

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ENGENHARIA DE ÁGUA E SOLO**

**ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO BRÍGIDA NO SERTÃO PERNAMBUCANO PARA SUPORTE À GESTÃO
DOS RECURSOS HÍDRICOS**

HELIO LOPES ARAÚJO

**RECIFE – PE
2019**

HELIO LOPES ARAÚJO

**ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO BRÍGIDA NO SERTÃO PERNAMBUCANO PARA SUPORTE À GESTÃO
DOS RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação orientada pelo professor Dr. Abelardo A. A. Montenegro e apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RECIFE – PE

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ENGENHARIA DE ÁGUA E SOLO

Espacialização da precipitação na bacia hidrográfica do rio Brígida no sertão pernambucano para suporte à gestão dos recursos hídricos

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2019 pela banca examinadora:

Orientador:

Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco – DEAGRI/UFRPE

Examinadores:

Dr. Erik Cavalcanti e Silva
Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC

Dr. Glauco Estácio Gonçalves
Universidade Federal Rural de Pernambuco – DEINFO/UFRPE

RECIFE – PE

2019

A Deus pela vida,
a minha filha Giovana Araújo
e a minha esposa Solange Santos
pelo apoio e amor incondicional.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e, que através dela tudo é acrescentado;

A minha esposa Solange Santos por toda a ajuda e suporte;

A minha família, Enor Araújo e Ivanedes Araújo, Emival Araújo, Ivonete Araújo, Ediclea Araújo, Robson Araújo, Edinéia Araújo e Eliana Araújo;

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado;

Ao professor Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, pela orientação, dedicação, paciência, amizade e a confiança em mim depositada;

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

Aos colegas e amigos do curso de Engenharia Agrícola, Iug Lopes, Frederico Lins, Marcos Vinícius, Ailton Alves, Rodes Batista, Liliâne Pinheiro, Célia Santos, José Edson, Sileide Meneses, Kátia Ribeiro, Thayná Alice, Fred Mikhail, Nádia Soares, pela amizade concretizada, dias de estudos e convivência;

Ao grande amigo e compadre Jozé André pela convivência, pela amizade e companheirismo de sempre;

Aos demais amigos e colegas que sempre me apoiaram para a realização e sucesso deste trabalho;

Esta dissertação está inserida no âmbito do projeto “ESTUDOS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS COMO BASE PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO - experimentação e modelagem, cenários atuais e futuros”, financiado pelo CNPq, e coordenado pela UFPE, e com participação da UFRPE, bem como do Projeto FACEPE APQ 0300-5.03/17 (Consórcio Universitas);

Nossos agradecimentos à APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) pelo suporte com as informações utilizadas neste estudo, em particular aos Drs. Patrice Oliveira, Erik Cavalcanti e Marcelo Possas;

A todos, muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIÇÕES	x
LISTA DE ANEXO	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1.0 INTRODUÇÃO	15
3.0 OBJETIVOS.....	22
3.1 Geral.....	22
3.2 Específicos.....	23
4.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
4.1 Hidrologia	23
4.2 Ciclo Hidrológico	23
4.3 Bacia Hidrográfica e Gestão	24
4.4 Técnica dos Quantis.....	28
4.5 TRMM	30
4.6 Geoestatística	31
5.0 MATERIAL E MÉTODOS	34
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
7.0 CONCLUSÕES	56
8.0 TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de Bacia Hidrográfica	16
Figura 2. Bacias hidrográficas inseridas no Projeto SUPer/ CNPq, para subsidiar estudos hidrológicos e ampliação de base de dados.....	22
Figura 3. Ciclo Hidrológico, destacando-se a precipitação, a geração do escoamento superficial, e a evapotranspiração (soma da transpiração e da evaporação).....	24
Figura 4. Comitês de Bacia Hidrográficas e Conselhos de Usuários em Pernambuco.....	27
Figura 5. Faixa de cobertura do satélite TRMM	30
Figura 6. Plataforma Giovanni.....	31
Figura 7. Protocolos para mapeamento da variabilidade, utilizando a geoestatística.	33
Figura 8. A) Mapa de distribuição espacial dos postos pluviométricos, B) Figura Altimétrico para a Bacia Hidrográfica do Rio Brígida (BHRB)	35
Figura 9. Precipitação anual média na bacia, ao longo da série histórica estudada	39
Figura 10. Gráfico com número de registros de cada estação no período 1963-2017.	40
Figura 11. Gráfico de correlação entre os índices pluviométricos das estações e do TRMM	41
Figura 12. Box-plot da precipitação (A) períodos seco, normal e chuvoso (B) anual.....	45
Figura 13. Histograma da distribuição das distâncias (em m) entre pares de pontos, para o período seco (A) período normal (B) e período chuvoso (C).....	47
Figura 14. Correlação entre os índices pluviométricos e a altitude, para os períodos Seco (A), Normal (B) e chuvoso (C), para a BHRB	48
Figura 15. Modelos de semivariograma ajustados para a precipitação para os períodos seco (1982, 1987, 1983, 2016, 2017), normal (1969, 1968, 1976, 1970, 1972) e chuvoso (1964, 1967, 1974, 1984, 1985) da BHRB.....	49
Figura 16. Mapa de precipitação anual para o período seco (1982, 1983, 1987, 2016, 2017) da BHRB.....	52

Figura 17. Mapa de precipitação anual para o período normal (1968, 1969, 1970, 1972, 1976) da BHRB.....	53
Figura 18. Mapa de precipitação anual para o período chuvoso (1964, 1967, 1974, 1984, 1985) da BHRB.....	54
Figura 19. Mapa dos desvios padrão da krigagem, com a malha da rede pluviométrica considerando o preenchimento com o TRMM (A e C), e rede pluviométrica com dados originais disponíveis (B e D) para a BHRB. Estão representados os açudes existentes na bacia.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Conselho de Usuário formados no Estado de Pernambuco.....	26
Tabela 2. Lista dos reservatórios e suas capacidades na bacia do rio Brígida.	36
Tabela 3. Limite das classes e intervalos médios da precipitação anual em relação com as ordens dos Quantis.....	42
Tabela 4. Classificação do histórico da precipitação média de acordo com a técnica dos Quantis, e o número de postos disponíveis e sem falhas para análise.....	43
Tabela 5. Estatística Descritiva da Precipitação da BHRB	44
Tabela 6. Modelos de semivariogramas e grau de dependência espacial da precipitação da BHRB para o período seco, normal e chuvoso.	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

a – Assimetria

A – Alcance

ANA – Agência Nacional de Águas

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

BHRB – Bacia Hidrográfica do Rio Brígida

C₀ – Efeito Pepita

C₀+C₁ – Patamar

C – Curtose

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

CERES – Sensor de Energia Radiante da Superfície Terrestre e das Nuvens

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CRH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

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

CONSU – Conselhos Gestores de Usuários

CSV – Valores Separados por Vírgula

CV – Coeficiente de variação

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DP – Desvio padrão

FEHIDRO – Fundo Estadual de Recursos Hídricos

GDE – Grau de Dependência Espacial

GPS – Sistema de Posicionamento Global

h – Distância

JAXA – Agência de Exploração Aeroespacial do Japão

LIS – Sensor para Imageamento de Relâmpagos

m³ – Metros Cúbicos

Max – Máximo

Min – Mínimo

mm – Milímetros

n – Número de Estações

NASA – Administração Nacional Aeronáutica e Espacial dos Estados Unidos

P - Precipitação

PR – Radar de Precipitação

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

Q - Quantis

R² – Coeficiente de determinação

SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNGRH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUPer – Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco

SWAT – Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água

TRMM – Missão de Medição de Precipitação Tropical

TMI – Imageador de Microondas

Var – Variância

VIRS – Radiômetro no Visível e Infravermelho

LISTA DE ANEXO

Anexo 1. Tabela série histórica para o período 1963 a 201766

ARAÚJO, H. L. **Espacialização da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Brígida no sertão pernambucano para suporte à gestão dos recursos hídricos.** 2019. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Recife – PE.

Autor: Helio Lopes Araújo

Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

RESUMO

A disponibilidade hídrica tem sido afetada pela crescente demanda de água, com destaque para o setor agrícola, bem como pelos fenômenos meteorológicos, que provocam irregularidade e variabilidade espacial da precipitação, agravados pelas mudanças climáticas. O regime pluviométrico é crucial para a oferta hídrica, em particular para a alocação de água em açudes no semiárido, podendo inclusive afetar a segurança das barragens. A geoestatística é uma metodologia capaz de incorporar a correlação espacial em seus procedimentos, sendo, portanto, relevante em estudos hidrológicos e de dinâmica da precipitação. A presente pesquisa analisou a distribuição espacial e temporal da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, aplicando técnicas geoestatísticas para identificar essa variabilidade. Foram utilizados registros de 41 estações pluviométricas, com série temporal anual de 55 anos (1963 a 2017) disponibilizados através da rede oficial da Agência Pernambucana de Águas e Clima e complementados pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os dados pluviométricos diretos (manuais e automáticos) e indiretos (por satélite) foram sistematizados e classificados em períodos secos, normais e chuvosos através da Técnica dos Quantis. De acordo com os resultados obtidos, todos os semivariogramas apresentaram alta e média dependência espacial, e através das análises descritivas dos dados, com alcances variando de 20 a 45 km. Os coeficientes de variação apresentaram média dispersão ($CV > 20\%$), indicando média variabilidade espacial dos índices pluviométricos na bacia, o que reforça a necessidade de uma estratégia de monitoramento da precipitação baseada em malha intensamente distribuída.

Termo de indexação: dependência espacial, precipitação, geoestatística, Quantis.

ARAÚJO, H. L. **Spatialization of precipitation in the Brígida river Basin “Sertão” of Pernambuco to support water resources management.** 2019. 67p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Postgraduate Program in Agricultural Engineering - Recife - PE.

ABSTRACT

The water availability has been affected by the increasing water demand, especially for the agricultural sector, due to meteorological phenomena, which contribute to the temporal irregularity and spatial variability of rainfall, aggravated by climate change. The rainfall regime is crucial for the water supply, particularly for water allocations in small reservoirs in the semiarid, and may even affect the safety of such dams. Geostatistics is a methodology able to incorporate spatial correlation in its procedures, being relevant in hydrological and precipitation dynamics studies. The present study analysed the spatial and temporal distribution of precipitation in the Brígida River Basin. Records from 41 rainfall stations, with an annual temporal series of 55 years (1963 to 2017) made available through the official Pernambuco's Water and Climate Agency network and complemented by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) was used to identify this variability. Direct rainfall data (manual and automatic) and indirect (satellite) data were systematized and classified in dry, normal and rainy periods using the Quantile Technique. According to the results, all the semivariograms presented high and medium spatial dependence, and through the descriptive analyses of the data, with ranges from 20 km to 45 km. The coefficients of variation showed intermediate dispersion ($CV > 20\%$), indicating an intermediate variability of the rainfall indices in the basin, requiring a monitoring strategy based on an intensely distributed network.

Keywords: spatial dependence, precipitation, geostatistics, Quantiles.

1.0 INTRODUÇÃO

A precipitação é uma variável hidrológica que usualmente apresenta elevada variabilidade, tanto temporal quanto espacial, requerendo uma rede de monitoramento densamente distribuída, e continuamente operada. Embora sua medição possa ser realizada em equipamentos relativamente simples, há um grande desafio inerente à sua medição, relacionado ao número mínimo de estações necessárias, à participação de operadores devidamente treinados, e a parcerias institucionais que garantam informações de qualidade e em quantidade adequada à sua descrição.

Andrade et al. (2017) ressaltam em estudo da modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, que os modelos hidrológicos são considerados ferramentas poderosas no entendimento desses processos, tais modelos requerem uma série de dados que não estão facilmente acessíveis.

Um fato comum em estudos pluviométricos é a ocorrência de falhas nas séries de dados, seja por um defeito no equipamento, por erro de operação, ou pela não existência de cobertura instrumental na área de estudo, Hasan; Croke (2013) em estudo de preenchimento de falhas de dados diários da precipitação em bacia hidrográfica na Índia, destacaram a importância de séries longas e com baixas variabilidades para permitir uma inferência aceitável dos registros ausentes. Tucci (2001) destaca a necessidade de se realizar o preenchimento de falhas de forma criteriosa, após uma análise de consistência, para não introduzir discrepâncias nas séries disponíveis.

A Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) possui uma rede de estações pluviométricas distribuída em todo o Estado de Pernambuco, com cerca de 240 postos (manuais e automáticos), monitorando e analisando a evolução das chuvas, dos níveis e da vazão dos principais rios e reservatórios, cujas informações são sistematizadas e disponibilizadas através de Sala de Situação. Todas as informações são compartilhadas por meio de boletins e de sistemas de monitoramento, servindo de suporte para a decisão das autoridades responsáveis pela gestão de eventos hidrológicos críticos no Estado.

Os recursos hídricos devem ser geridos de forma a garantir seu eficiente aproveitamento e usos múltiplos. Para a irrigação de culturas, o abastecimento humano e industrial é fundamental que se conheça a precipitação anual (BERTONI & TUCCI, 1993).

Conhecer a precipitação de uma bacia hidrográfica é de suma importância para que a região se desenvolva, e para possibilitar o planejamento hídrico dessa região. Para se ter um conhecimento das disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas é preciso realizar um planejamento para gestão dos recursos hídricos em cada região, para determinação dos usos potenciais e para identificação dos conflitos pelo uso da água (SILVA JÚNIOR; TUCCI, 2017).

As bacias hidrográficas constituem as unidades básicas de gerenciamento de recursos hídricos, de acordo com a Lei das Águas 9.433/1997, e têm sido adotadas em inúmeros trabalhos científicos, em diversas áreas do conhecimento (GUIDOLINI et al. 2013; AVRAM, LUCA, 2017), com foco não apenas na questão dos recursos hídricos, mas aliando elementos físicos, antrópicos e ambientais complementares que caracterizam a bacia (COSTA, SOUZA, SILVA, 2016; JORDAN, WELLER, PELC, 2018).

Uma bacia hidrográfica é formada por um conjunto de áreas drenadas por um rio e seus afluentes, formada a partir dos divisores de água, definindo os riachos e rios, e as zonas de infiltração e recarga dos aquíferos (BARRELLA et al., 2001).

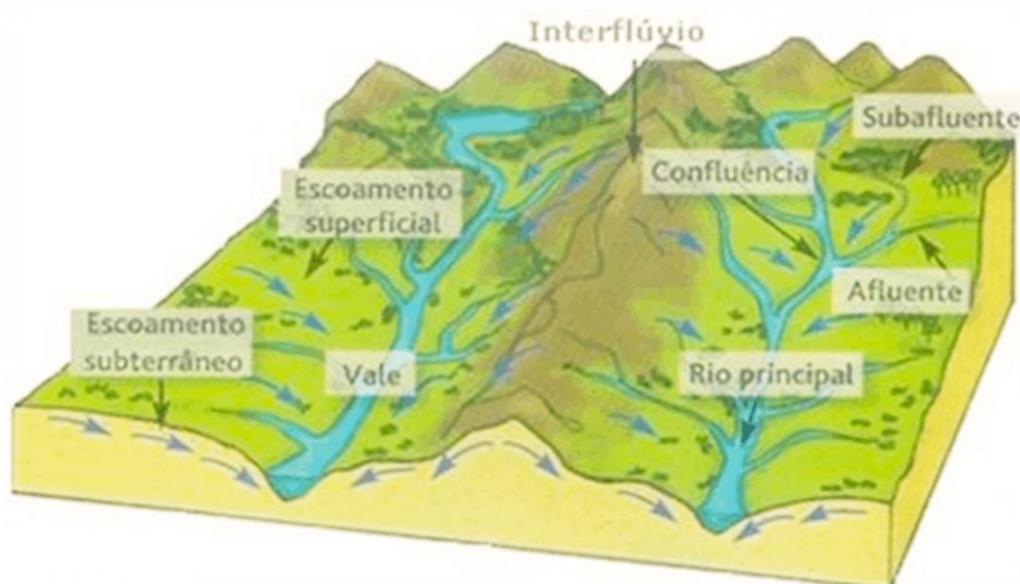


Figura 1. Representação de Bacia Hidrográfica

Fonte: <http://www.prof2000.pt/users/elisabethm/geo8/rio1.htm>

O desenvolvimento de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da

água, e a precipitação espacialmente distribuída (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013).

Os principais problemas ambientais e antrópicos encontrados nas bacias hidrográficas são: expansão da área urbana, ocupação territorial desordenada, manejo inadequado do solo agricultável, expansão agroindustrial, desmatamento, erosão do solo e poluição dos recursos hídricos, assoreamento de rios e lagos, bem como conflitos pelo uso da água (LOPES, 2011).

O desenvolvimento social e econômico, principalmente no semiárido, e o seu potencial de produção, vincula-se à disponibilidade hídrica, afetada pela irregularidade temporal das chuvas, bem como por sua variabilidade espacial, o que dificulta o aproveitamento racional e o planejamento dos múltiplos usos dos recursos hídricos (ANDRADE; NUNES, 2017).

A seca hidrológica é caracterizada pela insuficiência de água nos rios ou reservatórios para atendimento das demandas hídricas em uma dada região, sendo provocada por uma sequência de anos com deficiência hídrica, e agravada por um gerenciamento inadequado dos recursos hídricos, originando o racionamento, ou colapso, em sistemas de abastecimento (CAMPOS; STUART, 2001).

Em regiões áridas e semiáridas, como parte do nordeste brasileiro, é fundamental monitorar períodos de secas e de chuvas, bem como a variabilidade espacial das precipitações. Analisar períodos secos, normais e chuvosos é de suma importância para um adequado planejamento dos recursos hídricos (FREITAS & BILLIB, 1997), e para procedimento de alocação de águas em reservatórios.

