

Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil

Lizandro Pereira de Abreu^{1,2*}, Pedro Rodrigues Mutti^{2,3}, Kellen Carla Lima⁴

¹ Professor do Instituto Federal do Piauí – Campus Corrente, Brasil. (*Autor correspondente: lizandro.abreu@ifpi.edu.br)

² Doutorando em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

³ Doutorando em Geografia, Université Rennes 2, Rennes, Bretagne, France.

⁴ Doutora em Meteorologia, Professora da Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

Histórico do Artigo: Artigo submetido e revisado pelo VI SIMGEAPI, sendo aceito e indicado para publicação

RESUMO

A Política Nacional de Recursos Hídricos constitui-se de um planejamento estratégico para fomentar o gerenciamento participativo dos recursos hídricos. Nesse contexto insere-se a Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (BHRP), configurando-se como uma das mais importantes da Região Nordeste do Brasil, abrangendo áreas dos Estados do Ceará, Piauí e Maranhão (331.441 Km²), atendendo quase quatro milhões de habitantes. Desta maneira, o objetivo do estudo foi analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação na BHRP. Para tanto, foram utilizados dados observados de precipitação dispostos em um grid de alta resolução (0,25° x 0,25°), elaborados por Xavier, King e Scanlon (2015) para o período de 1980 a 2013. A fim de subdividir a BHRP em regiões homogêneas utilizou-se a Análise de Cluster. Assim, os resultados mostraram com relação à variabilidade interanual, destacaram-se os anos de 1985 (1800 mm) e 1989 (1500 mm), e no extremo inferior, 1983 (761 mm) e 2012 (670 mm). A distribuição mensal da precipitação mostrou o estabelecimento de duas estações: uma de maio a outubro (<100 mm) e outra de Novembro a Abril, com precipitação entre 50 e 350 mm, sendo a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) o principal sistema associado à precipitação. Foram estabelecidos quatro agrupamentos: o primeiro está localizado no baixo Parnaíba (1000 e 1600 mm); o segundo abrange toda a porção leste da BHRP (600-1000 mm); o terceiro ocupa o centro-sul da bacia (800 e 1400 mm) e o quarto localiza-se na região do Alto Parnaíba (1200-1600 mm). Portanto, traz-se a contribuição de que a caracterização realizada, neste estudo, pode servir de instrumento para tomada de decisões no âmbito do gerenciamento dos Recursos Hídricos.

Palavras-Chaves: Recursos hídricos, SIG, Análise de agrupamentos.

Rainfall spatial and temporal variability in the Parnaíba River Watershed, Northeast region of Brazil

ABSTRACT

The National Water Resources Policy constitutes a strategic planning to promote the participative management of water resources. In this context, the Parnaíba River Watershed (PRW) is one of the most important watersheds in the Northeast region of Brazil, encompassing parts of Ceará, Piauí and Maranhão States (331,441 Km²), where nearly 4 million inhabitants dwell. Thus, the aim of this study was to analyze the spatial and temporal variability of precipitation in the PRW. To achieve this objective, observed data between 1980 and 2013 and arranged in a high resolution grid (0.25° x 0.25°) by Xavier, King and Scanlon (2015) were used. Cluster analysis was used in order to divide the PRW into homogeneous rainfall subregions. Results showed that, regarding year-to-year variability, the years of 1985 (1800 mm) and 1989 (1500 mm) presented the highest annual totals, while 1983 (761 mm) and 2012 (670 mm) presented the lowest values. These peaks might be associated with sea surface temperature anomalies in the Pacific Ocean, with its positive phase (La Niña) occurring during the wetter years and the negative phase (El Niño) taking place during 1983, which was one of the driest years. The monthly distribution of rainfall showed two seasons: one between May and October (<100 mm) and the other between November and April, with rainfall between 50 and 350 mm, with the Intertropical Convergence Zone causing most of the rainfall. Four homogeneous groups were identified: one located at the lower Parnaíba (1000 - 1600 mm); one comprising the east part of the PRW (600 - 1000 mm); one covering the south-central PRW (800 - 1400 mm); and the last group located at the higher Parnaíba (1200 - 1600 mm). The characterization performed in this study can be used as a water resources management tool by decision makers in the studied region.

Keywords: Water resources, GIS, cluster analysis.

1. Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Federal n.º 9.433/1997, estabelece que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação desta Política e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, constituindo-se como unidade básica do planejamento dos recursos hídricos e dividindo o território brasileiro em 12 regiões hidrográficas. Para Rodell et al. (2018), na análise de mudanças hidroclimáticas, deve-se levar em consideração os componentes dinâmicos do ciclo da água (águas subterrâneas, umidade no solo, águas superficiais, neve e gelo), uma vez que a contabilidade precisa das mudanças na disponibilidade de água doce é essencial para prever o suprimento regional de alimentos, a saúde humana e do ecossistema, a geração de energia e a agitação social.

Para Silva et al. (2010), estudar a variabilidade da precipitação, é atualmente um desafio na área de recursos hídricos, especialmente no que tange à grande relevância sobre as implicações da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas, principalmente aquelas localizadas em áreas semiáridas ou de transição. Associa-se a esse fato as características climáticas da região do semiárido brasileiro, sendo influenciada por secas periódicas com rigoroso impacto na sociedade, fatores que levaram a Trewartha (1962) destacá-la como uma região de “clima problemático”, afirmação posteriormente ratificada por Hastenrath (2012) e Xavier et al. (2019).

A precipitação no NEB é caracterizada por alta variabilidade espacial e temporal, com a ocorrência de eventos extremos de precipitação influenciados por diferentes sistemas meteorológicos que atuam na região. A variabilidade interanual tem como principal agente influenciador a Temperatura de Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Pacífico (El Niño / La Niña) e Atlântico (dipolo do Atlântico) (Timmermann et al. 2018). A variabilidade sazonal, por sua vez, é caracterizada por ter como principais sistemas influenciadores as Linhas de Instabilidade (LI), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais (SF) e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (Abreu, 2018; Coutinho; Fisch, 2007; Fedorova et al., 2016; Gan; Kousky, 1986; Kousky; Gan, 1981; Molion; Bernardo, 2002; Reboita et al., 2012; Uvo, 1989). Nesse contexto, o entendimento da climatologia e dos padrões espaciais de precipitação são de extrema importância para os estudos hidroclimáticos nas escalas global, regional e até local, podendo facilitar a identificação de alterações e/ou desvios em relação ao comportamento padrão (Frazier et al., 2016; Mutti et al., 2019).

