando dados do satélite TRMM e SPI. *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v. 1. p. 1-8, 2017.

CLAUSEN, B.; PEARSON, C. P. Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, v. 173, n. 1-4, p. 111-130, 1995. doi: 10.1016/0022-1694(95)02713-Y

COSTA, S. G. F. *Análise espaço-temporal de chuvas na Paraíba utilizando estimativas do satélite TRMM*. 2017. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 2017.

COSTA, S. G. F.; BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação no Cariri paraibano utilizando dados do satélite TRMM. *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v. 1. p. 1-8, 2017.

EDWARDS, D. C.; MCKEE T. B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Atmospheric Science Paper*, n. 634, p. 1–30, 1997.

ENGESAT. Disponível em <http://www.engesat.com.br/>. Acesso em: nov. de 2017.

EPIPHANIO, J. C. N. Satélites de sensoriamento remoto. São José dos Campos: INPE, 2000. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/vcst/files/capitulo_2.pdf. Acesso em nov. de 2017.

FARHANGI M.; KHOLGHI M.; CHAVOSHIAN S. A. Rainfall Trend Analysis of Hydrological Subbasins in Western Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 142, n. 10, 2016. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001040

FARIAS, A. A.; SOUZA, J. T. A.; SOUSA, F. A. S. Identificação e análise de secas severas e extremas no município de Taperoá-PB. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 5, p. 818-826, 2014.

FORSDYKE, A.G. Previsão do tempo e clima. São Paulo, Melhoramentos/Edusp, p.60, 1969.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999.

HEIM, R. R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in The United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 1149–1165, 2002. doi: 10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007. doi: 10.1175/JHM560.1

HUSAK G. J., MICHAELSEN J., FUNK C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. *International Journal of Climatology*, v. 27, n. 7, p. 935–944, 2007. doi: 10.1002/joc.1441.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: nov. de 2017.

IONITA, M.; SCHOLZ, P.; CHELCEA, S. Assessment of droughts in Romania using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, v. 81, n. 3, p. 1483-1498, 2016. doi: 10.1007/s11069-015-2141-8

KUMMEROW, C.D.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, n. 1, p. 809-817, 1998. doi: 10.1175/1520-0426(1998)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2

LYRA, G. B.; GARCIA, B. I. L.; PIEDADE, S. M. S.; SEDIYAMA, G. C.; SENTELHAS, P. C. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no

Estado de Táchira, Venezuela. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 2, p. 205-215, 2006. doi: 10.1590/S0100-204X2006000200004

LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; ZERI M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014. doi:10.1002/joc.3926

MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SOUSA, F. A. S.; DANTAS, F. R. C. Analysis of the standardized precipitation index for the Paraíba state, Brazil. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010. doi: 10.4136/ambiente-agua.130

MARTINO, G.; FONTANA, N.; MARINI, G.; SINGH, V. P. Variability and Trend in Seasonal Precipitation in the Continental United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, n. 6, p. 630-640, 2013. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000677

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. *Eighth conference on applied Climatology. American Meteorological Society*, p. 17-186, 1993.

MOOI, E.; SARSTEDT, M. Cluster Analysis. In: *A Concise Guide to Market Research*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 237-284. doi: 10.1007/978-3-642-12541-6_9

MORAES, E. C. Fundamentos de sensoriamento remoto. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo_1.pdf. Acesso em nov. de 2017.

NANDINTSETSEG, B.; SHINODA, M. 2013. Assessment of drought frequency, duration, and severity and its impact on pasture production in Mongólia. *Natural Hazards*, v. 66, n. 2, p. 995-1008, 2013. doi: 10.1007/s11069-012-0527-4

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <https://pmm.nasa.gov/TRMM>. Acesso em: nov. de 2017.

NDMC. National Drought Mitigation Center. Disponível em: <http://drought.unl.edu/>. Acesso em: nov. de 2017.

NICHOLSON, S. E.; SOME, B.; McCollum, J.; NELKIN, E.; KLOTTER, D.; BERTE, Y.; DIALLO, B. M.; GAYE, I.; KPABEBA, G.; NDIAYE, O.; NOUKPOZOUNKOU, J. N.;

TANU, M. M.; THIAM, A.; TOURE, A. A.; TRAORE, A. K. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high density gauge dataset for West Africa. Part II: validation of TRMM rainfall products. *Journal of Applied Meteorology*, v. 42, n. 10, p.1355-1368, 2003. doi: 10.1175/15200450(2003)042%3C1355:VOTAOR%3E2.0.CO;2

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em http://www.noaanews.noaa.gov/stories2010/20100401_tiros.html. Acesso em nov. de 2017.

NÓBREGA R. S.; SOUZA, E. P. de; SOUSA, F. A. S. Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 1, n.1, p. 47-61, 2008.