As chuvas irregulares e pouco frequentes, os períodos de seca, as mudanças no clima e o uso fragmentado da terra acrescentam complexidade à hidrologia das regiões semiáridas, com elevada intermitência nos escoamentos e nos estoques hídricos, nos reservatórios superficiais e na zona não saturada do solo (MONTENEGRO; RAGAB, 2012). Quando da ocorrência de chuvas de alta magnitude, deve-se também monitorar a segurança das barragens da região, e monitorar as vazões decorrentes, com base nas vazões de projeto dos vertedores, nos regimes hidráulicos decorrentes, e na integridade física dos maciços (SANAGIOTTO, 2003).

No estudo e mapeamento do comportamento espacial da precipitação, diversas são as ferramentas e métodos utilizados (CARDOSO et al., 2018). SILVA et al. (2010) salientam que sendo cada ambiente e evento únicos nas escalas espacial-

temporal, variando de formas e padrões diferentes, não é possível estabelecer um método tido como ideal para mapear as chuvas em todas as situações.

Ao analisar a distribuição espaço-temporal da pluviosidade na bacia hidrográfica do rio Abiaí-PB, Carmo et al. (2015) observaram uma ampla variação pluviométrica. Silva et al. (2010) também verificaram a variação espaço-temporal da precipitação na Bacia do Rio Tapacurá- PE. Constatou-se uma grande variabilidade da precipitação anual na escala espacial.

Com o intuito de caracterizar a variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no Estado do Rio de Janeiro, Sobral et al. (2018) observaram que a espaço-temporalidade dos eventos chuvosos, nas regiões das Baixadas Litorâneas, Costa Verde, Médio Paraíba, Metropolitana e Serrana estão acima da média pluviométrica anual do Estado, enquanto as regiões Centro Sul, Noroeste e Norte estão abaixo da média para o período de estudo.

Trabalho conduzido em todo Agreste Meridional do Estado de Pernambuco por Andrade et al. (2018) evidenciou elevada significância na variabilidade e da média anual da precipitação, bem como elevada dependência espacial. Stefanidis; Stathis (2018) também encontraram alta variabilidade espacial da precipitação na área central de Pindus na Grécia.

Uma das ferramentas utilizadas na caracterização da variabilidade espacial é a geoestatística, que identifica a dependência entre medições, e possibilita estabelecer funções que descrevam quantitativamente tal dependência, contribuindo para obtenção de mapeamentos de alta precisão (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006; VIEIRA, 2000).

Estudos de variabilidade e mudanças climáticas da precipitação têm focado em alterações nos valores médios, havendo, porém, uma necessidade de se verificar mudanças não só em totais pluviométricos, mas também nos seus comportamentos espaciais e temporais (NÓBREGA; FARIAS; SANTOS, 2015).

Zonta et al. (2014) modelaram a dependência espacial de atributos de solos, utilizando geoestatística, enquanto Almeida e Guimarães (2017) utilizaram a geoestatística para caracterizar a dependência espacial de micronutrientes no solo.

Salgueiro e Montenegro (2008) verificaram que a precipitação na Bacia do Ipojuca, em Pernambuco, apresentou forte dependência espacial, e as características climáticas nas diferentes sub-regiões da bacia foram mapeadas utilizando o método

geoestatístico. Concluíram ainda que a referida bacia possui baixa variabilidade temporal na precipitação em relação à variabilidade espacial.

Em avaliação da variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial no Estado de Mato Grosso através da krigagem, De Marco et al. (2016) caracterizaram a variabilidade espacial em todos os decêndios dos meses de outubro e janeiro, período de grande importância para a cultura da soja e para o cultivo do milho segunda safra, sendo a região ao norte do Estado a que apresentou os maiores índices de precipitação.

Para uma caracterização da variabilidade espacial de parâmetros hidráulicos em solos aluviais no Estado de Pernambuco, Montenegro et al. (1999) calcularam os semivariogramas experimentais considerando arranjo de dados de forma que os números de pares de pontos fossem maiores ou iguais a 30 para cada classe de distância.

Santos et al. (2012), em estudos da variabilidade de atributos físicos do solo em vale aluvial no semiárido de Pernambuco, verificaram um coeficiente de variação alto para a condutividade hidráulica do solo e médio para a resistência à penetração de raízes e para as frações granulométricas areia, argila e silte, encontrando alcances variando de 135 m para a condutividade hidráulica a 465 m para o conteúdo de silte.

Para ajuste dos semivariogramas à estrutura de variação da resistência a penetração em um Latossolo Vermelho sob preparo convencional, realizado no Centro Experimental do Instituto Agrônomo em Campinas (SP), Grego & Vieira (2005) ajustaram ao modelo esférico com alcance de 8,75 m.

Em estudos utilizando a krigagem em uma rede pluviométrica no Ceará, Ferreira Filho et al. (2000) ressaltaram a importância de estudar a precipitação para estimar valores em locais onde não havia pluviômetros instalados.

Andrade et al. (2012) utilizaram técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas na identificação dos padrões de variabilidade e dependência espacial da condutividade elétrica, visando mapeamento da salinidade da água subterrânea em vale aluvial do semiárido.

Em estudos da variabilidade espacial de metais pesados em solos agrícolas, Song et al. (2019) empregaram a geoestatística para identificar a poluição causada por estes metais. Moral; Rebollo; Serrano (2019) avaliaram através da geoestatística a fertilidade do solo em pastagem ao norte da cidade de Évora no sul de Portugal.

Li et al. (2019) aplicaram a geoestatística para determinar os padrões de distribuição espacial da água no solo na China, e para identificar os fatores responsáveis pela variação espacial da água no solo em escala regional.

Elesbon et al. (2014) verificaram a espacialização não tendenciosa dos dados hidrométricos das redes fluviométrica e pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Doce, a partir da análise estatística descritiva e da análise geoestatística e concluíram que houve melhorias nas estimativas espacializadas de precipitação com o rearranjo espacial de 12 estações e a inclusão de 67 estações na rede de monitoramento pluviométrico.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida (BHRB), Lopes e Montenegro (2019) investigaram os padrões de variabilidade espacial da umidade e da salinidade em vale aluvial, na Estação Experimental de Agricultura Irrigada de Parnamirim, pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco, e constataram a relevância da mata ciliar na manutenção da umidade do solo, e na redução da sua variabilidade espacial.

O estudo da precipitação na BHRB é de grande relevância para suporte ao planejamento do uso de recursos hídricos no Estado de Pernambuco, e como base à simulação hidrológica na Bacia. A BHRB está localizada em área semiárida, pertencente à Bacia do Rio São Francisco. Nessa região as principais atividades econômicas são a agricultura de sequeiro e a pecuária, com ênfase na caprinocultura. Segundo Ferreira (2017), os recursos naturais na região são explorados em função de atividades como a extração de gesso e madeira, práticas agrícolas e pecuárias, esses efeitos têm potencial para agravar problemas relacionados à disponibilidade de água, sendo incerta a extensão desses danos, quando se insere nas discussões as problemáticas das mudanças climáticas. O rio Brígida tem sua principal nascente na Chapada do Araripe, no município de Exú, Pernambuco, possuindo uma extensão de 129 km até o deságue no rio São Francisco. Seus principais afluentes são o riacho Gravatá e o riacho São Pedro, ambos também nascendo na Serra do Araripe, sendo todos intermitentes.

A BHRB está inserida no domínio de estudo do projeto “ESTUDOS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS COMO BASE PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO - experimentação e modelagem, cenários atuais e futuros”, financiado pelo CNPq, e coordenado pela UFPE, e com participação da UFRPE, na temática de “Previsão e avaliação dos impactos associados à mudança do clima, especialmente na disponibilidade hídrica e

de seus reflexos para a segurança alimentar e energética do Brasil”. O projeto objetiva criação de um Sistema de Unidade de respostas hidrológicas para as bacias hidrográficas de Pernambuco (SUPer), visando contribuir com as decisões políticas, econômicas e sociais do Estado para mitigação da vulnerabilidade da população frente a extremos hidrológico.

O SUPer aumenta substancialmente a usabilidade do SWAT para simular os efeitos das práticas de gestão baseadas em uma ampla variedade de culturas, solos, tipos de vegetação natural, usos da terra e cenários de mudanças climáticas para hidrologia e parâmetros de qualidade de água, como: sedimento, patógenos, nutrientes, demanda biológica de oxigênio, oxigênio dissolvido, pesticidas, temperatura da água. A classificação SWAT é semi-conceitual, semi-distribuída, em tempo contínuo, hidrologia baseada em processos e modelo de qualidade da água que usa um intervalo de tempo diário e várias unidades hidrológicas para simular diferentes processos físicos dentro da área de estudo, como clima, hidrologia (escoamento superficial, percolação, interceptação, infiltração, fluxo subsuperficial, escoamento de base e evapotranspiração), umidade do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e patógenos e manejo do solo (Arnold et al., 2012).

No contexto deste projeto, cabe citar o estudo de Ferreira (2017), aplicando o modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para a Bacia do Brígida, o qual desenvolveu detalhada caracterização da cobertura vegetal na BHRH, mas que apontou a carência de informações hidrológicas disponíveis para uma adequada e ampla modelagem.

A Figura 2 apresenta os domínios de estudo do projeto SUPer, no Estado de Pernambuco.

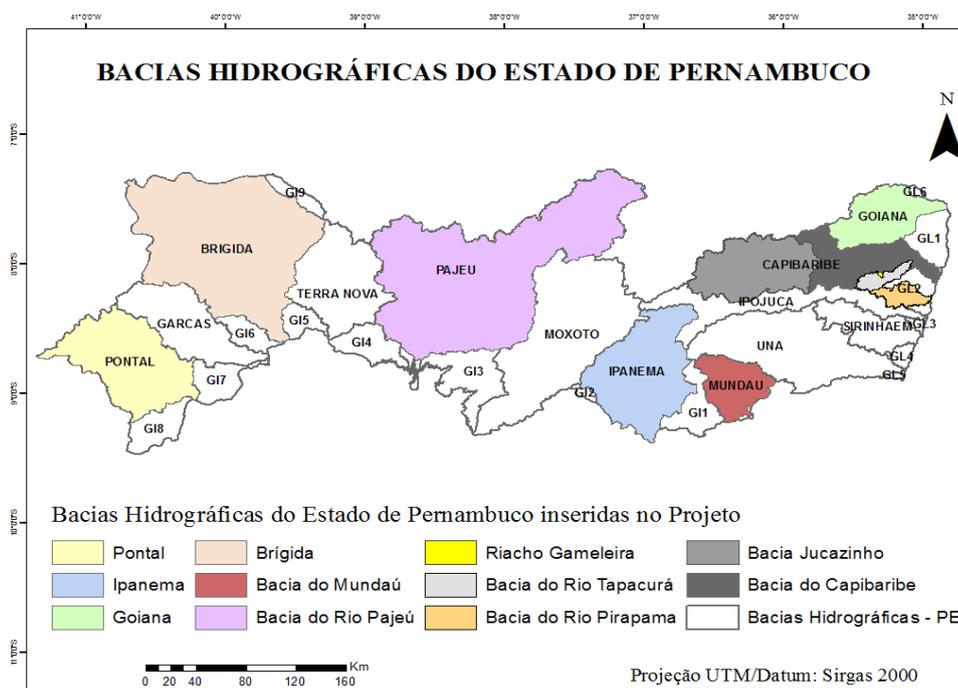


Figura 2. Bacias hidrográficas inseridas no Projeto SUPer/ CNPq, para subsidiar estudos hidrológicos e ampliação de base de dados.

2.0 HIPÓTESES

- As espacializações das estações pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida possibilitam adequada caracterização da variabilidade espacial dos padrões temporais da precipitação na bacia;
- Existem diferenças nos padrões de variabilidade da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida.

3.0 OBJETIVOS

3.1 Geral

Mapear através de técnicas geoestatísticas a variabilidade espacial dos padrões temporais da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, em Pernambuco.

3.2 Específicos

1. Investigar a dependência espacial dos padrões temporais de precipitação;
2. Mapear as incertezas oriundas de pluviômetros manuais, pluviógrafos automáticos e estimativas de satélite, para um preciso mapeamento das precipitações;
3. Analisar as séries históricas pluviométricas através de métodos estatísticos e geoestatísticos para a BHRB.

4.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Hidrologia

É a ciência que trata do estudo da água na Natureza, sendo parte da Geografia Física e abrange propriedades, fenômenos e distribuição da água na atmosfera, na superfície da Terra e no subsolo (PINTO; HOLTZ; MARTINS, 1976), bem como sua relação com o meio ambiente, e com as formas vivas (TUCCI et al., 2013).

4.2 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico se inicia com a evaporação da água na superfície do oceano (Figura 3). O ar úmido eleva-se, esfria e o vapor de água se condensa formando as nuvens. A umidade é transportada ao redor do globo até retornar à superfície como precipitação. Quando a água atinge o solo, os seguintes processos podem ocorrer: parte da água pode evaporar de volta para a atmosfera, a água pode escoar ou penetrar na superfície e tornar-se água subterrânea. A água dos rios e córregos é liberada de volta à atmosfera por meio da transpiração. A fração de água que permanece na superfície da Terra escoar até os lagos, rios e córregos e é levada de volta para os oceanos, onde o ciclo começa novamente.

O ciclo hidrológico é normalmente estudado com maior interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica (COLLISCHONN; TASSI. 2008).

A precipitação, na sua forma mais comum que é a chuva, ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico. Quando o vapor de água se transforma diretamente em cristais de gelo e estes atingem tamanho e peso suficiente, a precipitação pode ocorrer na forma de neve ou granizo (TUCCI et al., 2013).

Parry et al. (2007) afirmam que as influências das mudanças climáticas no ciclo hidrológico podem acarretar alterações na precipitação em regiões tropicais, mudanças nos padrões de chuvas, inundações, desertificação, redução da produção agrícola, déficit hídrico, elevação do nível do mar, perda de biodiversidade, entre outros.

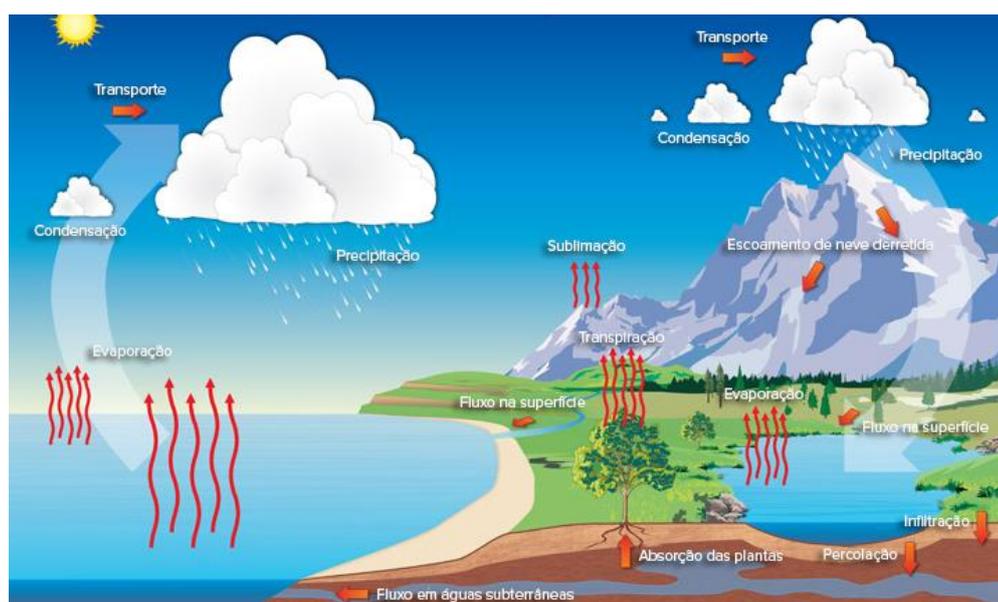


Figura 3. Ciclo Hidrológico, destacando-se a precipitação, a geração do escoamento superficial, e a evapotranspiração (soma da transpiração e da evaporação).

Fonte: Khan Academy

4.3 Bacia Hidrográfica e Gestão

O Brasil detém 12% da água doce do planeta, e desenvolver uma adequada gestão desse recurso é imprescindível e urgente (AMARAL; SILVA; VASCONCELOS, 2018).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, define bacias hidrográficas como sendo unidades de estudo e gestão. Com a promulgação da PNRH, a bacia hidrográfica passa a ser considerada a unidade territorial ideal para o gerenciamento da água, levando à implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos é órgão gestor de recursos hídricos no Estado de Pernambuco, recriada em 2018 com a finalidade de implementar a Política Estadual de Recursos Hídricos e de Saneamento. Atua ainda na gestão de recursos hídricos a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), com a atribuição de executar a Política Estadual de Recursos Hídricos, planejar e disciplinar os usos múltiplos da água em âmbito estadual, realizar monitoramento hidrometeorológico e previsões de tempo e clima no Estado de Pernambuco, bem como operar e alimentar o Sistema de Informações de Recursos Hídricos (SIRH).

O Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CRH é o órgão colegiado superior, deliberativo e consultivo do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco/SIGRH. Entre as funções e atribuições destacam-se a discussão e aprovação da Política Estadual de Recursos Hídricos e a aprovação do Plano de Aplicação dos Recursos do Fundo Estadual de Recursos Hídricos / FEHIDRO. Pernambuco aderiu ao Programa de Consolidação do Pacto Nacional chamado Progestão (que é um programa de incentivo financeiro aos sistemas estaduais para aplicação exclusiva em ações de fortalecimento institucional e de gerenciamento de recursos hídricos, mediante o alcance de metas definidas/; a partir da complexidade de gestão (tipologias A, B, C e D) escolhida pela unidade da federação).