A identificação de tais padrões espaciais e temporais de chuvas é geralmente realizada por intermédio do uso de métodos estatísticos multivariados conhecidos, com boa aplicabilidade em diferentes escalas, como a análise de agrupamentos (Lyra et al., 2014; Mutti et al., 2019; Oliveira et al., 2017; Santos et al., 2016; Uda et al., 2015). Devido à dificuldade de obtenção de dados pluviométricos e uma série histórica mais representativa para estudos mais consistentes, muitas vezes são utilizados dados previamente trabalhados estatisticamente, através de processos como reanálise e interpolação, onde cada ponto do *grid* terá informações únicas, simulando um posto de coleta distinto, tendo assim a maior quantidade possível de dados.

Para Cabral Júnior e Bezerra (2018), uma melhor compreensão das características espaciais e temporais de parâmetros meteorológicos, além de ser importante indicador climático, é necessária para o aproveitamento eficiente dos recursos hídricos em seus múltiplos usos (agricultura, abastecimento humano, produção de energia, etc). Portanto, nesse contexto, o objetivo do estudo foi analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba – BHRP, durante o período de 1980 a 2013.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área

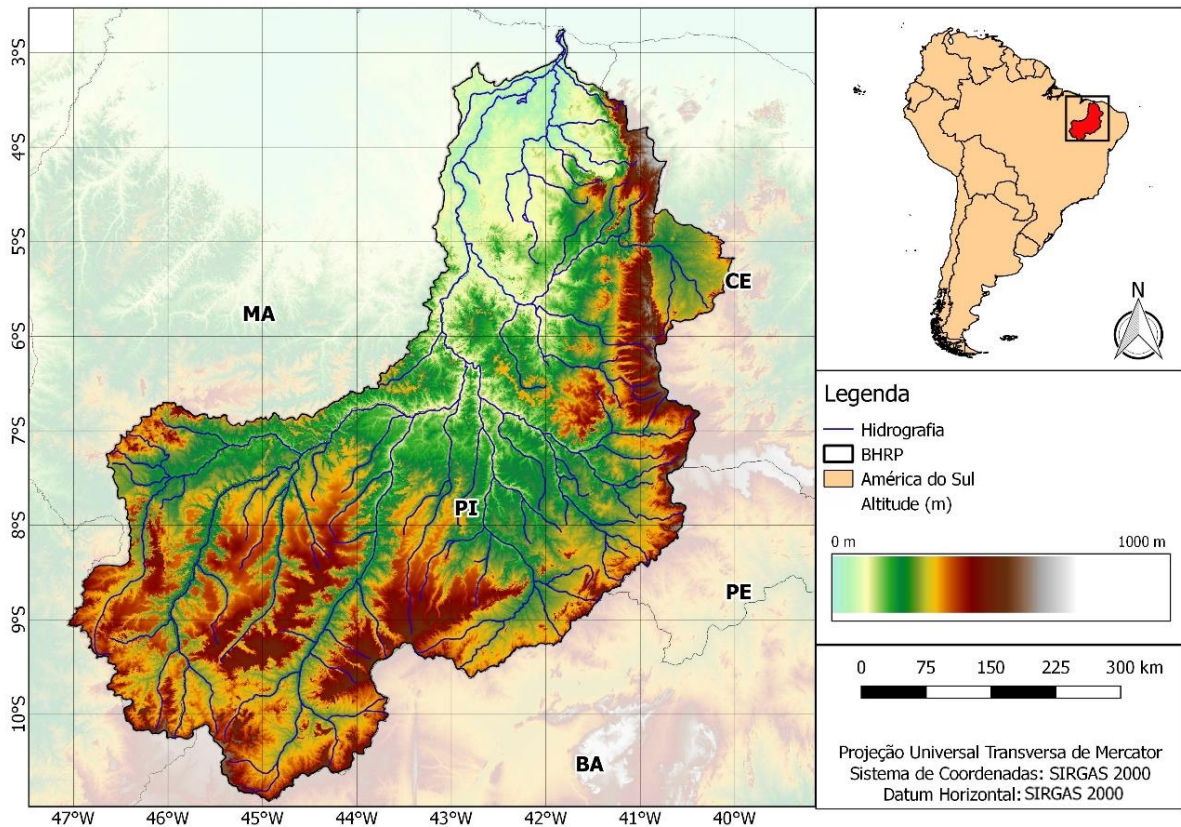
A BHRP está inserida na região Nordeste do Brasil – NEB (Figura 1), sendo uma das mais importantes desta região, localizando-se entre as coordenadas 2°21'S e 11°06'S de latitude e 47°21'W e 39°44'W de longitude. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006), na BHRP estão inseridos quase quatro milhões de habitantes, em uma área de 331.441 Km², abrangendo os estados do Ceará (13.690 Km²), Piauí (249.497 Km²) e Maranhão (65.492 Km²), além de uma área de litígio entre Piauí e Ceará (2.762 Km²).

Devido à sua extensão territorial, a BHRP apresenta características ambientais bastante diversificadas, em termos de relevo, vegetação e clima. Sua área abrange biomas como o Cerrado, no Alto Parnaíba; a Caatinga, no Médio Parnaíba e Costeiro no Baixo Parnaíba (MMA, 2006).

A respeito disso, Oliveira, Santos e Silva e Lima (2017) dividiram o NEB em 5 regiões baseado na climatologia mensal de precipitação. Destas cinco, três regiões dividem a BHRP, a saber: norte do semiárido (0-150 mm), sul do semiárido (0-150 mm), noroeste (0-300mm). Uma divisão alternativa quanto à precipitação consta em Reboita et al. (2012) onde também podem ser determinadas três sub-regiões distintas. A primeira localizada na faixa litorânea, tendo máximos pluviométricos no primeiro semestre do ano sendo a ZCIT o sistema atmosférico mais importante para a chuva na sub-região. A segunda região conhecida como Sertão, localizada na porção leste da BHRP, onde os totais pluviométricos são mais baixos, tendo máximos de precipitação no verão/outono e mínimos no inverno. A terceira sub-região é correspondente àquela que abrange uma grande parte do território brasileiro (porções oeste e sudoeste da BHRP), tendo os totais pluviométricos máximos no verão e mínimos no inverno.

No que tange ao relevo da BHRP, este é definido pela sua estrutura geológica, com vales inseridos entre chapadas e chapadões (tabuleiros) e com altitudes inferiores a 1.300 m (MMA, 2006). Descrevendo os divisores de águas e limites da bacia, temos ao Serra da Tabatinga, que a separa da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco; a sudoeste é limítrofe da Bacia do Tocantins; a leste temos a Serra Grande (divisa Piauí-Ceará) e a Chapada do Araripe (divisa Piauí-Pernambuco).

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba, sobreposta no mapa hipsométrico da região.



Fonte: Autores (2019).

Base de dados do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer).