PALMER, W.C. Meteorological drought. US Weather Bureau Res. N° 45. Washington, 58 p, 1965.

PASKA, J.; LAU, A. M. S.; TAN, M. L.; TAN, K. C. Evaluation of TRMM 3B42V7 product on extreme precipitation measurements over peninsular Malaysia. *Proc. SPIE 10421, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIX*, 2017. doi: 10.1117/12.2278185

PASSOS, J. S. A. *Variabilidade Espaço-Temporal da Precipitação do Alto São Francisco (Sub-40) Utilizando Dados do Sensor PR/TRMM*. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 2013.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013. doi: 10.21168/rbrh.v18n3.p139-148

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 1, p. 291-302, 2015. doi: 10.1002/joc.4345

ROSSATO, L.; MARENGO, J. A.; ANGELIS, C. F.; PIRES, L. B. M.; MENDIONDO, E. M. Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 36, p. 1-16, 2017. doi: 10.1590/2318-0331.0117160045

SALVADOR, M. A.; SANTOS, L. S. F. C. Análise da precipitação na cidade de São Paulo no período 1961-2009. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 7, n. 1, p. 7-20, 2010. doi: 10.5380/abclima.v7i0.25622

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009. doi: 10.1590/S0102-77862009000100004

SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; PASSOS, J. S. A.; SILVA, R. M. Drought assessment using a TRMM-derived Standardized Precipitation Index for the Upper São Francisco River basin, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 6, p. 1-19, 2017a. doi: 10.1007/s10661-017-5948-9

SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. M. M. Analysis of precipitation time series of urban centers of northeastern Brazil using wavelet transform. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, v. 6, n. 7, p. 845-850, 2012.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M.; BRASIL NETO, R. M. Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of the Brígida River basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 74, p. 54-66, 2017b. doi: 10.1016/j.jsames.2017.01.002

SAR/ANA. Banco de Dados Hidro. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/EvolucaoBrasil.pdf>. Acesso em: nov. de 2017.

SILVA, C. M. S.; LÚCIO, P. S.; SPYRIDES, M. H. C. Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélites e medidas por pluviômetros. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 3, p. 337-346, 2012. doi: 10.1590/S0102-77862012000300008

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; SILVA, V. C. L.; MEDEIROS, I. C. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, v. 77, n. 2, p. 1205-1221, 2015. doi: 10.1007/s11069-015-1644-7

SILVEIRA, A. L. L. O Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Comp.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS Ed., 1993. Cap. 2, p. 35-53.

SILVIA, L. P. Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente. Elsevier, Brasil, 2015.

SOARES, A. S. D.; DA PAZ, A. R.; PICCILLI, D. G. A. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 288-299, 2016. doi: 10.21168/rbrh.v21n2.p288-299

SPEI. The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. Disponível em: <http://spei.csic.es/>. Acesso em: nov. de 2017.

TAN, M. L.; CHUA V. P.; TAN, K. C.; BRINDHA, K. Assessment of TRMM 3B43 product for drought monitoring in Singapore. *Proc. SPIE 10421, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIX, 104210C*. doi: 10.1117/12.2278063

TEODORO, P.E.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; CUNHA, E. R.; CORREA, C. C. G.; TORRES, F. E.; BACANI, V. M.; GOIS, G.; RIBEIRO, L. P. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 128, n. 2, p. 197-209, 2016. doi: 10.1007/s00703-015-0408-y

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. WMO technical note number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, p 53, 1966.

THOMAS, T.; JAISWAL, R. K.; GALKATE, R.; NAYAK, P. C.; GHOSH, N. C. Drought indicators-based integrated assessment of drought vulnerability: a case study of Bundelkhand droughts in central India. *Natural Hazards*, v. 81, n. 3, p. 1627-1652, 2016. doi: 10.1007/s11069-016-2149-8

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 943 p., 2001.

UNITED STATES FEDERAL COUNCIL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. Committee for Scientific Hydrology, 1962.

USGS. United States Geological Survey. Disponível em: <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>. Acesso em: nov. de 2017.

VARIKODEN, H.; PREETHI, B.; REVADEKAR, J. V. Diurnal and spatial variation of Indian summer monsoon rainfall using tropical rainfall measuring mission rain rate. *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 248-258, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.056

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1975.