A adesão é voluntária e se dá por meio de decreto oficial específico, e manteve como entidade coordenadora do Programa no estado a APAC, permanecendo com a tipologia C (balanço quali-quantitativo crítico- criticidade qualitativa ou quantitativa) em algumas bacias; usos concentrados em algumas bacias com criticidade quali-quantitativa (áreas críticas); conflitos pelo uso da água com maior intensidade e abrangência, mas ainda restritos às áreas críticas) de gestão. O Estado aprovou o Quadro de Metas junto ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos e assinou o contrato Progestão - ciclo 2 com a ANA, em 27 de novembro de 2018, definindo para a certificação o período de 2018 a 2022.

Os Comitês de Bacias Hidrográficas fazem parte do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. São órgãos colegiados, consultivos e deliberativos que têm como área de atuação: a totalidade de uma bacia hidrográfica; a totalidade de uma sub-bacia hidrográfica tributária do curso de água principal da bacia e/ou grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. O Estado de Pernambuco possui 7 comitês de bacia hidrográfica formados: Metropolitano Sul, Metropolitano Norte, Capibaribe, Goiana, Ipojuca, Una e Pajeú.

Os Conselhos Gestores de Usuários - CONSU são colegiados da Política Estadual constituídos para atuar na área de influência de um reservatório ou microbacia. Atua, de modo particular, nas zonas do Agreste e do Sertão de Pernambuco, onde os rios são intermitentes e a água disponível é acumulada nos açudes e barragens. Cabe aos CONSU: Aprovar o próprio estatuto; Propor critérios de uso, conservação e proteção das águas do reservatório e programas de educação ambiental e sanitária; Acompanhar a elaboração e execução do plano diretor da bacia e dos programas para a sua área de atuação; Mediar os conflitos pelo uso das águas; Motivar a sociedade local para a conservação dos recursos naturais; Participar do Comitê da Bacia Hidrográfica à qual está inserido, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Conselho de Usuário formados no Estado de Pernambuco

CONSUs formados		
(19 colegiados, abrangendo 23 reservatórios)	Bacia Hidrográfica	Dominialidade
Bitury	Ipojuca	DNOCS
Brotas	Pajeú	Estado
Ingazeira	Ipanema	Estado
Poço da Cruz	Moxotó	DNOCS
Rosário	Pajeú	DNOCS
Jazigo	Pajeú	Estado
Serrinha	Pajeú	DNOCS
Barra de Juá	Pajeú	DNOCS
Saco II	Garças	DNOCS
Abóboras	Terra Nova	DNOCS
Nilo Coelho	Terra Nova	Estado

CONSUs formados (19 colegiados, abrangendo 23 reservatórios)	Bacia	
	Hidrográfica	Dominialidade
Boa Vista	Terra Nova	DNOCS
Salgueiro	Terra Nova	DNOCS
Lagoa do Barro	Brígida	Estado
Engenheiro Camacho	Brígida	DNOCS
Algodões/Lopes II/ Camará	Brígida	DNOCS/Estado/Estado
Entremontes	Brígida	DNOCS
Chapéu	Brígida	Estado
Cachimbo/Caiçara/Parnamirim	Brígida	CODEVASF/Estado/Estado

Fonte: APAC (2019)

Cerca de 54% do território da bacia hidrográfica do Rio São Francisco se localiza no semiárido com registro de períodos críticos de estiagem, sendo a bacia do rio Brígida uma das 34 sub-bacias localizado no trecho sub-médio. A Figura 4 mostra os comitês de bacias existentes, juntamente com os conselhos de usuários distribuídos em todo o Estado de Pernambuco.

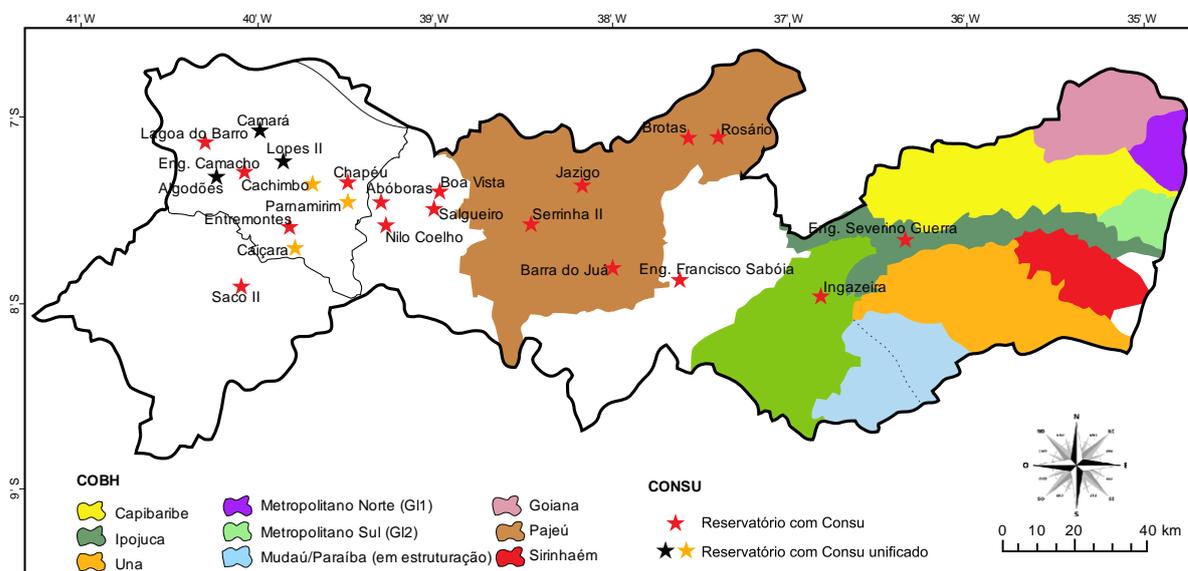


Figura 4. Comitês de Bacia Hidrográficas e Conselhos de Usuários em Pernambuco

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) é um órgão colegiado de natureza consultiva, deliberativa e normativa, integrante do Sistema

Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e vinculado ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

O CBHSF tem como área de atuação a totalidade da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, localizada nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Distrito Federal, delimitada pela sua área de drenagem com sua foz, nas coordenadas 36° 24' longitude oeste e 10° 30' latitude sul. É composto por representantes: I – da União; II – dos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe; III – do Distrito Federal; IV – dos Municípios situados, no todo ou em parte, nessa bacia; V – dos usuários das águas de sua área de atuação; e VI – das entidades civis de recursos hídricos com atuação comprovada nessa bacia.

O Plano de Recursos Hídricos da bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, para 2016-2025, considera ao nível do prognóstico um horizonte de planejamento de longo prazo de 20 anos, sendo observados, também, os horizontes e metas intermediárias, propostos para intervalos de 5 anos (curto prazo) e de 10 anos (médio prazo). Tem como objetivo principal de compatibilizar o quadro atual existente na bacia hidrográfica no que se refere às demandas, quantidade, qualidade, planejamento, situações extremas e de risco, e gerenciamento dos recursos hídricos. Este instrumento permite aos componentes do sistema de gerenciamento de recursos hídricos dar continuidade às suas atuações, de modo a garantir o uso múltiplo, racional e sustentável das águas e do meio ambiente da bacia. Observa-se que toda a bacia do Rio Brígida está inserida no sub-médio do Rio São Francisco.

Segundo o Princípio de Dublin, acordado em reunião na Conferência Rio 92, a gestão dos recursos hídricos para obter efetividade deve considerar aspectos sociais, físicos e econômicos, baseadas nas bacias hidrográficas (WMO, 1992).

4.4 Técnica dos Quantis

A referida técnica se baseia na distribuição estatística de frequência da variável de interesse. Pinkayan (1966) aplicou a técnica dos Quantis com o objetivo de caracterizar padrões de distribuição de chuva dos anos secos e chuvosos em regiões dos Estados Unidos, e investigar se existiria alguma regularidade nos padrões.

A técnica dos Quantis proporciona uma interpretação em termos probabilísticos ou das distribuições empíricas das frequências associadas e podem ser estimados diretamente a partir das séries históricas, embora também possa ser empregado um modelo teórico ajustado aos dados (XAVIER, 2001). A seguir é mostrado como é feito a estimativa de um quantil Q_p qualquer. Para qualquer lei de probabilidade contínua aplicável em dados meteorológicos, representados por uma variável aleatória X , define-se o quantil Q_p para cada número real p entre 0 (zero) e 1 (um), como um valor da temperatura (como exemplo) satisfazendo à condição:

$$\Pr (X \leq Q_p) = p \quad (01)$$

onde p (é a ordem quantílica associada ao quantil Q_p).

Entretanto, se $F = F_x$ for a função de distribuição (ou repartição) de probabilidade associada à variável aleatória contínua X , admitindo uma "inversa" F^{-1} num certo intervalo $[a, b]$, $-\infty \leq a < b \leq +\infty$, tal que $F(a) = 0$ e $F(b) = 1$, então, devido à definição de função de distribuição:

$$F(x) = P (X \leq x) \quad (02)$$

Logo tem-se:

$$F(Q_p) = p \text{ ou} \quad (03)$$

$$F^{-1}(p) = Q_p \quad (04)$$

Assim, a interpretação para o quantil Q_p é que em $p\%$ dos anos o valor X não deve ser maior do que o valor desse Q_p , enquanto para $(100 - p\%)$ dos anos tal valor será excedido (Xavier et al., 2002).

O estudo conduzido por Santos et al. (2016) possibilitou realizar um perfil climatológico da precipitação na cidade de Salvador durante as cinco últimas décadas (1961-2011), para caracterizar os anos secos e chuvosos, utilizando a referida técnica. Já Gouvea et al. (2018) utilizaram a técnica dos quantis para estabelecer precipitações normais e extremas na Bacia do Rio Itajaí-SC.

Para investigar eventos da precipitação (inundações e secas) Abbas; Xuan, (2017) usaram a técnica dos quantis. O método foi capaz de revelar os padrões de inundação e seca em duas regiões: a bacia hidrográfica do Rio Dee no Reino Unido e a região metropolitana de Beijing na China, no período de 1950 a 2004.

4.5 TRMM

O TRMM é uma missão conjunta dos EUA e do Japão, cujo satélite foi lançado em 1997 com o objetivo de coletar dados sobre a estrutura da precipitação, fornecendo informações em áreas tropicais e subtropicais a cada 3 horas (KUMMEROW et al., 2000). A missão TRMM é um projeto em parceria da NASA e da JAXA, com base em satélite construído para estimar a precipitação na faixa tropical. O Satélite é equipado com os seguintes sensores: PR – *Precipitation Radar*, TMI - *TRMM Microwave Imager*, VIRS – *Visible Infrared Scanner*, CERES – *Clouds and Earth's Radiant Energy System* e LIS - *Lighting Imaging*. Um componente-chave do projeto TRMM é o esforço de validação do solo (GV) que consiste em coletar dados de radares, pluviômetros e disdrômetros baseados em terra. Os dados são controlados por qualidade e, em seguida, os produtos de validação são produzidos para comparação com os produtos de satélite TRMM. Os produtos são produzidos usando técnicas desenvolvidas para controlar cuidadosamente a qualidade dos conjuntos de dados do radar terrestre. Os produtos estimam as taxas de precipitação de superfície, ajustadas por dados de pluviometria de qualidade controlada. Para garantir que os produtos tenham a mais alta qualidade possível, os dados de pluviômetro dependentes e independentes (quando disponíveis) são comparados com estimativas de radar por meio de análise de dispersão. Outras análises incluem comparações de séries temporais de taxas de chuvas. Esses esforços resultaram em conjuntos de dados de validação padrão, tanto em escalas de tempo instantâneas quanto mensais.

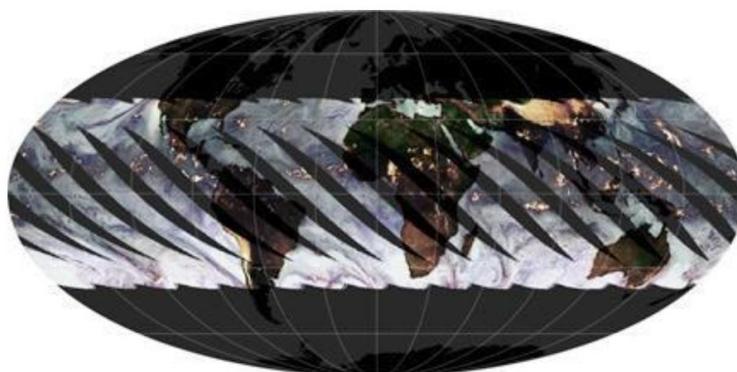


Figura 5. Faixa de cobertura do satélite TRMM

Fonte: *Precipitation Measurement Missions* (2019)

O banco de dados do TRMM pode ser acessado através da plataforma Giovanni (Figura 6), produto 3B43-V7. Esta plataforma é um ambiente on-line da NASA para acesso a diversos tipos de dados das ciências da Terra, como por exemplo, a precipitação. Os dados são de fácil manipulação e distribuídos em grade regular.

The screenshot shows the Giovanni web interface with the following details:

- URL:** <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=ArAvTs&starttime=1998-01-01T00:00:00Z&endtime=2017-12-01T23:59:59Z&dataKeyword=TRMM>
- Page Title:** GIOVANNI The Bridge Between Data and Science v 4.29
- Navigation:** EARTHDATA, Data Discovery, DAACs, Community, Science Disciplines, Feedback, Help, Log out (heliopiassaba)
- Message:** Giovanni v4.29 has been released. Only limited user support available for Giovanni due to lapse in Federal funding...
- Select Plot:** Maps, Comparisons, Vertical, Time Series (Area-Averaged), Miscellaneous
- Select Date Range (UTC):** 1998-01-01 00:00 to 2017-12-01 23:59. Valid Range: 1948-01-01 to 2019-01-25.
- Select Region (Bounding Box or Shape):** Format: West, South, East, North.
- Select Variables:**
 - Disciplines: Hydrology (22), Water and Energy Cycle (9)
 - Measurements: Aerosol Optical Depth (2), Cloud Properties (2), Latent Heat (1), Precipitation (11), Soil Moisture (4), Surface Temperature (2)
- Number of matching Variables:** 22 of 1987. Total Variable(s) included in Plot: 0. Please select at least 1 variable.
- Keyword:** TRMM
- Table of Variables:**

Variable	Units	Source	Temp. Res.	Spat. Res.	Begin Date	End Date	Vert. Slice
Near-Real-Time Precipitation Rate (TRMM_3B42RT v7)	mm/hr	TRMM	3-hourly	0.25 °	2003-03-01	2019-01-25	-
Cloud Ice (TRMM_3A12 v7)	g/m ³	TRMM	Monthly	0.5 °	1997-12-01	2015-03-31	0.5 km
Surface Convective Precipitation Rate (TRMM_3A12 v7)	mm/hr	TRMM	Monthly	0.5 °	1997-12-01	2015-03-31	-
Graupel (TRMM_3A12 v7)	g/m ³	TRMM	Monthly	0.5 °	1997-12-01	2015-03-31	0.5 km
- Footer:** Responsible NASA Official: Angela Li, Web Curator: M. Hegde, Powered By, Contact Us, Reset, Plot Data

Figura 6. Plataforma Giovanni, para acessar informações pluviométricas referentes à Missão TRMM.

Fonte: <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

4.6 Geoestatística

A geoestatística é um ramo de conhecimento da estatística e possui procedimentos para analisar dados com dependência espacial ou temporal, ou seja, cujos vizinhos próximos são mais semelhantes entre si do que aqueles separados por distâncias maiores. A condição essencial para o uso de geoestatística é que se tenha as coordenadas geográficas da posição de onde as amostras foram retiradas ou as medidas realizadas. Sem o conhecimento das coordenadas dos pontos onde foram efetuadas as medidas, sejam elas obtidas por GPS, por métodos topográficos, como distâncias a partir de uma origem arbitrária, ou qualquer outro método, não é possível aplicar a geoestatística (VIEIRA; XAVIER; GREGO, 2008).

A geoestatística é uma divisão da estatística aliando variáveis aleatórias ao conceito de variáveis regionalizadas, gerando assim um conceito de funções

aleatórias, espaciais que apresentam estrutura de dependência. Os métodos geoestatísticos são baseados em modelos que incluem autocorrelação (relações estatísticas entre os pontos medidos). Estas técnicas não só tem a capacidade de produzir uma superfície de previsão, mas eles também podem fornecer alguma medida da incerteza das estimativas.

A partir da década de 1980, a geoestatística passou a ter ampla aplicação, pois além de Lavra e Prospecção Mineira, é utilizada em Agricultura de precisão, análise espacial de crimes, cartografia, climatologia, ecologia da paisagem, engenharia florestal, epidemiologia, geologia ambiental, geologia do petróleo, geotecnia, hidrogeologia, pedologia e hidrologia. Praticamente todas as últimas versões de *softwares* para confecção de mapas ou sistemas de informações georreferenciadas apresentam módulos com métodos geoestatísticos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O cálculo do semivariograma, como a maioria técnicas de interpolação, baseia-se na suposição de que as medições que são próximas uma das outras são mais parecidas do que aquelas mais distantes (quantificada aqui como autocorrelação espacial). O semivariograma é um meio para explorar esse relacionamento, onde pares de pontos das distâncias próximas devem ter uma diferença de medição menor do que aquelas que estão mais distantes umas das outras. A medida em que esta suposição é verdadeira pode ser examinada no semivariograma.