2.2 Material

Para a realização do presente trabalho utilizou-se como principal base de dados aquela disponibilizada por Xavier, King e Scanlon (2016). Esse conjunto de informações foi desenvolvido em uma grade de resolução $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 28 km) para cinco variáveis meteorológicas, dentre elas a precipitação, sendo obtidas a partir das mensurações de 3625 pluviômetros e 735 estações de medição distribuídas por todo o NEB, englobando o período de 1980 a 2013. A partir disto, os autores trabalharam com seis mecanismos de interpolação, sendo aplicado aquele que melhor representasse a variável e região a partir da validação cruzada. Cada ponto de grade possui uma série histórica para o período estudado (1980-2013) e os dados estão disponíveis à comunidade científica através do sítio eletrônico <<https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>>.

Nesta pesquisa, utilizou-se a totalidade de pontos que se enquadravam dentro dos limites da BHRP (434 pontos), sendo trabalhados em escala mensal (408 meses correspondendo a 34 anos). Além de apresentarem uma representação significativa para a BHRP, esta base de dados vem sendo largamente utilizada na elaboração de trabalhos científicos atuais como Battisti, Bender e Sentelhas (2018), com a utilização da base de precipitação como ferramenta de auxílio no desenvolvimento da produção de soja no Brasil; Bender e Sentelhas (2018), que ao utilizarem-na como forma de preenchimento e na comparação com outras bases de dados (dados de forçantes climáticas para modelagem agrícola – AgCFSR, AgMERRA e o modelo para

previsões energéticas NASA POWER) encontraram melhores correlações para esse conjunto de dados ($r^2=0,88$); Cabral Júnior e Bezerra (2018) que empregaram os dados para o cálculo do índice de aridez no NEB, além de Silva et al. (2019) que utilizaram os dados para a análise de índices de extremos climáticos no NEB e na Amazônia Brasileira.

2.3 Procedimentos Metodológicos

2.3.1 Interpolação dos dados

De posse dos dados, o primeiro procedimento realizado foi a determinação da climatologia da precipitação para a região de estudo. Os pontos foram especializados com auxílio de um Sistema de Informações Geográficas e posteriormente os dados foram interpolados com base no algoritmo do inverso quadrático da distância, de forma que fosse possível a construção das isoietas da região.

A interpolação é uma técnica comumente utilizada a fim de se estimar valores desconhecidos de uma função a partir de valores conhecidos da mesma função, possibilitando a criação de uma grade na qual cada um dos cruzamentos terá um valor determinado. Existem inúmeros algoritmos e técnicas utilizadas no processo de interpolação; Krigagem, Curvatura Mínima, Vizinheiro Mais Próximo, Função de Base Radial, Média Móvel, Polinômio Local e Inverso da Potência da Distância são alguns dos disponíveis nos softwares convencionais. Esses métodos diferem, principalmente em função da forma como os pesos de cada amostra são calculados para estimar o valor de uma da variável em locais não amostrados. Dessa forma, cada algoritmo pode representar de maneira diferente um mesmo conjunto de dados.

Alves e Vecchia (2011), ao comparar diversos algoritmos para interpolação de precipitação, concluíram que dentre os métodos analisados, o método do inverso quadrático da distância destacou-se positivamente, e ainda que o mapa resultante da triangulação não permitiu a extrapolação para fora do domínio dos postos pluviométricos amostrais. Esse fato foi corroborado por Magalhães et al. (2013) ao interpolarem dados para região norte do Espírito Santo.

A técnica do inverso da potência da distância, ou inverso quadrático da distância pode ser classificada tanto como um interpolador exato como suavizante, fazendo com que os pesos dos dados sejam avaliados durante o processo de interpolação, tal que a influência de cada ponto é inversamente proporcional à distância do nó da malha.

2.3.2 Construção e análise da série histórica dos dados

No intuito de entender melhor o comportamento dos dados, também foi elaborada a decomposição aditiva da série temporal de todos os pontos da área de estudo. Primeiramente, foi calculada a média entre os pontos para cada um dos meses estudados, de forma a obter 408 informações, referentes aos dados em escala mensal representativos para toda a área do NEB.

Prema e Rao (2015) afirmaram que a decomposição aditiva é eficaz quando os valores de pico dos dados sazonais não variam muito, enquanto os modelos multiplicativos são eficazes quando o valor sazonal muda ao longo do tempo. A partir da análise, pode-se inferir a presença de tendência, sazonalidade, além da análise da série temporal propriamente dita e do seu ruído (aleatoriedade) associado. A série foi submetida ao teste estatístico não-paramétrico de Mann-Kendall para análise de tendência.

2.3.3 Análise de Cluster

Para a identificação de áreas de precipitação homogênea dentro da área de estudo foi utilizada a técnica estatística de Análise de Cluster – AC. Adotou-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade e o

método de Ward como técnica hierárquica aglomerativa. A AC objetiva dividir os elementos da amostra de dados em grupos cujos elementos pertencentes a um mesmo grupo apresentem similaridades entre si. Além disso, os elementos pertencentes a grupos diferentes sejam heterogêneos em relação às características analisadas (Mingoti, 2013).

De acordo com Mingoti (2013), dado um conjunto de dados com n elementos amostrais, composto de p variáveis aleatórias, a análise de agrupamentos visa separar os elementos em g grupos. Tem-se, então, para cada elemento amostral j , um vetor de medidas definido por:

$$X_j = [X_{1j} \ X_{2j} \ \dots \ X_{pj}], \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Em seguida, para realização do agrupamento, adotou-se a medida de dissimilaridade da distância euclidiana. Neste método, dois elementos amostrais são comparados para cada variável aleatória pertencente ao conjunto de observações. Quanto menor for a distância euclidiana entre dois elementos, maior a similaridade entre eles. Dados dois elementos X_l e X_k , com $l \neq k$, a distância euclidiana é definida por:

$$d(X_l, X_k) = [(X_l - X_k)'(X_l - X_k)]^{\frac{1}{2}} = \left[\sum_{i=1}^p (X_{il} - X_{ik})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Na análise de agrupamento, faz-se necessário, ainda, definir uma técnica hierárquica aglomerativa. De acordo com Mingoti (2013), essas técnicas consistem na aplicação de algoritmos a partir da premissa de que cada elemento amostral inicial representa um cluster, de tamanho 1. A cada passo do algoritmo, os n clusters iniciais são agrupados de acordo com a relação entre suas características. A cada etapa, o número de conglomerados diminui e o critério de parada se dá quando todos os elementos estão agrupados em um único cluster.