WAGNER, P. D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, v. 464-465, p. 388-400, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.026

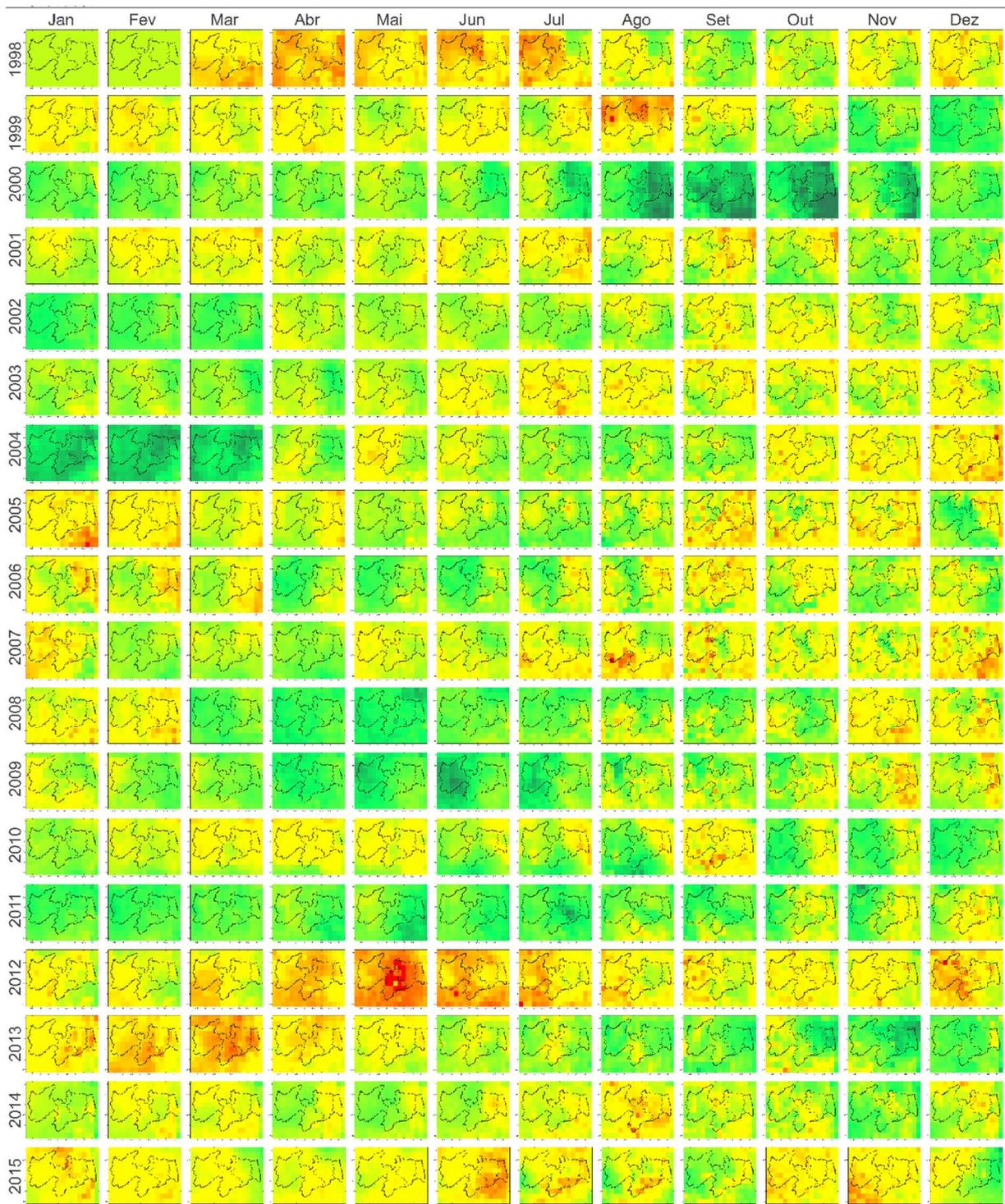
WAMBUA, R. M.; MUTUA, B. M.; RAUDE, J. M. Spatio-temporal Drought Characterization for the Upper Tana River Basin, Kenya Using Standardized Precipitation Index (SPI). *World Journal of Environmental Engineering*, v. 3, n. 4, p. 111-120, 2015. doi: 10.12691/wjee-3-4-2

WANG, K.-Y.; LI, Q.-F.; YANG, Y.; ZENG, M.; LI, P.-C.; ZHANG, J.-X. Analysis of spatio-temporal evolution of droughts in Luanhe River basin using different drought indices. *Water Science and Engineering*, v. 8, n. 4, p. 282-290, 2015. doi: 10.1007/s11069-014-1507-7