O semivariograma é a ferramenta da geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável. Uma aplicação imediata do semivariograma é a utilização das informações geradas na interpolação, ou seja, na estimativa de variáveis em locais não amostrados e posterior mapeamento. O interpolador que utiliza o semivariograma em sua modelagem é chamado de krigagem. O nome krigagem é uma homenagem ao engenheiro sul-africano D. G. Krige, engenheiro de minas que foi o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação de reservas em mineração (DELFINER; DELHOMME, 1975). Verificou que sua variância das concentrações de ouro tinha características espaciais, e que teria uma relação entre as concentrações de ouro e as distâncias entre amostras.

Para a aplicação da krigagem, assume-se que sejam conhecidas as realizações $z(t_1)$, $z(t_2)$, ... $z(t_n)$ da variável $Z(t)$, nos locais t_1 , t_2 , ... t_n ; que o

semivariograma da variável já tenha sido determinado; e que o interesse seja estimar um valor z^* na posição t_0 , localizado no domínio.

O método de krigagem leva em consideração as características espaciais de auto correlação de variáveis regionalizadas. As variáveis regionalizadas geralmente apresentam certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para estimar a variável em pontos onde o valor da variável seja desconhecido. Para verificar a continuidade dos dados deve-se realizar uma análise semivariográfica. As vantagens primordiais do método da krigagem estão relacionadas à exatidão nos locais amostrados à precisão da estimativa, à não tendenciosidade e à possibilidade de estimar as incertezas do mapeamento.

A geoestatística assume que todos os valores em sua área de estudo são o resultado de um processo aleatório. Um processo aleatório não significa que todos os eventos sejam independentes. A geoestatística é baseada em processos aleatórios com dependência. Na Figura 7 pode-se observar os protocolos para o mapeamento da variabilidade espacial. Um conjunto de técnicas são utilizadas para analisar e prever os valores de uma variável distribuída no espaço, ou seja, caracterizar a variabilidade espacial dos dados. Um modelo deve ser construído para explicar os dados amostrados, com os valores adquiridos pelas amostras (SILVA JÚNIOR, 2010).

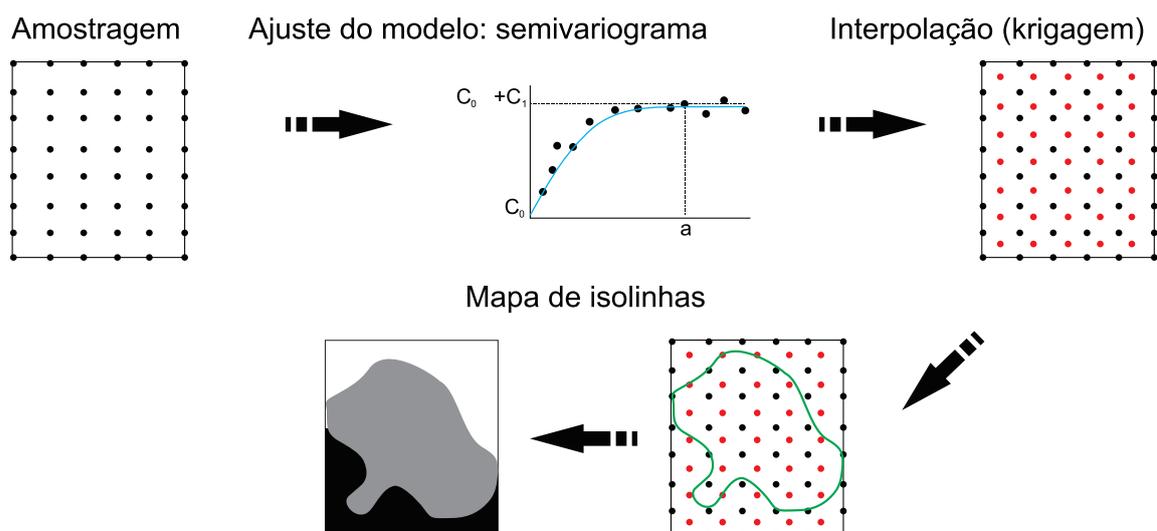


Figura 7. Protocolos para mapeamento da variabilidade, utilizando a geoestatística.

Fonte: Adaptado de Siqueira, 2019

5.0 MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do Rio Brígida está localizada no Alto Sertão de Pernambuco, entre os paralelos $07^{\circ} 19' 02''$ e $08^{\circ} 36' 32''$ S, e meridianos $39^{\circ} 17' 33''$ e $40^{\circ} 43' 06''$ W. A área da bacia é de alta representatividade do semiárido Pernambucano, com $13.495,73 \text{ km}^2$, correspondendo a 13,73% da superfície total do Estado de Pernambuco (ACCIOLY et al., 2015), estando inserida na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, na Região do Sub-Médio.

A bacia abrange 15 municípios do Estado, sendo totalmente inseridos na bacia: Bodocó, Granito, Ipubi, Trindade Exú, Moreilândia Araripina, Ouricuri, Parnamirim e os parcialmente inseridos: Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Maria da Boa Vista, Santa Filomena e Serrita. A localização da BHRB e a rede de estações pluviométricas encontram-se na Figura 8.

(A)

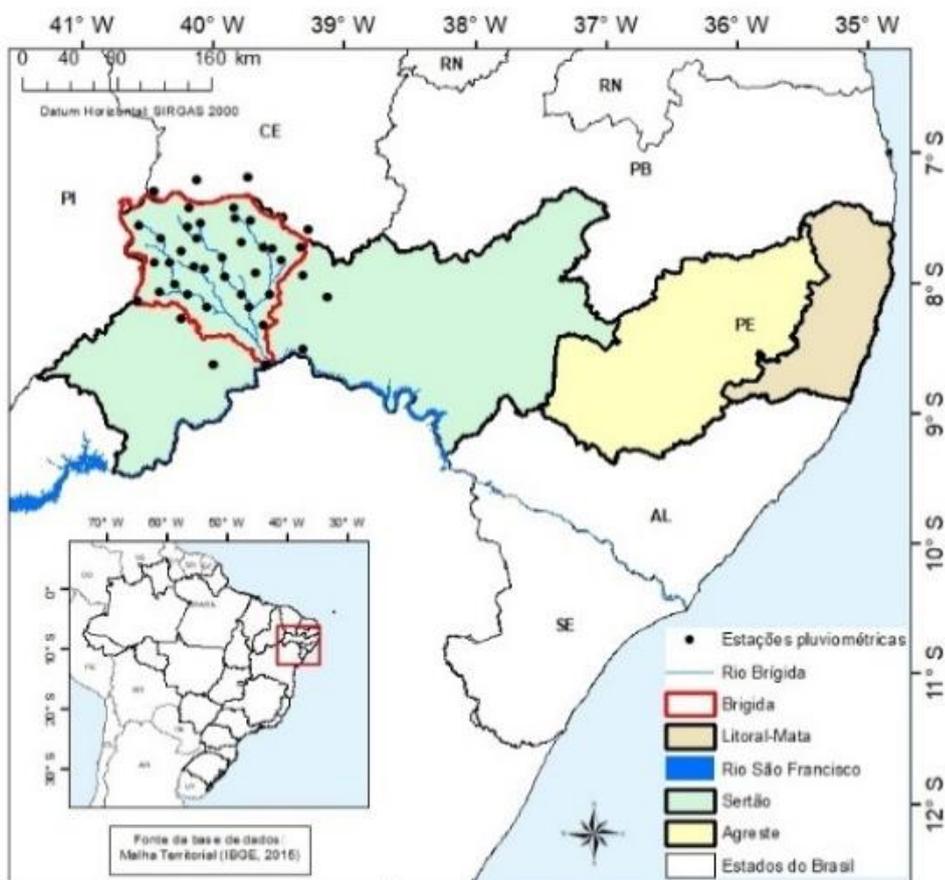




Figura 8. A) Mapa de distribuição espacial dos postos pluviométricos, B) Figura Altimetria para a Bacia Hidrográfica do Rio Brígida (BHRB)

Existe elevada intermitência da disponibilidade hídrica na bacia do rio Brígida. Dessa forma, há que se armazenar os recursos hídricos em reservatórios. Esses reservatórios são necessários para o abastecimento de indústrias e cidades, e para as atividades agropecuárias. A situação dos reservatórios no Sertão de Pernambuco de acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) é crítica. Dos 39 reservatórios localizados no Sertão do Estado, 36 estão em colapso, como menos de 3% do volume útil. Os reservatórios da bacia do rio Brígida apresentam capacidade de armazenamento superior a 1 milhão de m^3 , como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Lista dos reservatórios e suas capacidades na bacia do rio Brígida

Reservatório	Município	Capacidade (m³)
Algodões	Ouricuri	54.481.874
Araripina (Baixo)	Araripina	3.702.230
Barriguda	Araripina	1.617.979
Cachimbo	Parnamirim	31.007.000
Caiçara	Parnamirim	10.500.000
Camará	Bodocó	5.300.000
Chapéu	Parnamirim	188.000.000
Eng. Camacho	Ouricuri	27.664.500
Entremontes	Parnamirim	339.333.700
Lagoa do barro	Araripina	13.161.975
Lopes II	Bodocó/Ouricuri	23.935.360
Manuíno	Ipubi	1.984.117
Parnamirim	Parnamirim	5.715.000
Rancharia	Araripina	1.042.810
Sítio dos Moreiras	Moreilândia	2.096.964
Varzinha	Ouricuri	1.127.160

Fonte: APAC (2019)

Este trabalho foi desenvolvido com as séries históricas de precipitação anual disponibilizadas pela APAC, e complementadas pelo TRMM. A distribuição espacial das estações pluviométricas está apresentada na Figura 8. O período de estruturação das séries históricas foi de 55 anos (1963-2017).

Foram obtidos dados do TRMM para o período de 01 de janeiro de 2016 a 31 de dezembro de 2017, na resolução espacial de 0.25° x 0.25°. Não foram acessados os dados do ano do TRMM de 2018 devido à não atualização da base do banco de dados até a data de finalização deste documento, motivo esse ocasionado por uma greve do governo americano que afetou este setor.

Os dados foram organizados para definição dos Quantis climatológicos para o período em estudo. A mesma fundamentou-se na frequência acumulada, segundo método proposto por Pinkayan (1966), e descrito por Xavier e Xavier (1987) e Xavier (2001), para avaliar a ocorrência dos anos secos e chuvosos em bacias hidrográficas. Os Quantis empregados para caracterização da precipitação foram classificados em: seco (0-35%), normal (35-65%), chuvoso (65-100%).

Com a classificação dos anos através dos seus regimes pluviométricos, selecionou-se cinco anos de cada classe (seco, normal e chuvoso) com disponibilidade de dados suficiente para a aplicação de metodologia geoestatística. Como critério, adotou-se número mínimo de estações igual a 30, conforme Journel & Huijbregts (1978).

Os dados das estações pluviométricas localizadas na área de estudo foram avaliados através da análise estatística descritiva para a verificação do comportamento estatístico em relação à variabilidade. Conforme os valores do coeficiente de variação (CV), o grau de variabilidade classificado de acordo com Warrick e Nielsen (1980), $CV < 12\%$ baixo, $12 \leq CV \leq 60\%$ médio e $CV > 60\%$ alto grau de variabilidade espacial.

Os dados discrepantes foram detectados e removidos com base no critério de Hoaglin; Mosteller; Tykey (1983), que classificam os outliers como valores menores que L_i ($L_i = Q_i - 1,5 A_i$) ou maiores que L_s ($L_s = Q_s + 1,5 A_i$), onde: Q_i e Q_s são os quartis inferior (25%) e superior (75%), respectivamente, e $A_i = Q_s - Q_i$ representa o intervalo interquartil.

Os dados foram avaliados quanto à aderência à Distribuição Normal utilizando o Teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de significância. O teste admite que a distribuição da variável que está sendo testada seja contínua. O teste utiliza a distribuição de frequência acumulada, que ocorreria dada a distribuição teórica, e a compara com a distribuição de frequência acumulada observada. A distribuição teórica representa o que seria esperado sob H_0 , então, verifica-se se as distribuições teórica e observada mostram alta divergência.

A avaliação da análise da dependência espacial foi efetuada através do semivariograma experimental a partir das estimativas das semivariâncias obtidas através da equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i + h) - Z(X_i)]^2 \quad (05)$$

onde: $\gamma(h)$ = semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$; $N(h)$ = número de pares de valores medidos; h = distância entre pontos amostrais; $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ = valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e x_i+h ($i = 1, \dots, n$), separados pelo vetor h .

Previamente à estimativa das semivariâncias, foi verificada a existência de tendência nos dados pluviométricos, em particular analisando a possível influência da topografia nas precipitações (efeito orográfico). Para o caso da Bacia do Brígida, ocorre destacar a chapada ao Norte (conhecida como Chapada do Araripe), com cotas topográficas atingindo 959 m. Tal verificação foi realizada com base no ajuste de polinômios de grau 3 ou inferior à superfície de medidas, conforme Landim (2003), como:

$$Z_i(X, Y) = (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + \dots) + e_i(x_i, y_i), \quad (06)$$

Onde: $Z_i(X, Y)$ é a variável mapeada em função das coordenadas x_i e y_i e $e_i(x_i, y_i)$ representa os resíduos; a_0, a_1, a_2, a_3 são os parâmetros associados ao modelo que proporcionam o melhor ajuste aos dados observados.

Com os semivariogramas experimentais, ajustou-se modelos teóricos, sendo testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, definidos matematicamente a partir das seguintes variáveis.

Efeito pepita (C_0) – que representa a semivariância para distâncias menores que as distâncias de separação entre pares de medidas, segundo a malha adotada.

Patamar (C_0+C_1) – assíntota horizontal das semivariâncias;

alcance (A) – distâncias máximas de correlação entre os valores medidos.

Os modelos de semivariograma podem ser expressos conforme equações 02 a 04 (JOURNAL; DEUTSCH et al., 1998):

Modelo Esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{se } h \leq a \\ C, & \text{se } h \geq a \end{cases} \quad (07)$$

Modelo Exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (08)$$

Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{(3h)^2}{a^2}\right) \right] \quad (09)$$

em que C_0 o efeito pepita; $C=C_0+C_1$ é o patamar; a o alcance; e h a distância entre pontos.

Utilizou-se a técnica Jack-Knifing para validação dos semivariogramas, proposto por Vauclin et al. (1983). Segundo Montenegro & Montenegro (2006), é a técnica onde a cada valor medido é comparado com o valor interpolado no mesmo local pelo método da krigagem, e calculando a distribuição dos erros normalizados, que devem apresentar média zero e desvio padrão um.

Após validar os semivariogramas, foi executada a krigagem dos dados. O grau de dependência espacial (GDE) foi estimado tendo como base a classificação de Cambardella et al. (1994), baseada no valor da relação $C_0/(C_0+C_1)$, para a qual valores inferiores a 25% caracterizam alta dependência, entre 26 e 75%, média dependência e acima de 75%, baixa dependência.

6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações pluviométricas para a BHRB são extensas e distribuídas, porém apresentando consideráveis falhas de registro. A Figura 9 apresenta a precipitação anual média nos postos pluviométricos da bacia, ao longo da série histórica estudada.

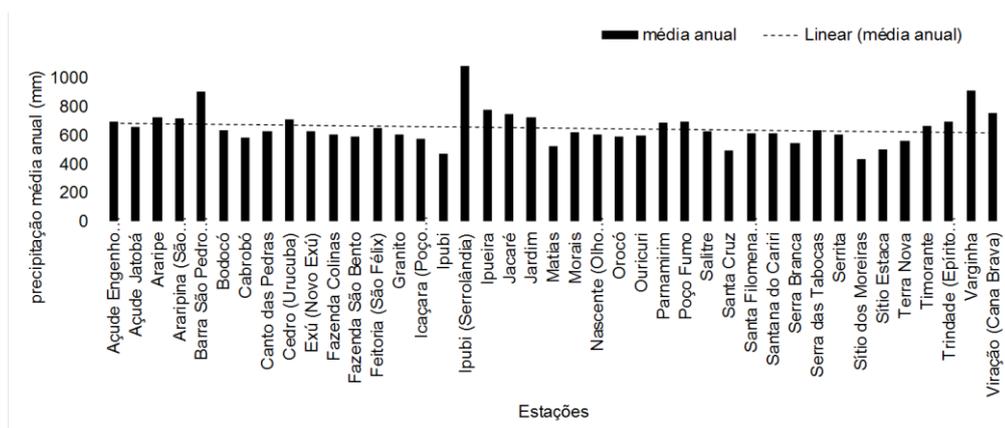


Figura 9. Precipitação anual média na bacia, ao longo da série histórica estudada

Os períodos de falhas são variáveis entre as estações, gerando conseqüentemente uma malha espacial dinâmica no tempo, para fins de mapeamento. Na Figura 10 pode-se identificar o número de dados para cada posto pluviométrico, dentro da série histórica.