O método desenvolvido por Ward (1963) se caracteriza pelo princípio de que, em cada etapa do algoritmo, calcula-se a soma de quadrados dentro de cada conglomerado existente. Esta soma pode ser compreendida como o quadrado da distância euclidiana de cada elemento do cluster em relação à média do conglomerado em questão. Tem-se:

$$SS_i = \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)'(X_{ij} - \bar{X}_i) \quad (3)$$

em que: n_i é o número de elementos do conglomerado C_i na etapa k do algoritmo, X_{ij} é o vetor de observações do j -ésimo elemento amostral pertencente ao i -ésimo grupo, \bar{X}_i é o centroide do conglomerado C_i e SS_i representa a soma de quadrados correspondente a este conglomerado.

Na etapa k do algoritmo, a soma de quadrados total dentro de cada grupo g existente nesta etapa é definida como:

$$SSR = \sum_{i=1}^{g_k} SS_i \quad (4)$$

Finalmente, a distância entre os conglomerados C_l e C_i é definida como a soma dos quadrados entre

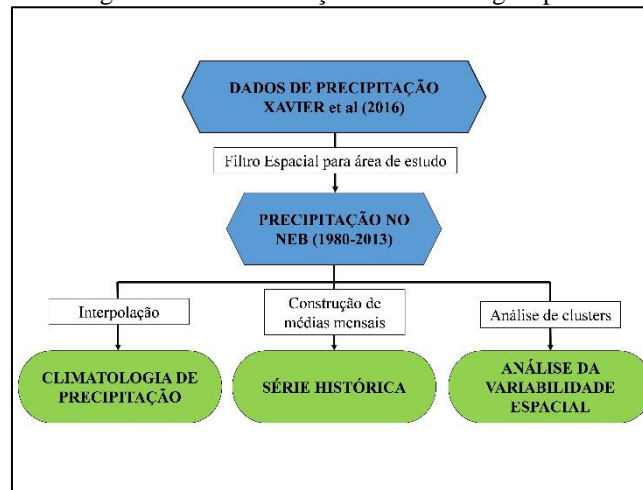
estes grupos:

$$d(C_l, C_i) = \left[\frac{n_l n_i}{n_l + n_i} \right] (\bar{X}_l - \bar{X}_i)' (\bar{X}_l - \bar{X}_i) \quad (5)$$

Em cada etapa do algoritmo, o método de Ward (1963) combina dois agrupamentos que resultam no menor valor da soma de quadrados total entre eles.

Dentre as técnicas estatísticas mais recorrentes para realização de trabalhos desse tipo, destaca-se a utilização da análise de cluster. No Brasil, existem diversos estudos que objetivaram a identificação de áreas homogêneas de precipitação nas mais diversas escalas: seja em nível regional (Oliveira et al., 2017), de unidades da federação (André et al., 2008; Guedes et al., 2010; De Freitas et al., 2013) ou de bacias hidrográficas (Fechini e Galvinício, 2008; Aparecida et al., 2014; Uda et al., 2015; Mutti et al., 2019). A Figura 2 sintetiza a metodologia aplicada no trabalho.

Figura 2 – Fluxograma de demonstração da metodologia aplicada no trabalho.



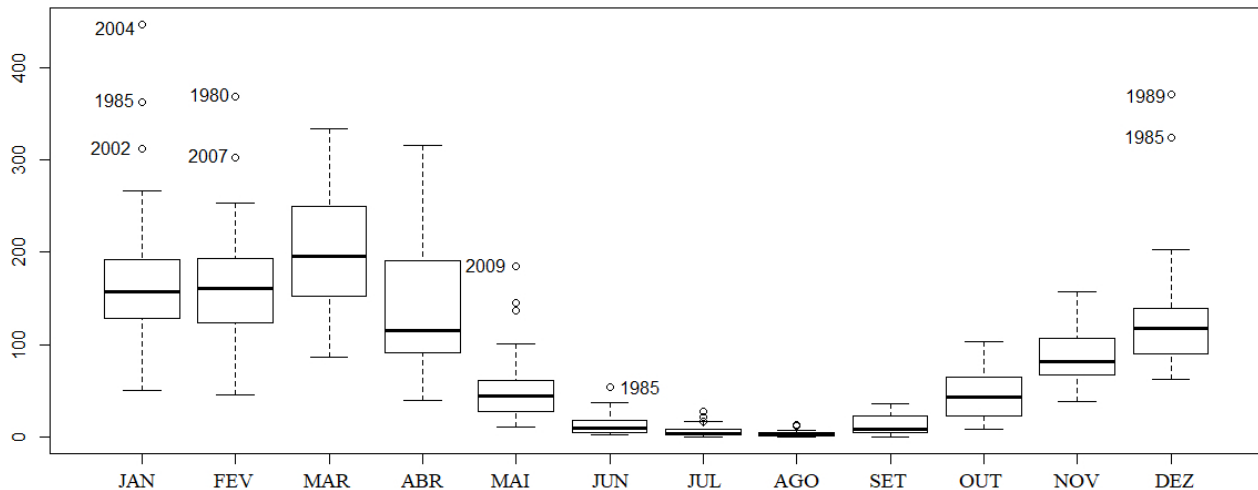
3. Resultados e Discussão

3.1 Climatologia de Precipitação

A Figura 3 apresenta a distribuição dos acumulados mensais de precipitação para o período de 1980 a 2013. Nesta, verifica-se que os maiores acumulados ocorrem durante o verão austral (dezembro a fevereiro) e no início do outono para o mesmo hemisfério (março), chegando a valores próximos a 200 mm mensais. No outro extremo, as menores quantidades de precipitação ocorrem durante o inverno (junho a agosto), com valores próximos a zero. Além disso, percebe-se que a variabilidade dos dados é muito pequena durante o inverno e maior durante a estação chuvosa. Este fato está relacionado aos vários fatores e sistemas atmosféricos que podem estar associados à presença de chuva na região, como núcleos de convecção (Liu et al., 2011), relevo (Rasmussen e Houze, 2011), posicionamento da ZCIT (Uvo, 1989), ocorrência de vórtice ciclônico em altos níveis (Kousky e Gan, 1981), entre outros, que tem sua ocorrência variável no decorrer dos anos. Pode-se ainda visualizar na figura a ocorrência de *outliers*, representando anos com precipitação extrema, com as ocorrências bem acima da média. São exemplos desses anos os de 1989 e 1985; os índices de TSM dos oceanos

Pacífico e Atlântico podem estar associados a essa variabilidade anual de precipitação. No tópico referente à análise da série histórica serão feitos mais comentários a esse respeito. Estes resultados concordam com os apresentados por Reboita et al. (2012), Alvares et al. (2013), Oliveira, Santos e Silva e Lima (2017) e Araújo Palharini e Vila (2017), que ao caracterizarem a precipitação do NEB, encontraram dados semelhantes para as regiões onde a BHRP está inserida.

Figura 3 – Variação anual do acumulado mensal de precipitação na BHRP, destacando os *outliers*.