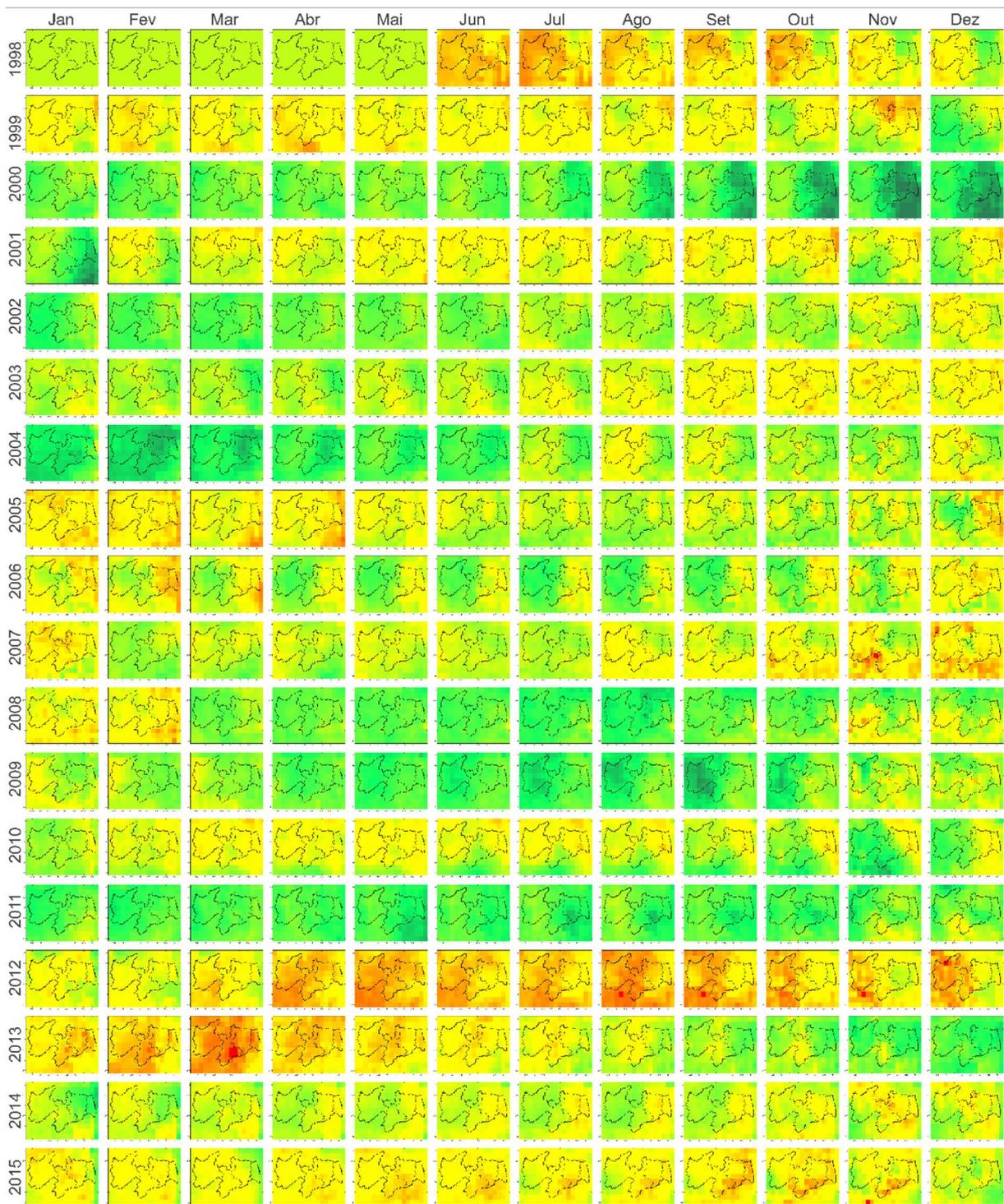
WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, v. 10, n. 3, p. 111-120, 1985. doi: 10.1080/02508068508686328

WMO. World Meteorological Organization. Standardized Precipitation Index User Guide, (WMO-No. 1090), Geneva, 2012. Disponível em: Disponível em: www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf. Acesso em nov. de 2017.