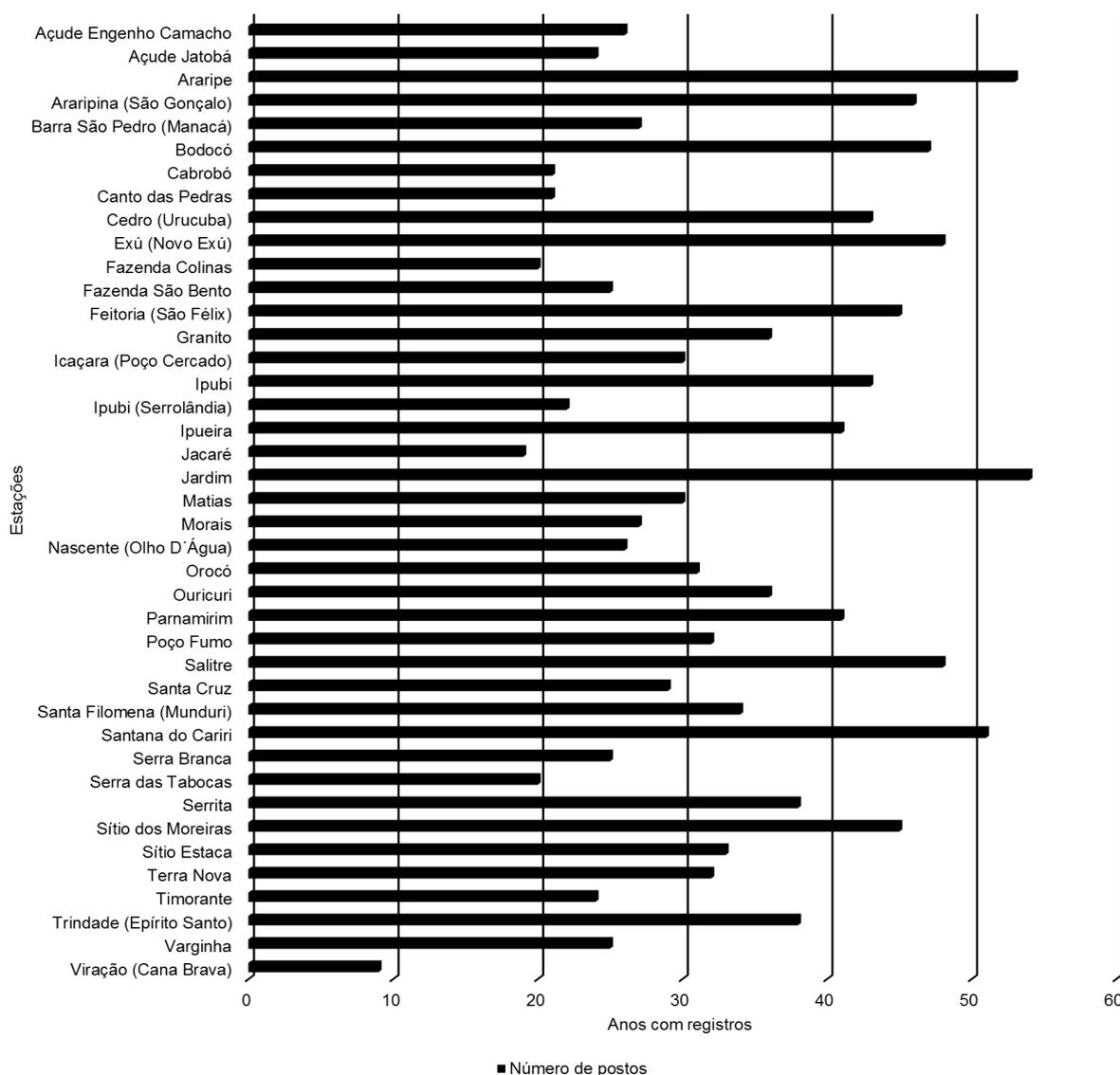


Figura 10. Gráfico com número de registros de cada estação no período 1963-2017.

Mais detalhes da série histórica utilizada neste estudo podem ser observados no Anexo 1.

A correlação e a análise de regressão foram adequadas entre os dados do TRMM e os registros diretos nos pluviômetros e pluviógrafos. Os resultados revelaram que existe correlação significativa com o TRMM, com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,70$, como mostrado na Figura 11.

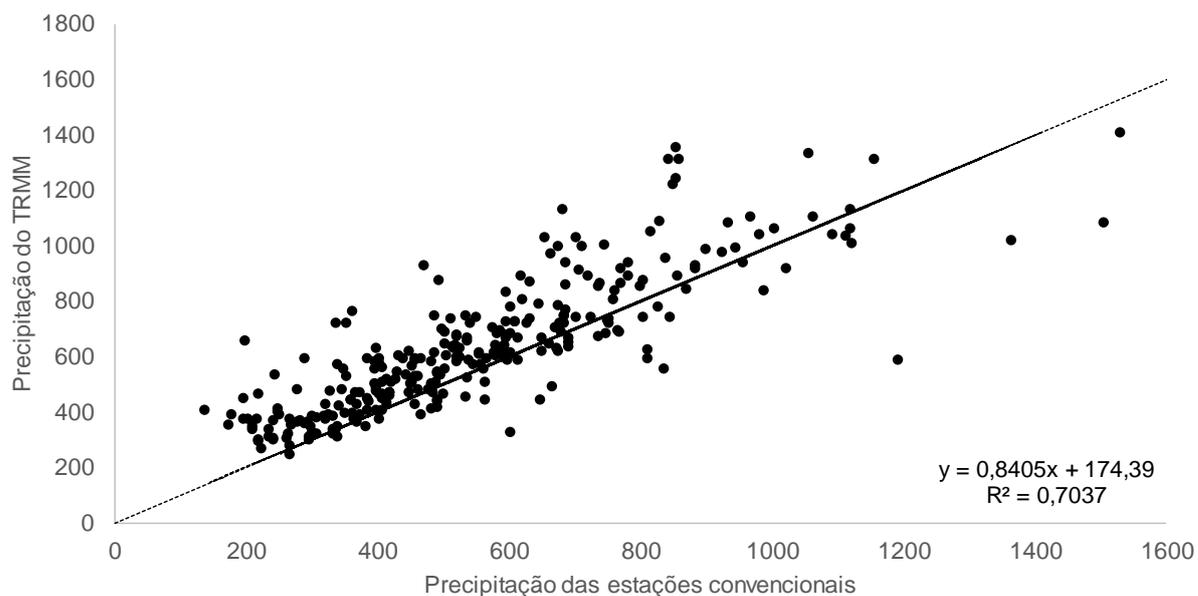


Figura 11. Gráfico de correlação entre os índices pluviométricos das estações e do TRMM

Li; Zhang; Xu (2012) igualmente encontraram elevadas correlações lineares entre a precipitação de TRMM e os dados pluviométricos, com os coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,81 e 0,89 para as estações individuais, e 0,88 para os dados médios. Cohen Liechti et al. (2012) também demonstraram que os produtos TRMM apresentam bom desempenho em relação à calibração com redes de estações em solo, na bacia do Rio Zambeze, localizada no sul do continente africano.

Diversos estudos foram realizados para comparar e avaliar produtos TRMM com precipitações medidas (MEDHIOUB et al., 2019; NUR et al., 2018; AIRES, NETO, DE MELLO, 2017; DA SILVA-FUZZO, ROCHA, 2016; XUE et al., 2013).

Neste estudo, as informações de TRMM foram utilizadas para complementar a série nos anos de 2016 e 2017, os quais apresentaram séries com muitas falhas, e baixo número de pluviômetros aptos a serem incluídos na análise geoestatística. A forma como a complementação ocorreu para o preenchimento dos dados faltosos foi a seguinte: com a localização da estação obtém-se o valor da precipitação no site da NASA (esse dado pode ser obtido como horário, diário, mensal) em formato CSV que pode ser manipulado no Microsoft Excel®; após obtenção deste dados, os mesmos foram colocados lado a lado com os dados originais das estações, que continham as falhas e realizado o preenchimento nos anos faltosos.

A Tabela 3 apresenta a demarcação das classes e intervalos médios da precipitação anual em relação as ordens dos Quantis. A precipitação anual para a BHRB nos anos avaliados pela técnica dos Quantis, variou de 272,3 mm a 1468,5 mm.

Tabela 3. Limite das classes e intervalos médios da precipitação anual em relação com as ordens dos Quantis.

Classes	Quantis	Intervalo médio da precipitação (mm)	
		Mínimo	Máximo
Seco	$P < Q_{0,35}$	272,3	485,3
Normal	$Q_{0,36} \leq Q_{0,65}$	485,4	728,7
Chuvoso	$P > Q_{0,66}$	728,8	1468,5

A Classificação completa da série histórica da precipitação de acordo com a técnica dos Quantis para BHRB pode ser observada na Tabela 4. Trabalho conduzido por LOPES; GUIMARÃES; MELO, (2015), na região de Petrolina/PE, gerou valores variando de 107,2 a 1023,5 mm/ano. Já Brito et al. (2004), em estudo no Estado da Paraíba usando a técnica dos Quantis, mostraram que a referida metodologia foi adequada para a classificação de períodos secos e chuvosos.

Tabela 4. Classificação do histórico da precipitação média de acordo com a técnica dos Quantis, e o número de postos disponíveis e sem falhas para análise.

Seco			Normal			Chuvoso		
Nº Postos	Ano	Média (mm)	Nº Postos	Ano	Média (mm)	Nº Postos	Ano	Média (mm)
16	1991	485,3	9	2010	728,7	35	1985	1468,5
29	1987	481,4	37	1971	724,7	31	1974	1002,8
11	2013	477,9	30	1977	713,7	36	1964	979,4
41	2016	460,1	25	1996	707,8	18	2004	920,8
36	1982	449,4	10	2011	706,0	31	1988	881,0
16	2003	445,8	38	1968	680,0	21	1989	851,3
41	2017	432,5	30	1986	674,3	37	1967	841,3
20	2001	418,6	15	2005	665,6	13	2009	821,9
16	2015	404,3	33	1965	663,4	36	1979	804,9
22	1990	402,8	36	1975	657,8	34	1980	763,3
35	1983	340	37	1966	651,1	36	1973	758,5
20	1998	294,8	32	1978	625,8	11	2008	742,0
10	2012	291,7	20	1977	619,4	38	1984	733,5
13	1993	272,3	38	1969	606,6	33	1963	732,3
			11	2007	593,0			
			16	1999	582,9			
			35	1981	582,8			
			17	1995	577,2			
			38	1976	576,4			
			37	1970	561,0			
			18	2000	538,9			
			36	1972	527,0			
			13	2014	523,4			
			18	2002	513,6			
			22	1994	512,3			
			17	2006	506,9			
			11	1992	487,4			
Média		404,1			611,4			878,7
Desv. Padrão		74,4			75,0			191,1
CV %		18,41			12,27			21,75

A estatística descritiva das precipitações anuais na Tabela 5 mostra que todos os dados apresentaram distribuição Normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Gomes et al. (2007) ressaltam que a distribuição Normal evidencia o atendimento às pressuposições requeridas para a aplicação das técnicas geoestatísticas.

Observa-se que os valores da diferença entre a média e a mediana são baixos, indicando que os valores se encontram simetricamente distribuídos em torno da média e da mediana, evidenciando que a distribuição é simétrica, e contribuindo para a caracterização de uma distribuição Normal dos dados, intensificados pelo baixo coeficiente da curtose, caracterizando a distribuição como platicúrtica.

Segundo o coeficiente de variação (CV) da precipitação anual, verifica-se que a variabilidade desse atributo é médio, segundo classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980).

Tabela 5. Estatística Descritiva da Precipitação anual da BHRB

	Média	Mediana	Max	Min	n	Var	CV (%)	a	C
Período Seco									
1982	449,3	413,4	1182,2	148,2	36	51525	50,5	0,9	1,5
1987	476,4	472,2	903,0	284,6	29	17763	27,9	1,2	2,7
1983	340,0	340,1	521,9	175,3	35	7006	24,6	0,4	-0,01
2016	460,0	455,0	621,2	231,8	41	9806	21,5	-0,4	-0,6
2017	432,5	405,5	658,6	177,0	41	15443	28,7	0,2	-0,7
Período Normal									
1969	606,6	609,4	1001,2	350,2	38	23469	25,2	0,6	0,3
1968	680	726,8	990,2	306,2	38	28945	25,0	-0,4	-0,3
1976	576,4	557,4	1029,3	343,2	38	34951	32,4	0,6	-0,5
1970	560,9	560,5	838,1	374,2	37	15574	22,2	0,5	-0,5
1972	527,0	536,5	749,1	295	36	10350	20,3	-0,5	0,1
Período Chuvoso									
1964	979,4	904,3	1876	391,3	36	107423	33,4	1,1	1,5
1967	841,3	816,3	1322,6	385,5	37	46316	25,6	0,2	-0,3
1974	1002,8	972,8	1914	453	31	83939	28,9	1,1	3,0
1984	733,5	728,4	1681,4	122,2	38	56824	32,5	1,4	6,6
1985	1468,5	1413,1	4146,9	994,6	35	277135	35,8	4,1	20,7

Na análise *box-plot* (Figura 12 A), as linhas extremas representam os valores máximos e mínimos observados, o 1º e 3º quartil delimitam a caixa, sendo o quadrado interno referente ao valor da mediana. Valores atípico (discrepante), é uma observação que apresenta um grande afastamento das demais (que está "fora" dela). Foram observados ocorrência de valores discrepantes e valores extremos nos períodos seco e chuvoso. Tais valores foram removidos da série. Observou-se assimetria positiva, com o primeiro e o terceiro quartis apresentando simetria adequada em torno do valor mediano, que está localizado aproximadamente no centro das caixas, o que é consistente com a hipótese de distribuição Normal.

Analisando os anos individualmente (Figura 12 B), os registros de 1982, 1983, 1987 e 1972 são simétricos, os de 2017, 2016, 1984, 1970 e 1964 apresentaram assimetria positiva, enquanto que as precipitações de 1969, 1968, 1967, 1974, 1976 e 1985 apresentaram assimetria negativa.

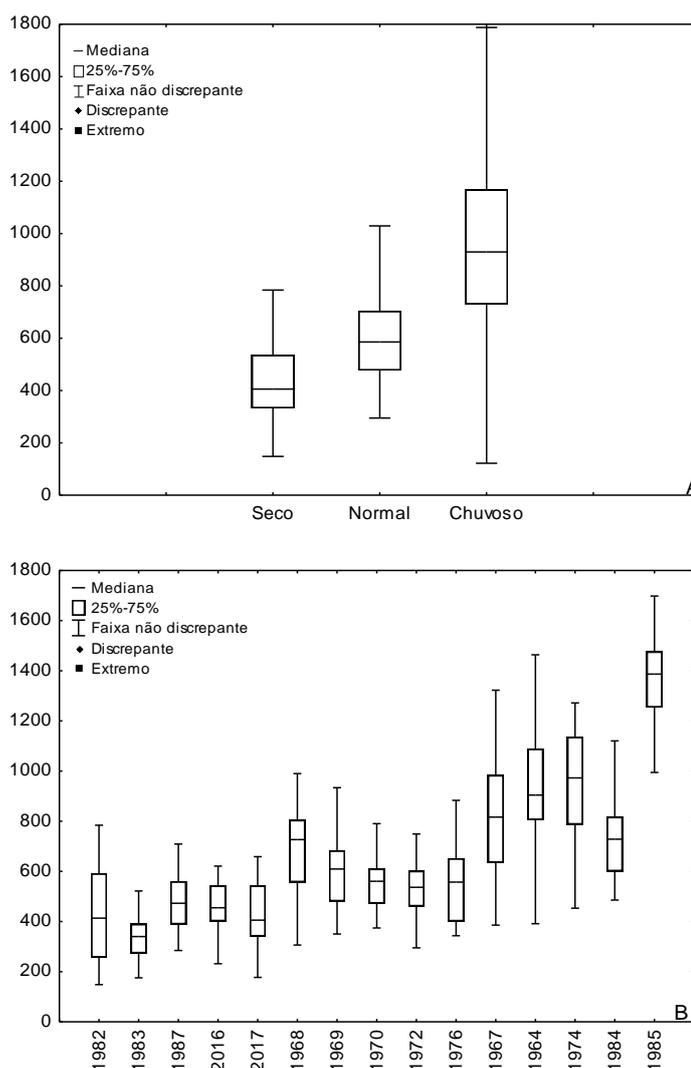
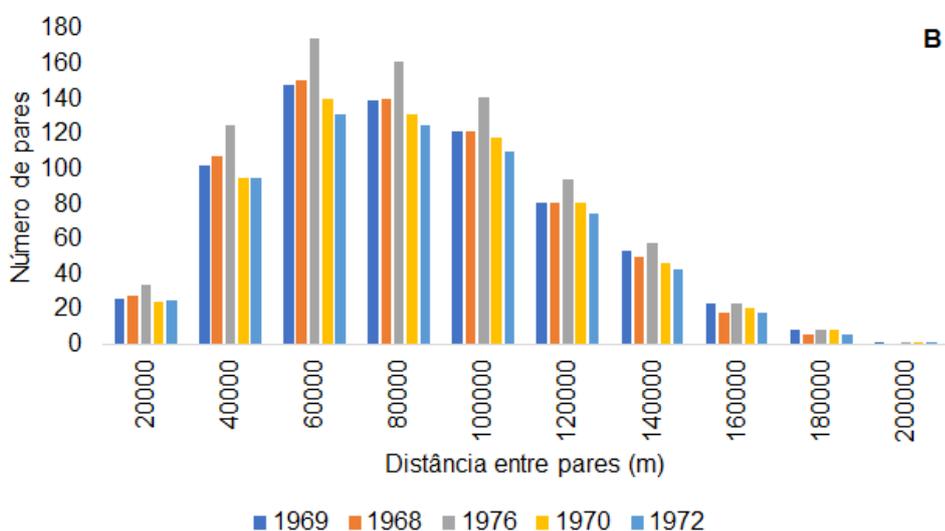
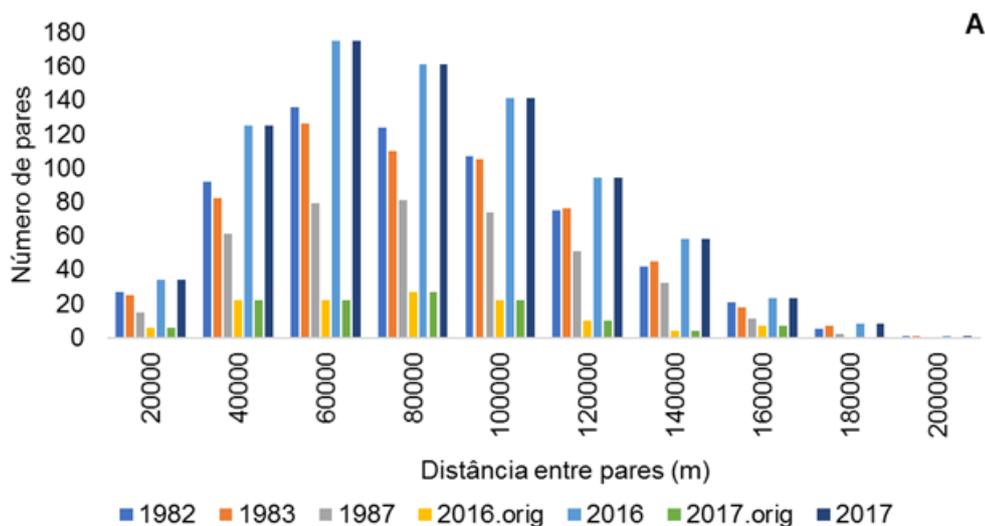


Figura 12. *Box-plot* da precipitação (A) períodos seco, normal e chuvoso (B) anual

Para fins de estimativas geoestatísticas, uma regra prática usada no cálculo dos semivariogramas experimentais é adotar pelo menos 30 pares de pontos no cálculo de cada semivariância experimental. As distribuições de distâncias de separação entre pares de postos pluviométricos estão agrupadas em intervalos de classe, na Figura 13A. Verifica-se que, para as menores distâncias, os anos de 2016 e 2017 com os dados originais (ou seja, sem preenchimento com o TRMM) não poderiam ter suas precipitações anuais analisadas através da geoestatística, pois os mesmos não apresentam um número mínimo de pares necessário para se proceder à análise.