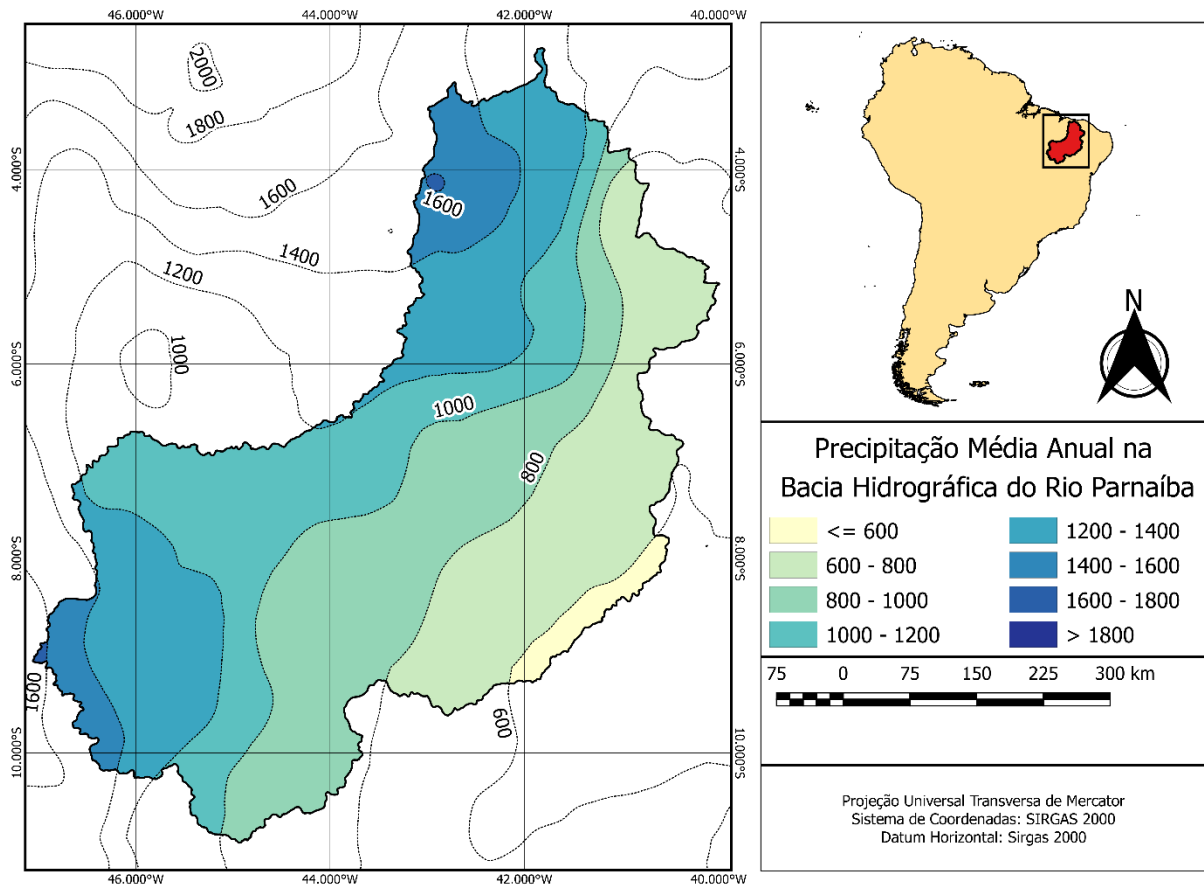


Com o estabelecimento das médias mensais, aplicando o processo de interpolação, foi possível construir o mapa da variação espacial de precipitação na BHRP, e assim pode-se dividi-la em sete isoietas, com dados variando entre 600 e 1600 mm por ano, dado que corrobora a grande variabilidade espacial de precipitação existente na área de estudo (Figura 4). Assim, é possível notar que os menores valores de precipitação ocorrem na porção sudeste da bacia, com média de 600 mm, região inserida dentro do semiárido do NEB. Segundo Reboita et al. (2012) esta região está sob influência do planalto da Borborema, que se comporta como uma barreira topográfica para o escoamento atmosférico, sugerindo que os ventos de leste, ao encontrarem a barreira topográfica, ascendem favorecendo precipitação orográfica no lado leste da montanha (barlavento) e, os ventos de leste chegam secos na região do semiárido (sotavento). Os autores afirmaram ainda que tal acontecimento dificulta a formação de nuvens e, por conseguinte, de precipitação atmosférica. Ainda sobre a região, Oliveira, Santos e Silva e Lima (2017) afirmaram que é uma das mais susceptíveis à seca no território brasileiro.

Com relação aos maiores valores, próximos a 1600 mm anuais, a ocorrência se dá em duas áreas, uma a sudoeste da bacia e outra na porção noroeste. A primeira área está sob influência de sistemas convectivos, principalmente durante o verão (Rasmussen et al., 2014), assim a precipitação seria incrementada pela presença de tempestades associadas a esses sistemas. Neste sentido, Mattos e Machado (2011) afirmaram que os SCM são responsáveis pela produção da maior parte da precipitação, que ocorre nos trópicos e durante o verão de regiões de latitudes médias, e ainda que estão fortemente associados com condições de tempo severo (relâmpagos, precipitação intensa, granizo, ventos fortes e inundações) em várias regiões do mundo.

A segunda área, com maiores acumulados anuais está posicionada próximo ao paralelo de 4° S, localização sob forte influência da ZCIT, possibilitando assim o aumento dos totais pluviométricos da região (Molion e Bernardo, 2002). Para Reboita et al. (2012), o sistema atmosférico mais importante para a chuva no litoral do NEB é a ZCIT. No verão e outono, este sistema atmosférico atinge sua posição mais sul, contribuindo para o estabelecimento da estação chuvosa na região. Enquanto nas demais estações do ano, a ZCIT migra para o norte e seu ramo descendente austral atinge a região, inibindo a precipitação.

Figura 4 – Climatologia do acumulado de precipitação anual na BHRP, com isoietas demonstrando o limite das regiões, para o período de 1980 a 2013.