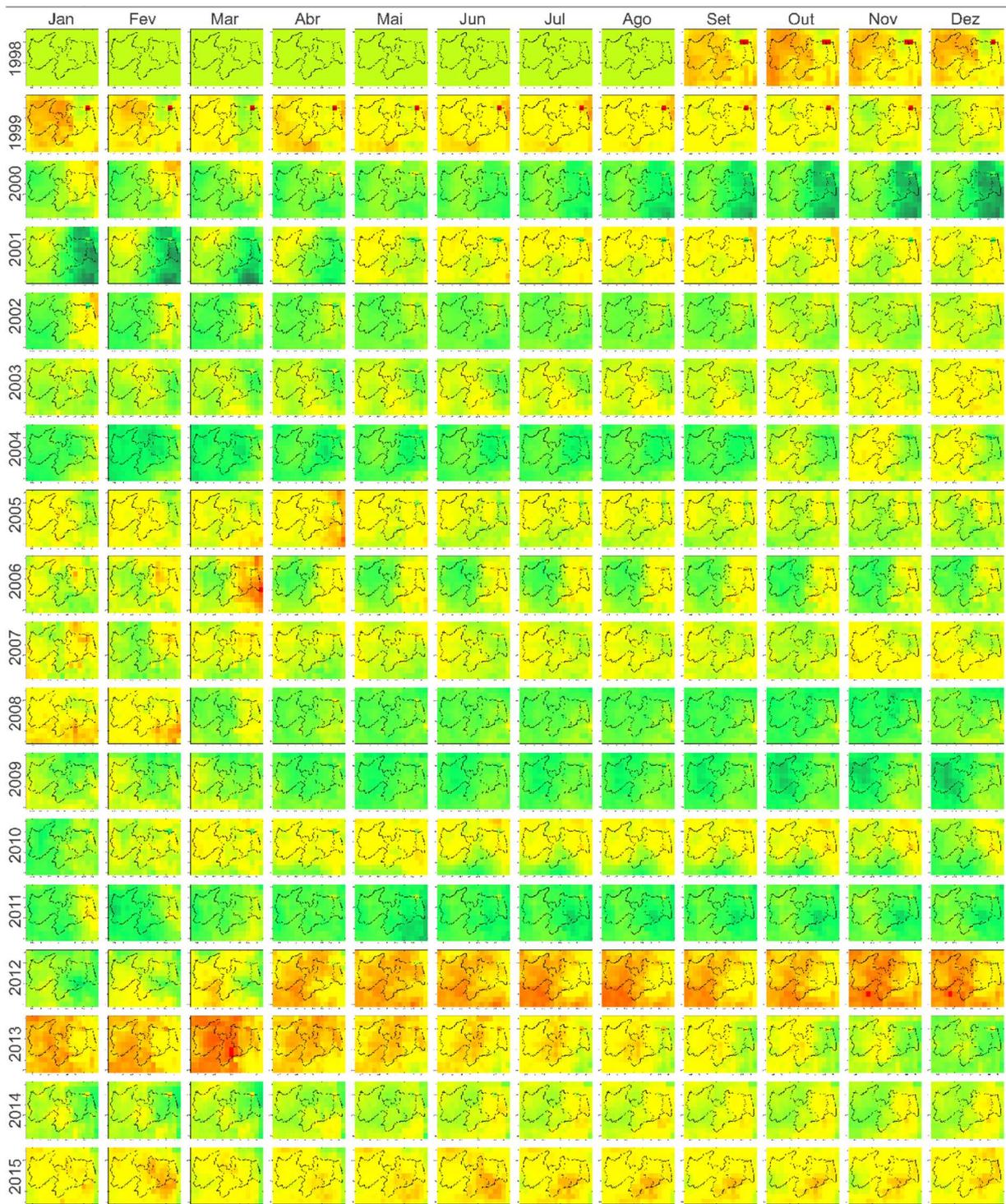
ANEXO
COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DOS ÍNDICES SPI



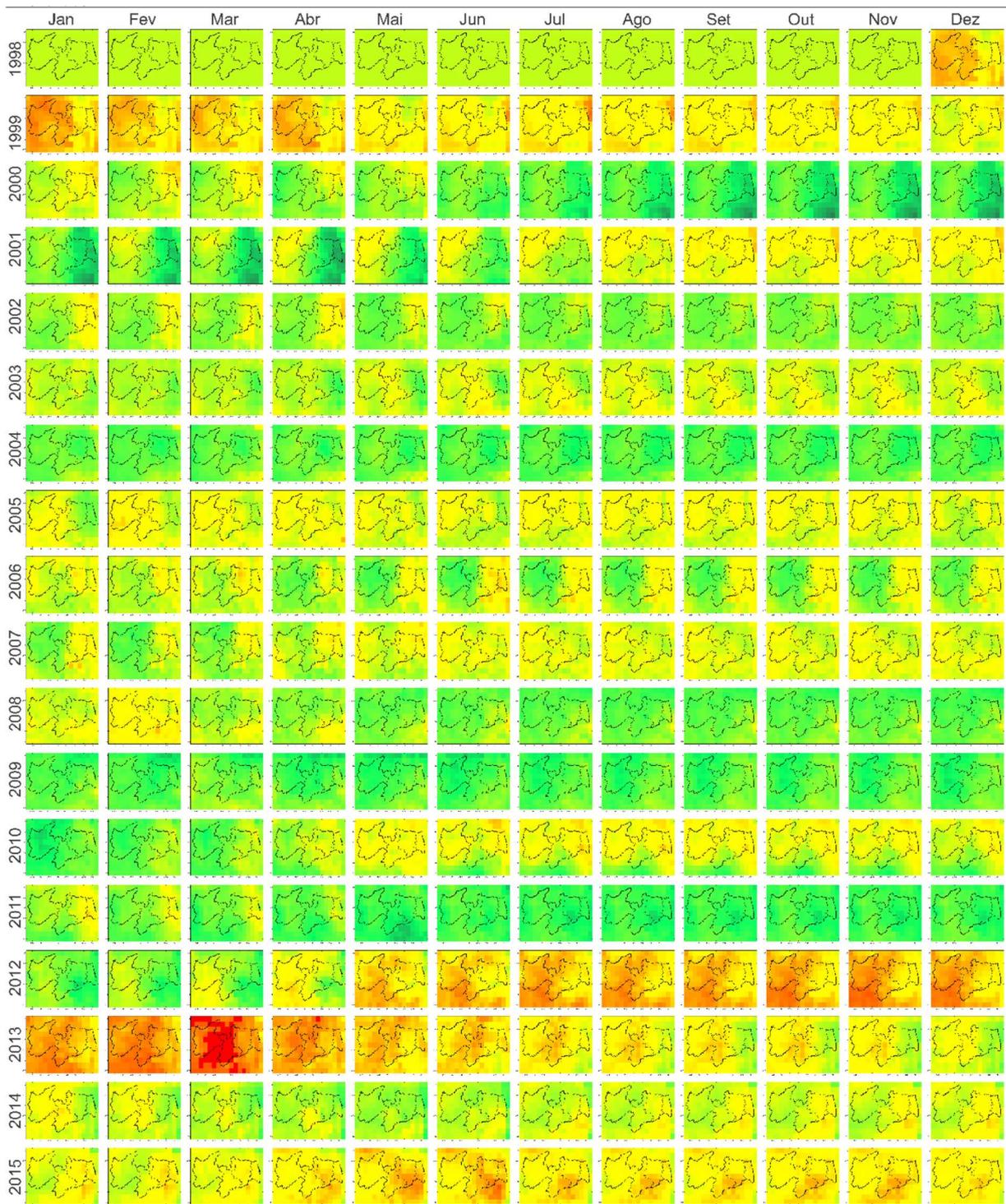
Anexo A1 – Distribuição espaço-temporal do SPI-3 sobre a Paraíba (1998–2015)