Nas classes de 20000 m e de 40000 m de distância de separação, é possível a adequada estimativa de semivariâncias experimentais, possibilitando analisar a estrutura de dependência espacial entre os postos pluviométricos.



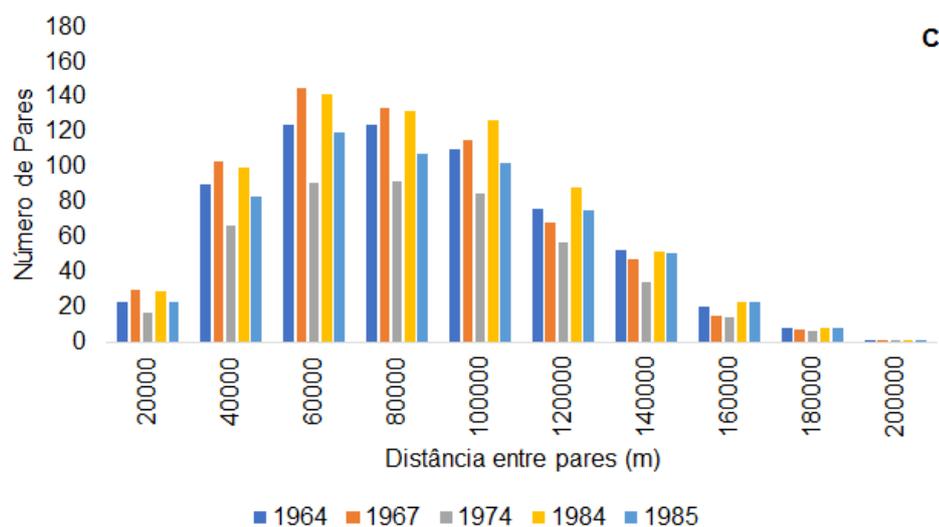


Figura 13. Histograma da distribuição das distâncias (em m) entre pares de pontos, para o período seco (A) período normal (B) e período chuvoso (C)

Na análise dos semivariogramas, verificou-se a existência de tendência nos dados de precipitação, em particular a interferência da topografia na precipitação. Embora se verifique que, isoladamente, algumas localidades na região da Chapada do Araripe apresentem precipitações mais elevadas para alguns anos, não se verifica uma tendência estatisticamente significativa da topografia provocar alterações nas precipitações totais anuais.

Para análise de tendências, as correlações entre precipitação e altitude apresentaram baixos coeficientes de determinação. Dancey e Reidy (2006) classificam o grau de correlação entre as variáveis como fraco, (para r^2 de 0,10 a 0,30), moderado, (para r^2 de 0,40 a 0,60), e forte (para r^2 de 0,70 a 1,00). Em análise dos gráficos da Figura 14, e conforme a referida classificação, observa-se que precipitação e altitude apresentam uma correlação fraca. Trabalho conduzido por Roldão; Santos; Oliveira (2012) também não evidenciou correlação entre precipitação e a altitude, em Mesorregião Sul e Sudoeste de Minas Gerais.

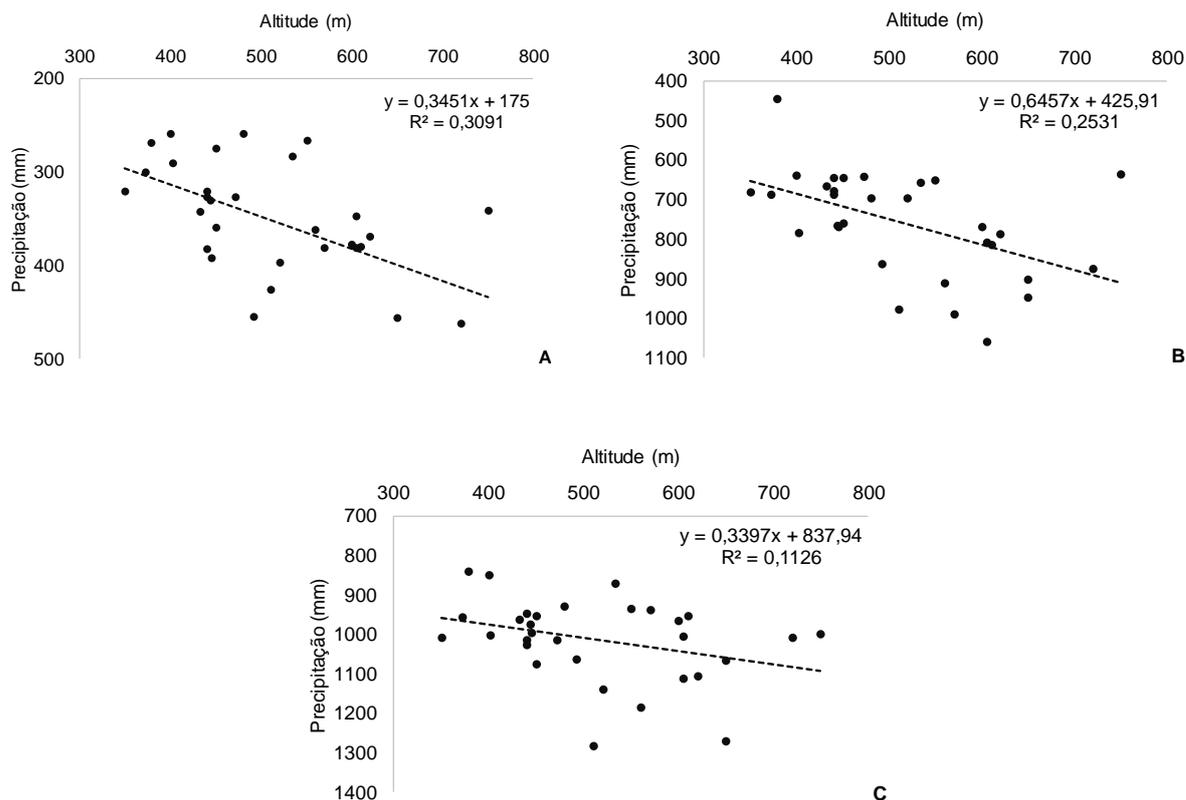
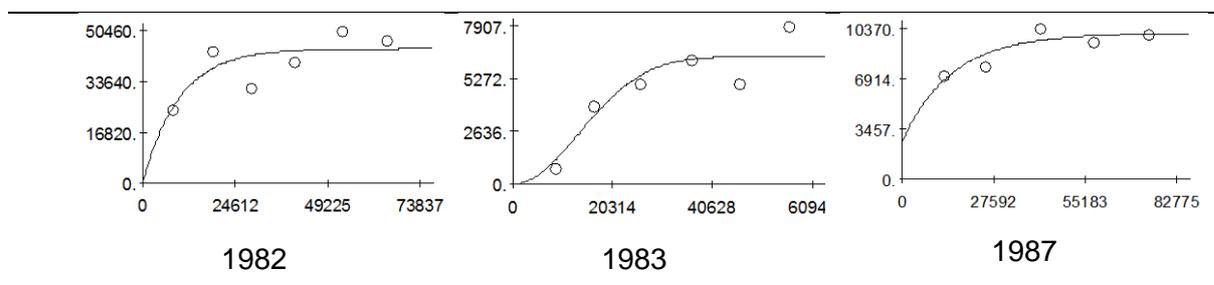


Figura 14. Correlação entre os índices pluviométricos e a altitude, para os períodos Seco (A), Normal (B) e chuvoso (C), para a BHRB

A Figura 15 apresenta as semivariâncias experimentais para cada ano, sendo possível observar o ajuste dos modelos teóricos de semivariograma aos dados experimentais.

A inspeção da Figura 15 permite concluir que as precipitações anuais apresentam dependência espacial, para a malha de estações, a qual foi dinâmica no tempo.



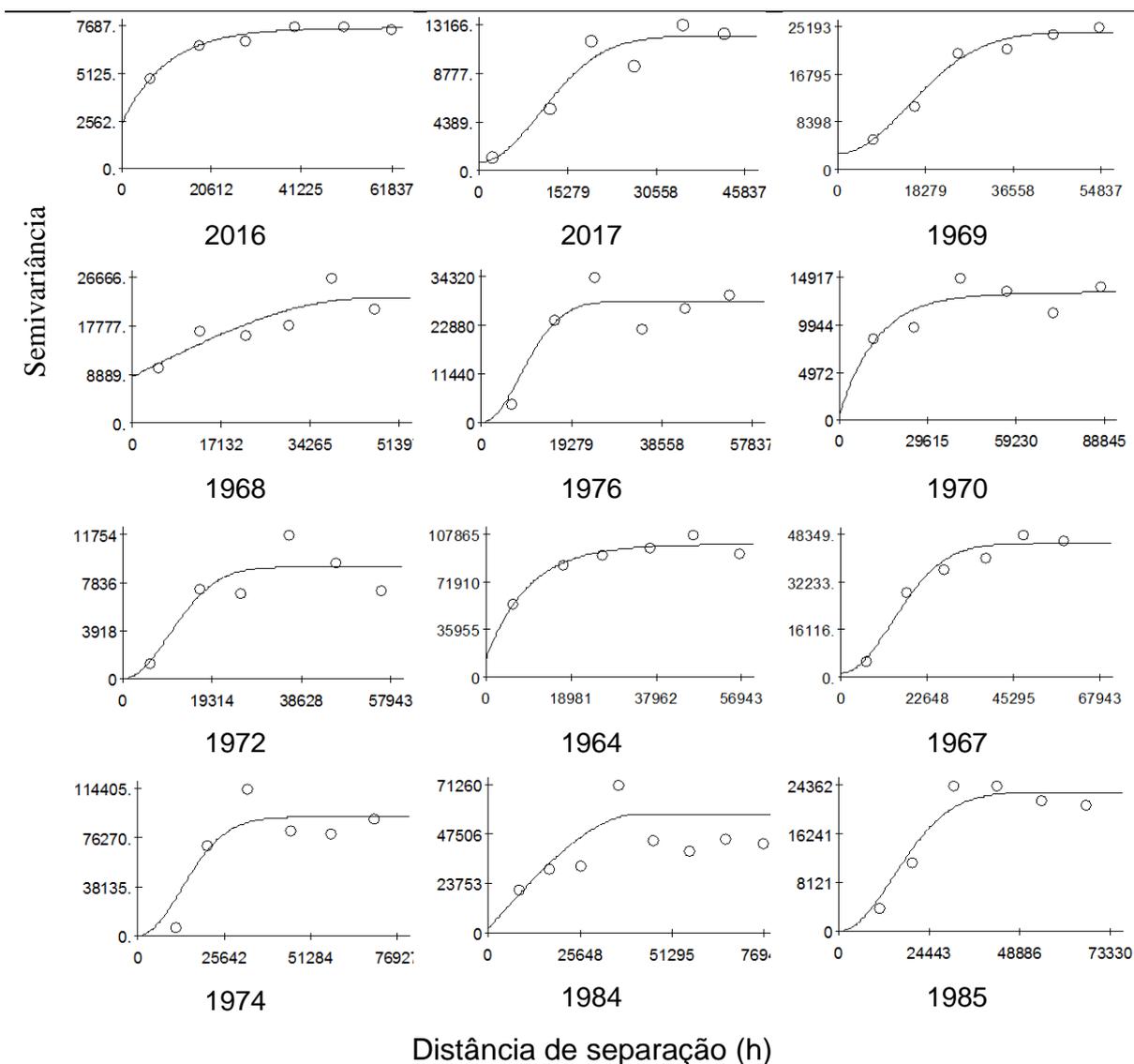


Figura 15. Modelos de semivariograma ajustados para a precipitação para os períodos seco (1982, 1987, 1983, 2016, 2017), normal (1969, 1968, 1976, 1970, 1972) e chuvoso (1964, 1967, 1974, 1984, 1985) da BHRB.

Na Tabela 6 observa-se os modelos teóricos adotados para modelar a dependência espacial, sendo o mais usado o gaussiano (oito), seguido pelo exponencial (cinco) e o esférico (dois). A precipitação na área de estudo possui grau de dependência espacial com alcances variando 20 a 45 km. Observa-se que a média dos comprimentos de correlação foi de 32,9 km para o período seco, 33 km para o período normal e 34,3 km para o período chuvoso. Exceto para o ano de 1982, constata-se que o r^2 dos ajustes dos modelos foi superior a 0,70, podendo ser considerado bom. Para aquele ano, flutuações na terceira semivariância experimental reduziram o coeficiente de determinação do ajuste, porém não interferiram na

identificação do efeito pepita puro, nem do patamar. Verifica-se que a dependência espacial foi considerada alta para os períodos em estudo, com exceção dos anos 2016, 1987 e 1968, que apresentaram médio grau de dependência.

Os modelos de semivariogramas foram validados pelo método Jack-Knifing. Foram analisados os modelos exponencial, esférico e gaussiano, mas foram validados somente os modelos que melhor se ajustaram. A Tabela 6 mostra todos os ajustes, variando o desvio padrão dos resíduos entre 0,86 e 1,19, e a média de -0,07 a 0,05. É de grande valia verificar o comportamento do alcance do semivariograma, inclusive para subsidiar o planejamento do monitoramento pluviométrico na bacia.

Tabela 6. Modelos de semivariogramas e grau de dependência espacial da precipitação da BHRB para o período seco, normal e chuvoso.

	Modelo Ajustado	C ₀	C ₀ +C ₁	A (km)	R ²	C ₀ /(C ₀ +C ₁)	GDE	Jack-Knifing	
								Média	DP
Período Seco									
1982	Exponencial	600	44620	29,4	0,57	1,340	Alta	-0,14	0,90
	Esférico	100	42680	19,0	0,45				
	Gaussiano	100	42760	14,5	0,46				
1983	Exponencial	10	8130	89,1	0,74	0,156	Alta	0,10	1,09
	Esférico	240	7231	60,0	0,70				
	Gaussiano	10	6406	32,7	0,83				
1987	Exponencial	2640	9990	45,3	0,80	26,43	Média	-0,02	1,03
	Esférico	10	9380	22,2	0,52				
	Gaussiano	10	9420	18,7	0,54				
2016	Exponencial	2430	7584	31,2	0,96	32,04	Média	-0,06	0,86
	Esférico	10	7284	13,3	0,84				
	Gaussiano	10	7282	10,5	0,85				
2017	Exponencial	10	14280	55,1	0,80	6,33	Alta	0,03	1,13
	Esférico	110	12450	34,8	0,89				
	Gaussiano	770	12160	25,9	0,91				
Período Normal									
1968	Exponencial	7310	25720	72,9	0,63	37,2	Média	-0,01	1,02
	Esférico	8500	22830	45,3	0,74				
	Gaussiano	20	19870	10,4	0,51				
1969	Exponencial	10	29840	82,5	0,85	11,0	Alta	0,02	1,18
	Esférico	10	24330	44,3	0,86				
	Gaussiano	2680	24280	36,0	0,97				
1970	Exponencial	580	13350	38,4	0,72	4,34	Alta	0,10	0,91
	Esférico	10	12710	22,7	0,43				
	Gaussiano	500	12780	19,0	0,45				
1972	Exponencial	10	9690	44,4	0,66	0,11	Alta	0,01	1,19
	Esférico	10	9390	36,5	0,70				
	Gaussiano	10	9120	24,5	0,77				
1976	Exponencial	10	29970	37,8	0,71	0,03	Alta	-0,07	1,18
	Esférico	10	28310	25,9	0,73				
	Gaussiano	10	28540	20,6	0,84				

	MODELO AJUSTADO	C ₀	C ₀ +C ₁	A (KM)	r ²	C ₀ / (C ₀ +C ₁)	GDE	JACK-KNIFING	
								Média	DP
Período Chuvoso									
1964	Exponencial	1320	100200	28,2	0,93	13,1	Alta	0,05	0,89
	Esférico	0	95400	14,4	0,80				
	Gaussiano	100	95400	10,9	0,82				
1967	Exponencial	100	51300	69,0	0,82				
	Esférico	100	46690	46,8	0,81				
	Gaussiano	1200	45190	32,7	0,97	2,65	Alta	-0,01	1,11
1974	Exponencial	100	98200	60,6	0,63				
	Esférico	100	90100	38,0	0,81				
	Gaussiano	100	9200	31,7	0,83	1,08	Alta	-0,07	0,97
1984	Exponencial	100	47700	40,2	0,43				
	Esférico	1900	57030	42,5	0,78	3,33	Alta	-0,02	1,16
	Gaussiano	1310	47480	33,3	0,48				
1985	Exponencial	0	25910	75,6	0,78				
	Esférico	10	22830	45,1	0,80				
	Gaussiano	10	23220	36,4	0,93	0,04	Alta	-0,01	1,09

Após os ajustes dos modelos foram confeccionados os mapas de isolinhas da precipitação (Figura 16 a 18) por meio das técnicas da krigagem ordinária, uma vez que não havia tendência nos dados. Constatou-se que as regiões de maior variabilidade espacial estão situadas na Chapada do Araripe. Este comportamento está relacionado ao efeito da conservação do bioma original. Segundo Petrone (2017), a Chapada do Araripe é uma área muito bem caracterizada, bastante diferenciada em relação às zonas interioranas do Nordeste, sendo um exemplo de “oásis” que, em regiões semiáridas.