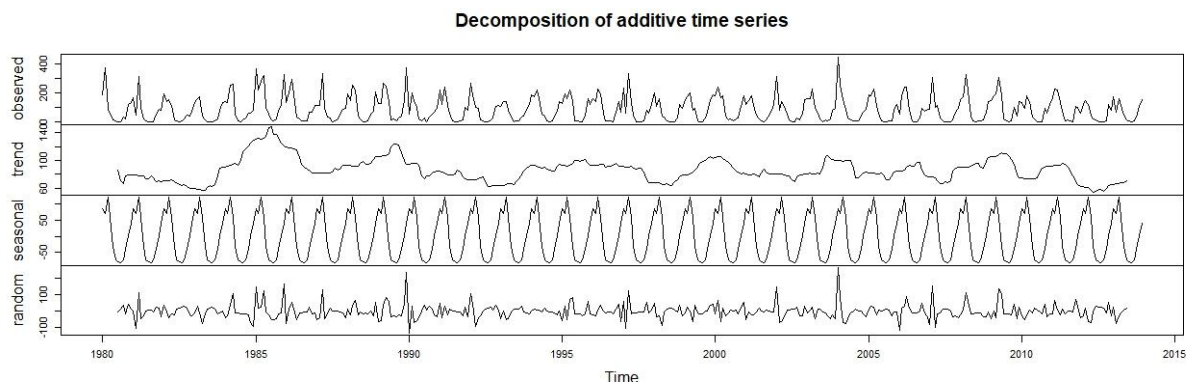
3.2 Série Histórica

Para melhor analisar o comportamento da precipitação no decorrer dos anos, construiu-se a série histórica do período estudado (1980-2013), possibilitando ainda avaliar a variabilidade interanual dos dados de precipitação (Figura 5). Quanto a essa variabilidade, os maiores acumulados anuais ocorreram nos anos de 1985 (1800 mm) e 1989 (1500 mm), e no extremo inferior, 1983 (761 mm) e 2012 (670 mm). Essa situação pode estar associada às anomalias de TSM no Oceano Pacífico, onde, nos anos mais chuvosos, observou-se comportamento positivo (La Niña), e no ano de 1983, um dos mais secos, foi registrada anomalia negativa (El Niño). Destacam-se também as anomalias da TSM no Oceano Atlântico, uma vez que no ano de 2012, apesar de apresentar comportamento positivo para a TSM no Pacífico, apresentou comportamento positivo também no Atlântico. Essa configuração está associada à TSM mais elevada no Atlântico Tropical Norte, o que favorece o afastamento da ZCIT do litoral norte do NEB, reduzindo os valores precipitados sobre essa região (Haylock et al., 2006). Nesse sentido, Araújo Palharini e Vila (2017) sugeriram que, na fase quente (El Niño), o ramo ascendente da célula de Walker, usualmente sobre a Amazônia, seja deslocado para as águas

anomalamente quentes do Pacífico Central, ocasionando uma forte subsidência sobre o Atlântico tropical, que por sua vez, enfraqueceria a ZCIT e a convecção sobre o NEB, diminuindo as chuvas.

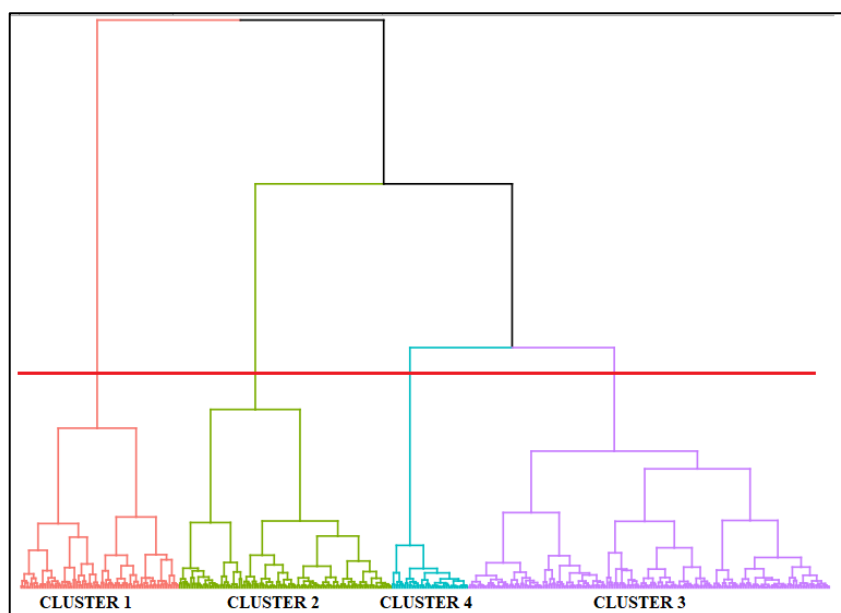
A decomposição da série temporal permitiu a observação da variabilidade sazonal. A partir da distribuição mensal da precipitação notou-se o estabelecimento de duas estações: uma compreendida entre os meses de maio a outubro, com precipitações escassas e inferiores a 100 mm; e outra abrangendo os meses de Novembro a Abril, com precipitação entre 50 e 350 mm.

Figura 5 – Decomposição aditiva da série histórica (1980-2013) de precipitação na BHRP.



3.3 Análise de Variabilidade Espacial

A partir dos acumulados médios mensais, pôde-se elaborar a análise de agrupamentos, a fim de se determinar as regiões de precipitação homogênea. A partir da análise do dendrograma, demonstrado na Figura 6, foram estabelecidos quatro agrupamentos homogêneos, sendo bem semelhantes aos encontrados por Guedes et al. (2010).

Figura 6 – Dendrograma obtido a partir da análise dos dados de precipitação na BHRP.

A Figura 7 traz um mapa com a demarcação dos limites de cada um dos agrupamentos, bem como a grade de informações utilizadas no trabalho. O agrupamento 1 está localizado na porção norte da bacia, região determinada como baixo Parnaíba, parte do estado mais próxima ao oceano Atlântico, com precipitação variando entre 1000 e 1600 mm anuais. Por se localizar entre 2° e 6° de latitude Sul, a região tem como principal sistema atmosférico a ZCIT (Guedes et al., 2010; Melo et al., 2000; Molion e Bernardo, 2002). Esta região engloba importantes municípios como a capital do estado do Piauí, Teresina, além de outros municípios de importância econômica (Timon-MA, Caxias-MA, Piri-piri-PI, Piracuruca-PI e Campo Maior-PI).