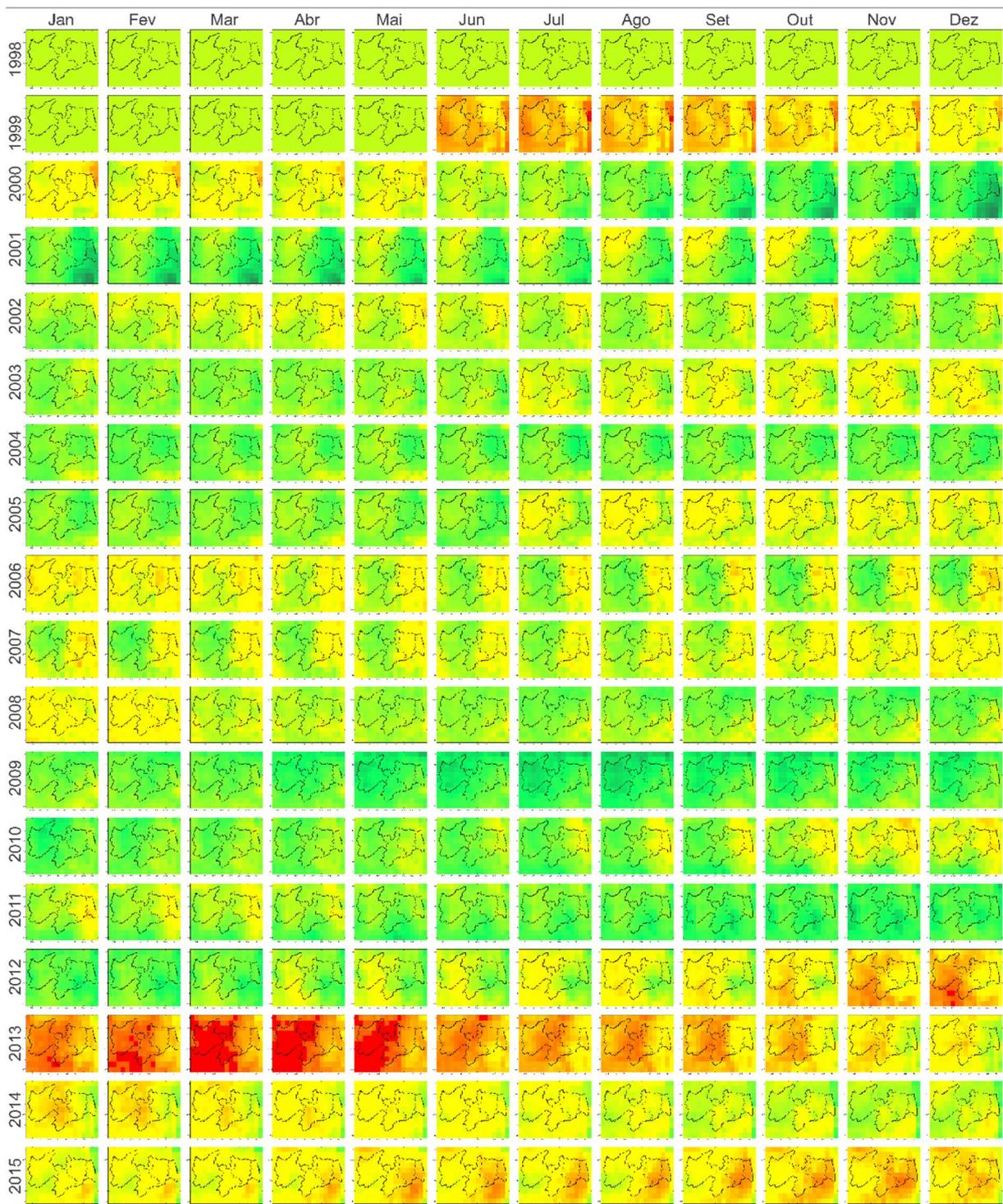
Anexo A2 – Distribuição espaço-temporal do SPI-6 sobre a Paraíba (1998–2015)