Observa-se nos períodos que os regimes de precipitação são diferenciados, sendo que esses não apresentam um padrão em sua distribuição espacial, ou seja, existem áreas com maior ou menor precipitação anual. Observa-se na Figura 16 que, para o período seco (com exceção de 2016), as precipitações mais elevadas ocorreram ao norte da bacia, enquanto que os menores valores foram distribuídos na região sul e centro da bacia hidrográfica. Entretanto, verifica-se que tal constatação ocorre em escala local, para alguns postos, e não regionalmente, em maiores escalas, resultado este consistente com a ausência de tendência entre precipitação e altitude já comentada.

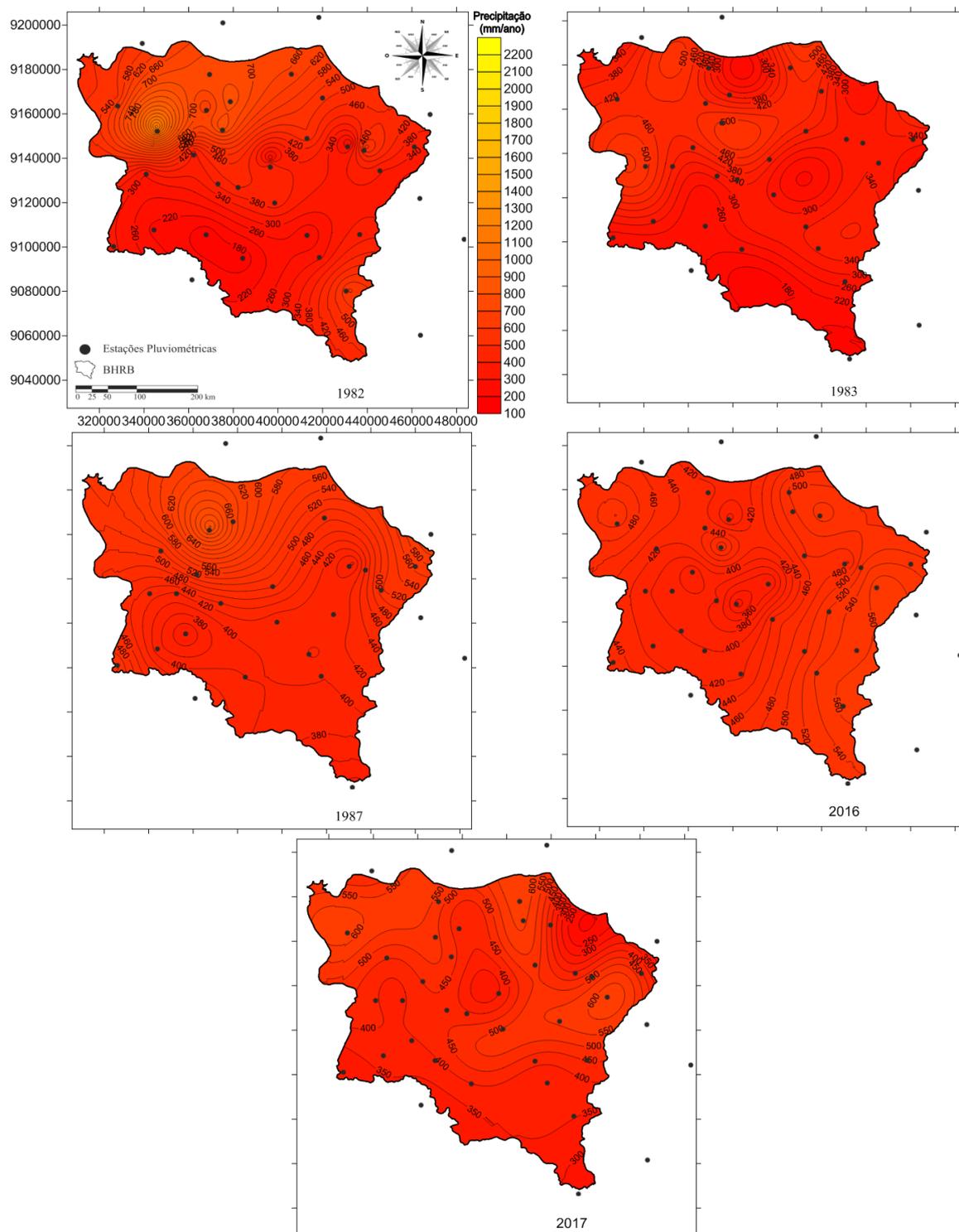


Figura 16. Mapa de precipitação anual para o período seco (1982, 1983, 1987, 2016, 2017) da BHRB.

Na Figura 17, para o período normal, observa-se que a precipitação anual ocorreu com maiores magnitudes na parte leste e norte da bacia próximos as estações de Serra das Tabocas, Viração, Serrolândia, Sítio dos Moreiras, Ipueiras.

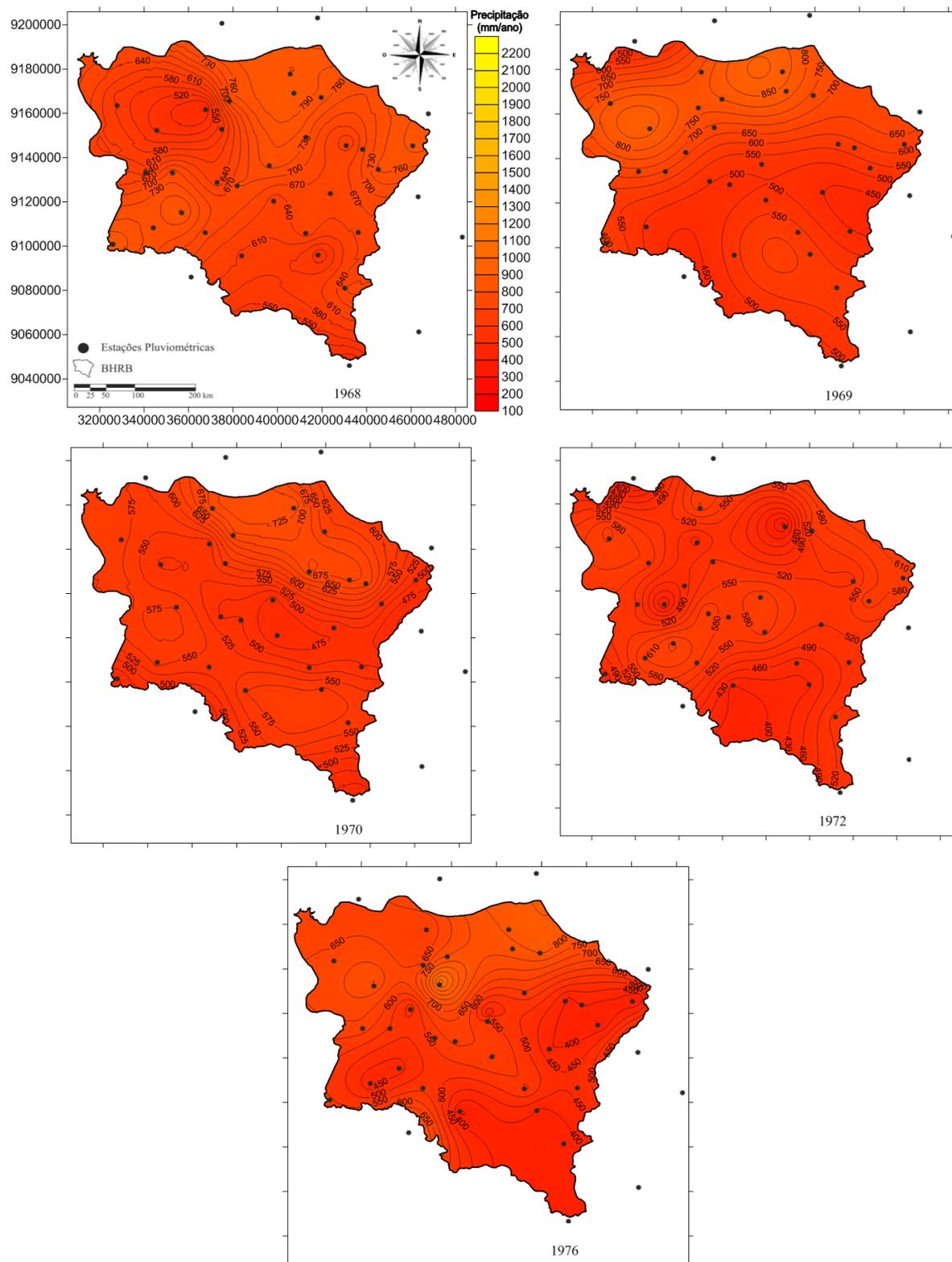


Figura 17. Mapa de precipitação anual para o período normal (1968, 1969, 1970, 1972, 1976) da BHRB.

Já no período chuvoso, com as precipitações mapeadas na Figura 18, as maiores lâminas se concentraram na parte oeste, centro e norte da bacia nas proximidades das estações Trindade, Araripina, Viração, Serrolândia, Serra das Tabocas, Exú, Cedro, e Sítio Estaca.

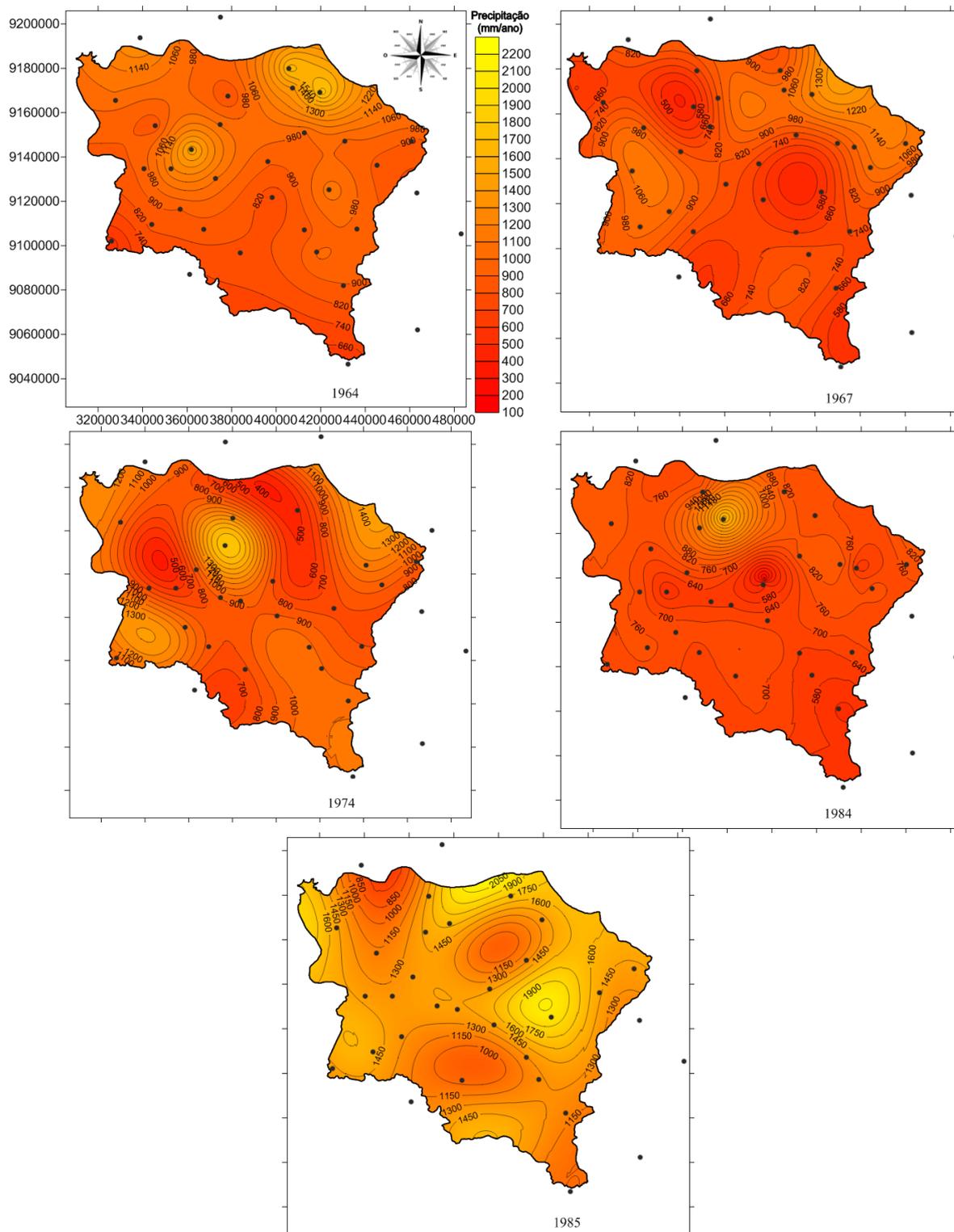


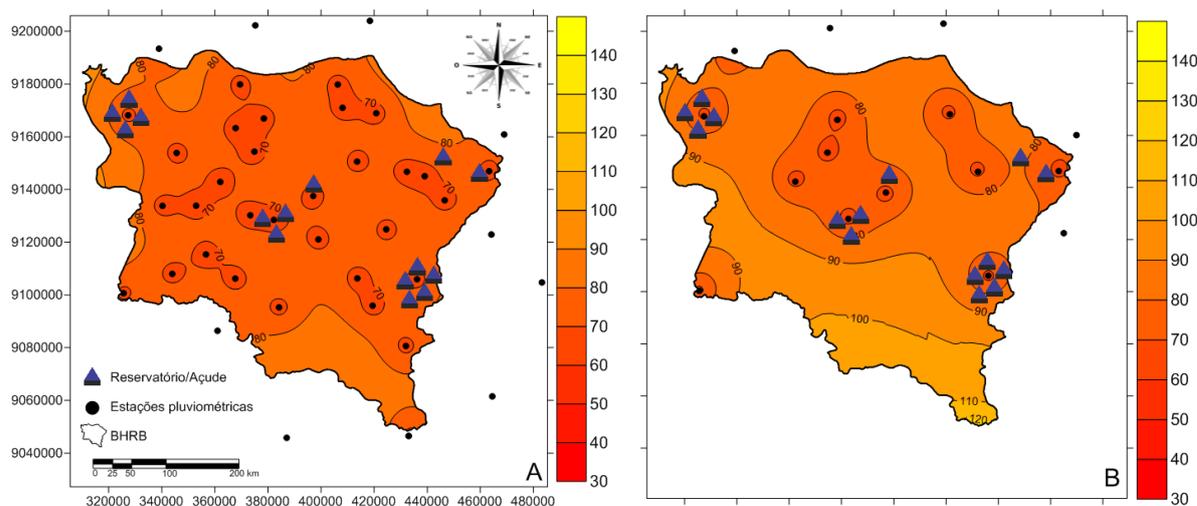
Figura 18. Mapa de precipitação anual para o período chuvoso (1964, 1967, 1974, 1984, 1985) da BHRB.

Comparando-se as incertezas nas estimativas espaciais da precipitação anual na bacia, sem a inclusão dos valores do TRMM e com a inclusão, verificaram-se que os desvios padrão da krigagem, para o período com os dados do TRMM, variaram de 60 a 94 para o ano de 2016, e de 30 a 105 para o ano de 2017. Quando se avaliou estes erros com os dados originais sem o TRMM, verificou-se que os erros variaram de 62 a 122 e 35 a 145, para 2016 e 2017, respectivamente. Montebeller et al. (2007), em estudo sobre a variabilidade espacial da erosividade no Estado do Rio de Janeiro, observaram que as áreas com maiores erros predominaram nas regiões Litorâneas e Norte, em consequência dessas regiões apresentarem as menores densidades de dados de pluviográficos e pluviométricos.

Araújo et al. (2018), em estudo da variabilidade espacial de atributos do solo, em uma bacia experimental na região semiárida de Pernambuco, também adotaram os desvios padrão da krigagem como critério para avaliar as incertezas associadas com o mapeamento.

Pode-se verificar que a inclusão das informações do TRMM foi decisiva para redução das incertezas no mapeamento, principalmente ao sul da bacia.

Os açudes existentes na BHRB também estão representados na Figura 19, podendo-se constatar que a rede pluviométrica existente permite estimativa da precipitação, na região em torno dos açudes, com média incerteza, mesmo sem incluir os dados de TRMM.