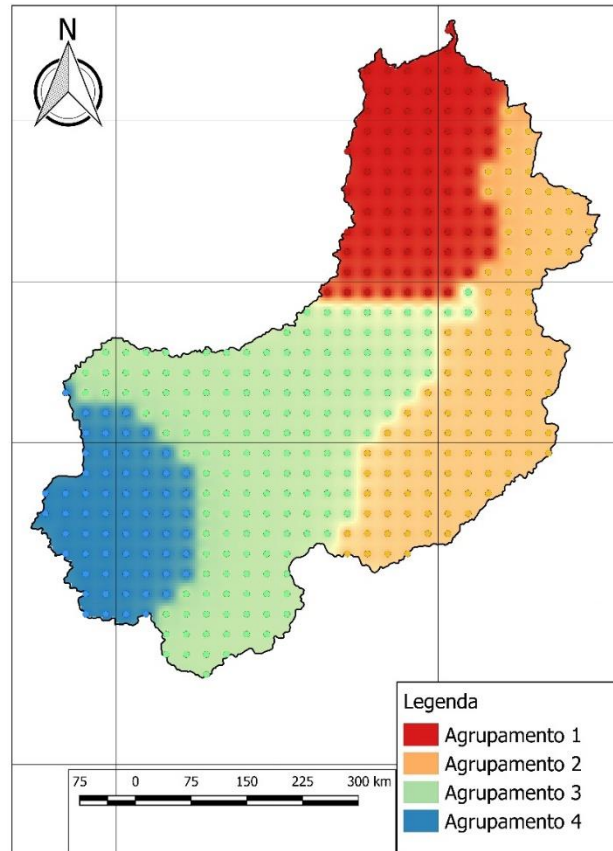
O segundo agrupamento abrange quase toda a porção leste da BHRP, apresentando os menores acumulados de precipitação anual, com dados variando entre 600 e 1000 mm/ano. A região inclui-se dentro do semiárido brasileiro. Esta região engloba a sub-bacia do rio Poti, um importante tributário para o rio Parnaíba, que possui as nascentes no estado do Ceará, atravessando o estado do Piauí e tendo sua foz em Teresina, capital do Estado. Dentre outros, estão incluídos neste agrupamento os municípios de Picos-PI, Paulistana-PI, Acauã-PI, São Raimundo Nonato-PI e Coronel José Dias-PI (região do Parque Nacional da Serra da Capivara). Os baixos acumulados de precipitação da região semiárida do Brasil, são amplamente estudados, a região é periodicamente afetada por secas que afetam principalmente a vazão dos rios, impactando o abastecimento de água e a produção de energia (Cabral Júnior e Bezerra, 2018; Marengo et al., 2018).

O agrupamento 3 inicia-se próximo ao paralelo de 6° S e se estende até o extremo sul, ocupando tudo o centro-sul da BHRP, tendo precipitação variando entre 800 e 1400 mm anuais. Esta região destaca-se como uma área com alta produção de grãos, principalmente soja. Os principais municípios que integram a região são: Floriano-PI, Uruçuí-PI, Bom Jesus-PI, Barão de Grajaú-MA e Corrente-PI. Para Guedes et al. (2010) a precipitação na região é justificada pela convergência de umidade oriunda da floresta amazônica e do Atlântico Norte.

O quarto agrupamento, está localizado na porção sudoeste da bacia, englobando a região das nascentes do rio Parnaíba e o sul dos estados do Piauí e Maranhão. O agrupamento possui os maiores acumulados de precipitação, variando entre 1200 e 1600 mm/ano, tendo como principal sistema atmosférico influenciador os

SCM (Rasmussen, Zuluaga, Houze, 2014). Estão incluídos neste agrupamento os municípios de Balsas-MA, Tasso Fragoso-MA, Alto Parnaíba-MA, Santa Filomena-PI e Barreiras do Piauí-PI.

Figura 7 – Mapa da localização dos agrupamentos obtidos a partir da análise de cluster de precipitação.



4. Conclusão

Em função de sua extensão territorial, a BHRP possui grande variabilidade espacial e temporal nos acumulados de precipitação registrados em seu território, com médias variando de 600 a 1600 mm/ano. As regiões onde foram registrados os acumulados mais elevados localizaram-se nos estados do Piauí e Maranhão, na porção sudoeste da bacia, sendo os menores acumulados associados às regiões da bacia inseridas no semiárido brasileiro.

A avaliação da série histórica dos dados de precipitação da BHRP permitiu deduzir que a variável não apresenta tendência temporal para o período estudado, e ainda que apresentou um ciclo quase semestral, aproximando-se do ciclo de precipitação estabelecido para a maior parte do território do NEB. Quanto à sazonalidade, os meses correspondentes ao verão e outono (inverno e primavera) austrais registraram os maiores (menores) acumulados de precipitação, sugerindo que a elevada temperatura do ar e consequente convecção estaria relacionada à ocorrência de maiores índices de precipitação.

A análise de agrupamentos, bem como a climatologia da ocorrência dos sistemas atmosféricos no NEB, nos permitiu apontar que a ZCIT, SCM e VCAN são os principais sistemas associados à precipitação na BHRP, estando os dois primeiros concatenados com os pontos de maiores acumulados.

Por fim, ressalta-se que a caracterização da precipitação realizada aqui pode servir de instrumento para tomada de decisões no âmbito do gerenciamento dos recursos hídricos e assim, um melhor direcionamento de recursos e políticas públicas voltadas para a gestão das sub-bacias inseridas neste contexto.

5. Referências

Abreu, L. P. de. (2018). **Relâmpagos no Nordeste do Brasil: Ocorrência, Variabilidade espaço-temporal e relação com microfísica das nuvens**. Dissertação, Mestrado em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Alves, E. D. L., & Vecchia, F. A. S. (2011). Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, 33(2). <https://doi.org/10.4025/actascihumansoc.v33i2.13815>

André, R. G. B., Marques, V. da S., Pinheiro, F. M. A., & Ferraud, A. S. (2008). Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 23(4), 501–509. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000400009>

Aparecida, R., Chierice, F., Milton, P., & Landim, B. (2014). Variabilidade espacial e temporal de precipitação pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Geociências**, 33(1), 157–171.

Araújo Palharini, R. S., & Vila, D. A. (2017). Climatological Behavior of Precipitating Clouds in the Northeast Region of Brazil. **Advances in Meteorology**, 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/5916150>

Battisti, R., Bender, F. D., & Sentelhas, P. C. (2018). Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2383-y>

Bender, F. D., & Sentelhas, P. C. (2018). Solar Radiation Models and Gridded Databases to Fill Gaps in Weather Series and to Project Climate Change in Brazil. **Advances in Meteorology**, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/6204382>

Cabral Júnior, J., & Bezerra, B. G. (2018). Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências Do Nordeste**, 4, 71–89. Retrieved from <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/14746/9802>

Coutinho, E. de C., & Fisch, G. (2007). Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. **Rev. Bras. Meteorol.**, 22(2), 193–203. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200005>