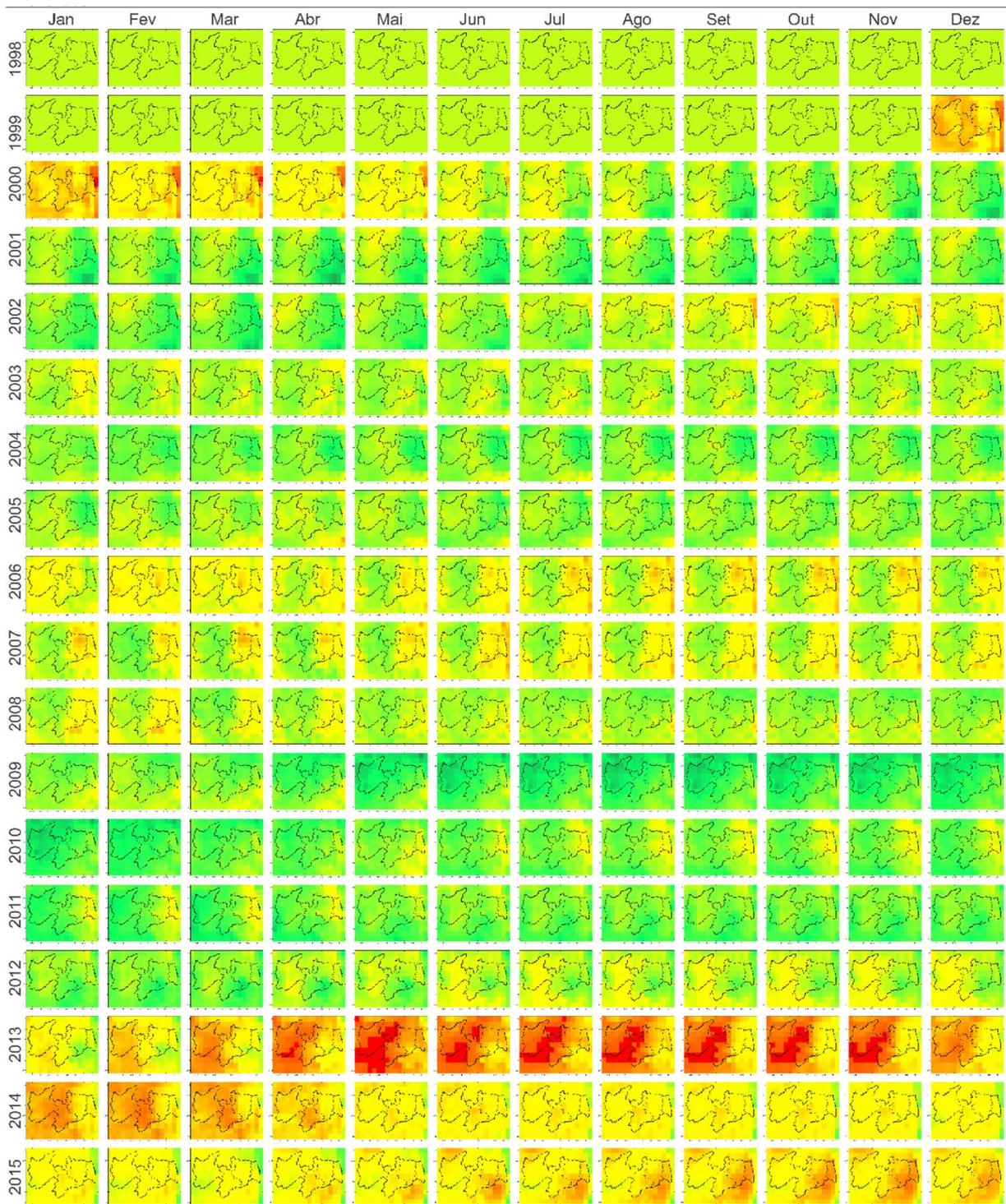
Anexo A3 – Distribuição espaço-temporal do SPI-9 sobre a Paraíba (1998–2015)