- De Freitas, J. C., De Andrade, A. R. S., Braga, C. C., Honorato, A., Neto, G., & De Almeida, T. F. (2013). Análise de agrupamentos na identificação de regiões homogêneas de índices climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 6(4), 732–748.
- Fechine, J. A., & Galvêncio, J. D. (2008). Agrupamento da precipitação mensal da Bacia Hidrográfica do Rio Brigida-PE, através da multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 1(1), 39–46.
- Fedorova, N., Levit, V., & da Cruz, C. D. (2016). On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, 173(4), 1403–1421. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1166-y>
- Frazier, A. G., Giambelluca, T. W., Diaz, H. F., & Needham, H. L. (2016). Comparison of geostatistical approaches to spatially interpolate month-year rainfall for the Hawaiian Islands. **International Journal of Climatology**, 36(3), 1459–1470. <https://doi.org/10.1002/joc.4437>
- Gan, M. A., & Kousky, V. E. (1986). Vórtices Ciclônicos Da Alta Troposfera No Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 1, 19–28. Retrieved from file:///D:/Doctorado UB_Nivaldo/Tesi Doctorado/NIVALDO LER/Artigos/Dinâmicas NE/Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul.pdf
- Guedes, R. V. de S., Lima, F. J. L. de, Amanajás, J. C., & Braga, C. C. (2010). Análise em componentes principais da precipitação pluvial no Estado do Piauí e agrupamento pelo método de Ward. **Revista de Geografia**, 27(1), 218–233.
- Hastenrath, S. (2012). Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. **Climatic Change**, 112(2), 243–251. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1>
- Haylock, M. R., Peterson, T. C., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M. T., Baez, J., ... Vincent, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, 19(8), 1490–1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>
- Kousky, V. E., & Gan, M. A. (1981). Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, 33(6), 538–551. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x>
- Liu, C., Cecil, D., & Zipser, E. J. (2011). Relationships between lightning flash rates and passive microwave brightness temperatures at 85 and 37 GHz over the tropics and subtropics. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 116(23), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2011JD016463>
- Lyra, G. B., Oliveira-Júnior, J. F., & Zeri, M. (2014). Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, 34(13), 3546–3558. <https://doi.org/10.1002/joc.3926>
- Magalhães, I. A. L., Almeida, K. L. de, Thiago, C. R. L., Gardiman Junior, B. S., Zanetti, S. S., & Cecílio, R. A. (2013). Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil. In **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR** (p. 7). Foz do Iguaçu-PR.

- Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C., Paula Cunha, A., Brito, S., Moraes, O. L., & Doutor Altino Bondesan, E. (2018). Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **An Acad Bras Cienc**, (2), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Mattos, E. V., & Machado, L. A. T. (2011). Cloud-to-ground lightning and Mesoscale Convective Systems. **Atmospheric Research**, 99(3–4), 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.007>
- Melo, A. B. C., Nobre, P., Melo, M. L. D., & Santana, S. C. (2000). Estudo climatológico da posição da ZCIT no atlântico equatorial e sua influência sobre o Nordeste do Brasil, In: **Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 11., 2000, Rio de Janeiro (RJ). Anais... 2000.), 1142–1147.
- Mingoti, S. A. (2013). **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada - Uma abordagem aplicada** (1ª ed.). Belo Horizonte, MG: Editora UFMG.
- MMA, M. do M. A.-. (2006). **Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba**. (MMA, Ed.). Brasília: MMA.
- Molion, L. C. B., & Bernardo, S. D. O. (2002). Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Anais Do Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1, 1334–1342. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mutti, P. R., Abreu, L. P., de M. B. Andrade, L., Spyrides, M. H. C., Lima, K. C., de Oliveira, C. P., ... Bezerra, B. G. (2019). A detailed framework for the characterization of rainfall climatology in semiarid watersheds. **Theoretical and Applied Climatology**. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02963-0>
- Oliveira, P. T., Santos e Silva, C. M., & Lima, K. C. (2017). Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 130(1–2), 77–90. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>
- Prema, V., & Rao, K. U. (2015). Time series decomposition model for accurate wind speed forecast. **Renewables: Wind, Water, and Solar**, 2(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0018-9>
- Rasmussen, K. L., & Houze, R. a. (2011). Orographic Convection in Subtropical South America as Seen by the TRMM Satellite. **Monthly Weather Review**, 139(8), 2399–2420. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05006.1>
- Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., & Houze, R. A. (2014). Severe convection and lightning in subtropical South America. **Geophysical Research Letters**, 41(20), 7359–7366. <https://doi.org/10.1002/2014GL061767>
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., Porfírio, R., & Rocha, D. (2012). Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul O Sol como Fonte de Energia. **Terrae Didactica**, 8(1), 34–50.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. **Nature**, 557(7707), 651–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Santos, A. P. P. dos, Lima, F. J. L. de, Souza, E. B. de, Pinto Júnior, O., & Santos, S. R. Q. dos. (2016). Aplicação da análise cluster na identificação de regiões homogêneas para incidência de descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 09(07), 1275–1291. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20140015>

Silva, R. M. da, Silva, L. P. e, Montenegro, S. M. G. L., & Santos, C. A. G. (2010). Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, 22(2), 357–372.

SILVA, P. E., SILVA, C. M. S., SPYRIDES, M. H. C., & ANDRADE, L. M. B. (2019). Analysis of Climate Extreme Indices in the Northeast Brazil and the Brazilian Amazon in the Period from 1980 to 2013. **Anuário Do Instituto de Geociências - UFRJ**, 42(2), 137–148. https://doi.org/10.11137/2019_2_137_148

Timmermann, A., An, S. Il, Kug, J. S., Jin, F. F., Cai, W., Capotondi, A., ... Zhang, X. (2018). El Niño–Southern Oscillation complexity. **Nature**, 559(7715), 535–545. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>

Trewartha, G. T. (1962). **The earth's problem climates**. Madison: University of Wisconsin Press. <https://doi.org/10.1002/qj.49708737325>

Uda, P. K., Franco, A. C. L., Queen, G., Bonumá, N. B., & Kobiyama, M. (2015). Análise de cluster da precipitação na bacia do rio Iguaçú, região sul do Brasil. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1–7.

Uvo, C. B. (1989). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro., 120. Retrieved from [http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442\(1998\)011%3C0551:TRBTPA%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442(1998)011%3C0551:TRBTPA%3E2.0.CO;2)

Ward, J. H. (1963). **Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function**. Source: **Journal of the American Statistical Association** (Vol. 58).

Xavier, A. C., King, W., & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980 – 2013), **Int. J. Climatol.** 36: 2644–2659 (October 2015). <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

Xavier, S. F. A., da Silva Jale, J., Stosic, T., dos Santos, C. A. C., & Singh, V. P. (2019). An application of sample entropy to precipitation in Paraíba State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 136(1–2), 429–440. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2496-3>

Informações adicionais

Contribuições dos autores: todos os autores contribuíram no desenvolvimento do artigo.

Como referenciar este artigo: Abreu, L.P., Mutti, P.R., Lima, K.C. (2019). Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.7, n.2, p.82-97.



Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença Creative Commons - CC Atribuição Não Comercial 4.0 CC-BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>), no qual, os artigos podem ser compartilhados desde que o devido crédito seja aplicado de forma integral ao autor (es) e não seja usado para fins comerciais.