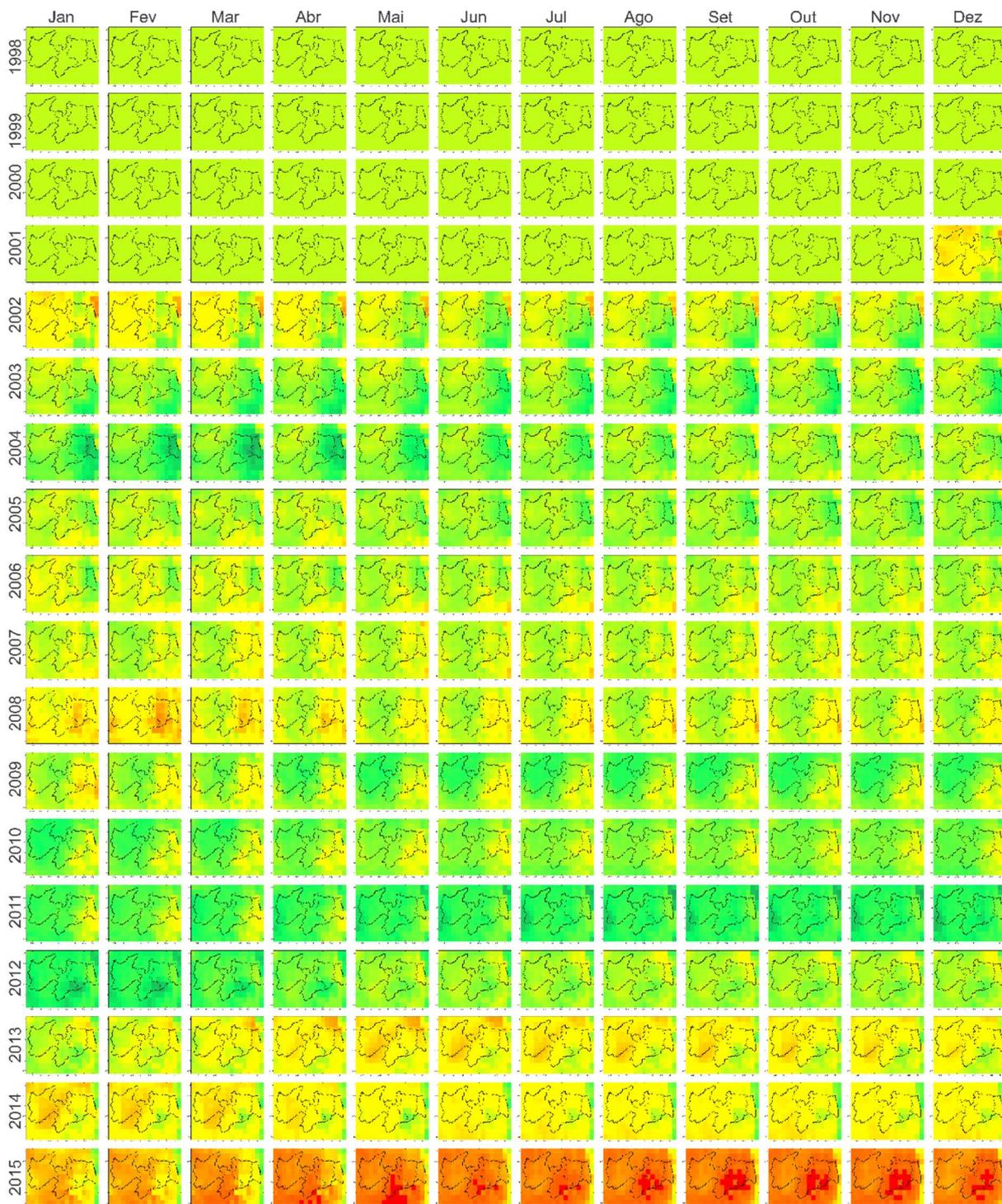
Anexo A4 – Distribuição espaço-temporal do SPI-12 sobre a Paraíba (1998–2015)



Anexo A5 – Distribuição espaço-temporal do SPI-18 sobre a Paraíba (1998–2015)



Anexo A6 – Distribuição espaço-temporal do SPI-24 sobre a Paraíba (1998–2015)



Anexo A7 – Distribuição espaço-temporal do SPI-48 sobre a Paraíba (1998–2015)