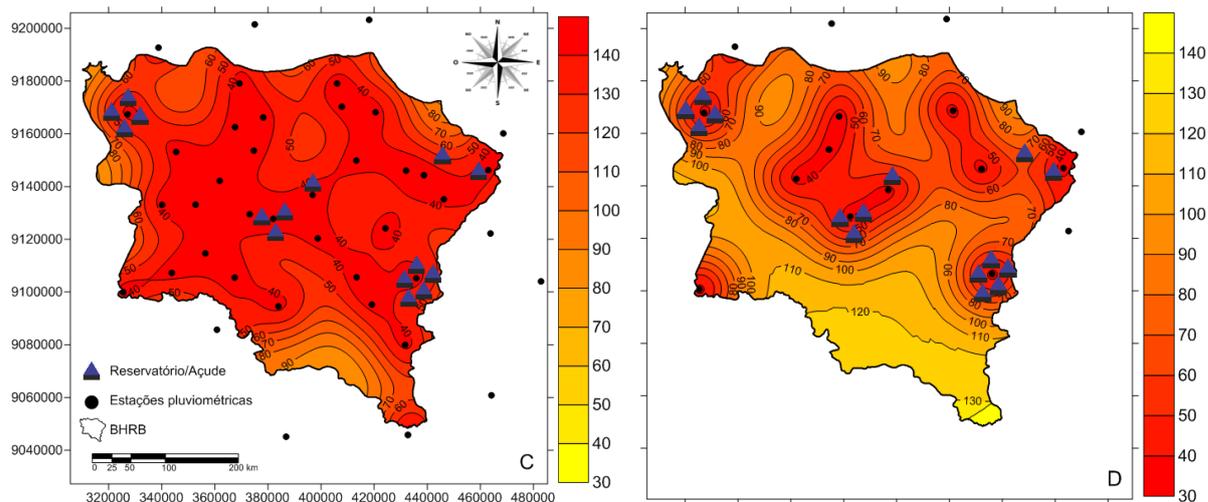


Figura 19. Mapa dos desvios padrão da krigagem, com a malha da rede pluviométrica considerando o preenchimento com o TRMM (A e C), e rede pluviométrica com dados originais disponíveis (B e D) para a BHRB. Estão representados os açudes existentes na bacia.

7.0 CONCLUSÕES

A espacialização das estações pluviométricas na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida permitiu adequada caracterização da variabilidade espacial da precipitação. Em média, para os anos estudados, o número de estações foi de 36, com um mínimo de 29 estações no ano de 1987. Com base na análise dos semivariogramas, verificou-se que os comprimentos de correlação foram em média de 36,4 km, e de no mínimo 20,6 km, para o ano de 1976, e que os graus de dependência espacial foram de médio a alto. Adicionalmente, os coeficientes de determinação dos ajustes dos semivariogramas teóricos foram em geral elevados, variando de 0,57 a 0,97. Destaque-se ainda que a média dos valores absolutos do erro normalizado das estimativas (Jack-Knifing) foi de 0,048, indicando não havendo tendências não capturadas nos mapeamentos.

Uma série temporal de 55 anos foi adotada para a precipitação média anual na BHRB, e adotada metodologia dos Quantis para caracterizar os períodos seco, normal e chuvoso, com limites de intervalo de 485,4 mm e 728,8 mm. Para cada período, foram analisados 5 anos com base nas estações com registros pluviométricos, os quais apresentaram malha espacial dinâmica no tempo. A

precipitação anual média nos períodos seco, normal e chuvoso foi de 431,6, 590,2 e 1005,1 mm, respectivamente.

Para os anos mais recentes (2016 e 2017) as medições pluviométricas foram oriundas de estações manuais e automáticas. Em virtude das falhas detectadas nas estações manuais (várias delas sem registro), verificou-se que o número total de estações era insuficiente para a aplicação de uma metodologia geoestatística (16 estações em ambos anos). De modo a utilizar a geoestatística em tais anos, analisou-se o potencial de informações indiretas de precipitação oriundas de satélite (TRMM) para complementação da série. Uma vez que o TRMM apresentou adequadas relações lineares com a precipitação medida na bacia, com o coeficiente de determinação de 0,70 para os anos de 2016 e 2017, então se adotou estimativas de precipitação pelo TRMM nas locações correspondentes às estações com falhas, para que as análises geoestatística fossem realizadas. Os mapeamentos foram consistentes, verificando-se alcances e patamares dos semivariogramas similares aos demais anos. Adicionalmente obteve-se adequada validação cruzada dos semivariogramas, com médias próximas a zero e desvios padrão próximos a um.

Constatou-se que a rede de estações pluviométricas disponível para os anos de 2016 e 2017 na BHRB é insuficiente para possibilitar adequadas estimativas de precipitação em locais não contemplados com estações, principalmente ao sul da bacia.

Nas regiões no entorno dos açudes existentes na BHRB, verifica-se que a rede pluviométrica atual (nos anos de 2016 e 2017) possibilitou aceitável estimativa da precipitação anual, com média incerteza.

8.0 TRABALHOS FUTUROS

Os mapeamentos aqui apresentados serão utilizados como suporte para a modelagem hidrológica, no âmbito do projeto SUPer.

Deste modo, a elaboração deste estudo, acerca da variabilidade espacial, fornece informações sobre os padrões de dependência, assim como sobre as incertezas associadas ao mapeamento, as quais estão intrinsecamente relacionadas com a disposição das estações da rede de monitoramento pluviométrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S.; XUAN, Y. Quantile Regression Technique to Investigate the Rainfall Trend for Flooding and Drought Conditions. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. Vol.19, p.7157, 2017.

ACCIOLY, L. D. O.; CAVALCANTI JUNIOR, E. D. A., DA SILVA, A. B. & SOARES, J. D. Mudanças no uso e cobertura das terras da bacia do rio Brígida, em Pernambuco, e suas implicações no processo de desertificação. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35., 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUA E CLIMA (APAC). Recife: (2019). Disponível em <<http://www.apac.pe.gov.br>> Acesso em 01/01/2019.

AIRES, U. R. V.; NETO, J. O. M.; DE MELLO, C. R. Estimativas de precipitação pluvial derivadas do sensor TRMM para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. **Scientia agraria**, v.17, n.2, p.57-66, 2017.

ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística para Determinação e Modelagem da Variabilidade Espacial de Micronutrientes no Solo Cultivado com Cafeeiro no Município de Araguari-MG. **Cultura Agronômica: Revista de Ciências Agronômicas**, v.26, n.2, p.158-173, 2017.

AMARAL, C. L. C.; DA SILVA, I.; VASCONCELOS, T. N. H. Aplicação de uma atividade experimental investigativa para o ensino de tratamento de água. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v.9, n.1, p.50-59, 2018.

ANDRADE, A. R. S., NETO, A. H. G., SILVA CRUZ, A. F., ANDRADE, E. K. P., SANTOS, V. F., & SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.3, n.1, p.126-145, 2018.

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DE SOUSA LIMA, J. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.3, p.227-238, 2017.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço UFVJM**, p.28-39, 2017.

ANDRADE, M. A.; DE MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v.17, n.1, 2013.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na

região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v.16, n.5, 2012.

ARAÚJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P. E.; SANTOS, S. M. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – Agriambi (IMPRESSO)**, v.22, p.38-44, 2018.

ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J.R., HANEY, E.B., NEITSCH, S.L. Input/Output Documentation version 2012. **Texas Water Resources Institute – TR-439**. 650p. 2012.

AVRAM, M.; LUCA, M. Analysis of Phenomenels with Hydrologic Large Risk in the Hydrographic Basin of the Trotsuș River. **Present Environment and Sustainable Development**, v.11, n.2, p.77-87, 2017.

BARRELLA, W.; PETRERE JR, M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. D. A. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: **Editora da Universidade de São Paulo**, 2001.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. **Hidrologia: ciência e aplicação**, v.2, p.177-242, 1993.

BRITO, J. I. B.; DA SILVA, M. C. L.; COSTA, A. M. N.; BRAGA, C. C. **Análise da Precipitação do Estado da Paraíba no Período de 1962-2001**. 2004.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal, Madison**, v.58, n.5, p.1240-1248, 1994.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. **IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas. ABRH, Foz do Iguaçu**, 2001.

CARDOSO, Y. S.; LOPES, M. R.; DE ASSIS SILVA, S.; ALVES, D. I.; SOUZA LIMA, J. S. Distribuição e incerteza da precipitação pluviométrica e do potencial erosivo das chuvas para o estado da Bahia, brasil. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.26, n.2, p.149-159, 2018.

CARMO, L. V.; ARAÚJO, L. E.; ALVES, A. S. Variabilidade climática espaço-temporal da bacia hidrográfica do rio Abiaí–PB. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v.12, n.2 p.074 -092, 2015.

COHEN LIECHTI, T.; MATOS, G. D. S. C.; PEDRO, J.; BOILLAT, J. L.; SCHLEISS, A. Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.16, n. EPFL-ARTICLE-175211, p.489-500, 2012.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. 2008.

CORREA, M. G. G.; GALVANI, E. Análise estatística da variabilidade da precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Piquiri-PR. **Boletim Paulista de Geografia**, n.96, p.1-10, 2017.

COSTA, F. R. DE; SOUZA, R. F.; SILVA, S. M. P. Análise comparativa de metodologias aplicadas à delimitação da bacia hidrográfica do Rio Doce-RN. **Sociedade & Natureza**, v.28, n.3, 2016.

DA SILVA-FUZZO, D. F.; ROCHA, J. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo TRMM, para o estado do paraná, e sua contribui o ao monitoramento agrometeorológico. **Forma o (Online)**, v.3, n.23, 2016.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. **Artmed**, Porto Alegre. 2006.

DE MARCO, K.; DIAS, V. R. M.; DALLACORT, R.; ALVES, E. D. L.; TIEPPO, R. C.; DE ARAÚJO, D. V.; BARBIERI, J. D. Spatial variability of the ten-day rainfall in the months in which the sowing of soybean and winter corn begins in the state of Mato Grosso. **Científica**, v. 44, n. 4, p. 477-484, 2016.

DELFINER, P.; DELHOMME, J. P. Optimum Interpolation by Kriging. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. **Display and Analysis of Spatial Data**. New York: John Wiley, 1975.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide**. Second ed., **Oxford University Press**, New York, p.369, 1998.

FERREIRA FILHO, W. M.; NOGUEIRA, L. A. A.; BEMFEITO, C. J. S. (2000). **Aplica o da metodologia Kriging   pluviometria do Estado do Ceará**. CD-ROM do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Natal – RN.

FERREIRA, P. S. **Modelagem hidrológica para estimativa da vazão na bacia hidrográfica do Rio Brígida e a disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas**. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26800>> Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

FREITAS, M. A. S.; BILLIB, M. H. A. Drought prediction and characteristic analysis in semiarid Ceará, northeast Brazil. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences**, v.240, p.105-112, 1997.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.31, n.3, p.435-443, 2007.

GOUVEA, R. L.; CAMPOS, C. C.; MENEZES, J. T.; MOREIRA, G. F. Análise de frequência de precipita o e caracteriza o de anos secos e chuvosos para a bacia do rio Itajaí. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.22, 2018.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p. 169-177, 2005.

GUIDOLINI, J. F.; MACHADO, M. F.; ARAÚJO, M.; SIQUEIRA, H.; ABDALA, V. L.; SCHULER, A. E. Balanço hidrológico da microbacia do córrego lageado, Município de Uberaba-MG, para o ano de 2012. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: Congresso Brasileiro De Ciências do Solo, 34., 2013. Florianópolis. Anais... Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

HASAN, M. M.; CROKE, B. Filling gaps in daily rainfall data: a statistical approach. **20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013**. Disponível em <www.mssanz.org.au/modsim2013> Acesso em 10 de fevereiro de 2019.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TYKEY, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas, um guia. Lisboa: **Salamandra**, 446p. 1983.

JORDAN, T. E.; WELLER, D. E.; PELC, C. E. Effects of local watershed land use on water quality in mid-Atlantic coastal bays and sub estuaries of the Chesapeake Bay. **Estuaries and Coasts**, v.41, n.1, p.38-53, 2018.

JOURNEL, ANDRE G.; HUIJBREGTS, CHARLES J. Mining geostatistics. London: **Academic press**, 1978.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; KRISHNAMURTI, T.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; NAKAMURA, K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit, **Journal of Applied Meteorology**, v.39, p.1965-1982, 2000.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2. Ed. rev. e ampl. – São Paulo: **Editora UNESP**, 2003.

LI, X.; SHAO, M. A.; ZHAO, C.; JIA, X. Spatial variability of soil water content and related factors across the Hexi Corridor of China. **Journal of Arid Land**, p.1-12, 2019.

LI, X.; ZHANG, Q.; XU, C. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin. **Journal of Hydrology**, v.426, p.28-38, 2012.

LOPES, G. R. **Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do capão comprido, DF**. 2011.

LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MELO, J. M. M. Análise da precipitação da estação da EMBRAPA semiárido, projeto bebedouro Pretolina/PE, através da técnica de Quantis. In: **Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro. Campina Grande**. 2015.

LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in an alluvial valley. **Revista Caatinga**, v.32, n.1, p.222-233, 2019.

MEDHIOUB, E.; BOUAZIZ, M.; ACHOUR, H.; BOUAZIZ, S. Monthly assessment of TRMM 3B43 rainfall data with high-density gauge stations over Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, v.12, n.2, p.15, 2019.

MONTEBELLER, C. A.; CEDDIA, M. B.; CARVALHO, D. F.; VIEIRA, S. R.; FRANCO, E. M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Rio de Janeiro, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.426-435, 2007.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.30-37, 2006.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R. Caracterização da variabilidade espacial de parâmetros hidráulicos em solos aluviais no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.4, n.2, p.5-7, 1999.

MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi-arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v.434, p.55-68, 2012.

MORAL, F. J.; REBOLLO, F. J.; SERRANO, J. M. Estimating and mapping pasture soil fertility in a portuguese montado based on an objective model and geostatistical techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.157, p.500-508, 2019.

NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. L.; SANTOS, C. A. C. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, p.171-180, 2015.

NUR, M.; LESTARI, D. O.; MARDIANSYAH, W.; NURKHAKIM, M. Y.; SETIABUDIDAYA, D.; ISKANDAR, I. Evaluation and comparison of hourly and daily Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation products with the rain gauge data in the Sungai Baung district, South Sumatera. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2018.

PARRY, M.; PARRY, M. L.; CANZIANI, O.; PALUTIKOF, J.; VAN DER LINDEN, P.; HANSON, C. Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC. **Cambridge University Press**, 2007.

PETRONE, P. Contribuição ao estudo da região do Cariri, no Ceará. **Boletim Paulista de Geografia**, n.19, p.3-29, 2017.

PINKAYAN, S. Conditional probabilities of occurrence of wet and dry years over a large continental area. **Hydrology papers (Colorado State University)**; n.12, 1966.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. Hidrologia básica. In: **Hidrologia básica**. Edgard Blucher, 1976.

PMM. **Precipitation Measurement Missions**. Disponível em: <<http://pmm.nasa.gov/>>. Acesso em: 25 janeiro de 2019.

ROLDÃO, A. F.; SANTOS, J. G.; OLIVEIRA, L. A. Correlação entre as variáveis climáticas (altitude, temperatura e precipitação) na mesorregião sul e sudoeste de Minas Gerais-MG. **Revista Geonorte**, v.1, n.5, p.515-525, 2012.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico. **Revista Tecnologia**, v.29, n.2, 2008.

SANAGIOTTO, D. G. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V: 0,75H**. 2003.

SANTOS, A. D.; ARAGÃO, M. D. S.; CORREIA, M. D. F.; SANTOS, S. D.; SILVA, F. D.; ARAÚJO, H. D. Precipitação na cidade de Salvador: variabilidade temporal e classificação em quantis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.31, n.4, 2016.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; DE ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. D. S.; FONTES JR, R. V. D. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.828-836, 2012.

SILVA JÚNIOR, O. B.; TUCCI, C. E. M. **Estimativa de indicadores hidrológicos para as sub-bacias do Rio São Francisco**. 2017. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/indicadoresSF.pdf>> Acesso em 10 de novembro de 2018.

SILVA JÚNIOR, M. C. Mapeamento da cobertura de plantas daninhas utilizando imagens digitais e geoestatística. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa**. 2010.

SILVA, R. M.; PEREIRA E SILVA, L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v.22, n.2, 2010.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B.; XAVIER, A.C. Lógica fuzzy na avaliação da fertilidade do solo e produtividade do café conilon. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.1, p.9-17, 2010.

SIQUEIRA, D. S. **Grupo de Pesquisa CSME**. 2019. Disponível em <<http://lamma.com.br/private/docs/046f640680129a2eaf3b54653ba155fe.pdf>> Acesso em 20 de janeiro de 2019.

SOBRAL, B. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; GOIS, G., DE BODAS TERASSI; P. M.; MUNIZ-JÚNIOR, J. G. R. Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.22, 2018.

SONG, Y. Q.; ZHU, A. X.; CUI, X. S.; LIU, Y. L.; HU, Y. M.; LI, B. Spatial variability of selected metals using auxiliary variables in agricultural soils. **Catena**, v.174, p.499-513, 2019.

Stefanidis, S.; Stathis, D. Spatial and temporal rainfall variability over the Mountainous Central Pindus (Greece). **Climate**, v.6, n.3, p.75, 2018.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. reimpressão. **Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH**, 2001.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L.; BENETTI.; LANNA, A. E. L.; BIDONE, F.; SEMMELMAN, F.; LOUZADA, J. A.; BERTONI, J. C.; ZAHED FILHO, K.; BELTRAME, L. F. S.; BORDAS, M. P.; PESSOA, M. L.; CAICEDO, N. L.; CHEVALLIER, P.; PORTO, R. L.; CLARKE, R. T. Hidrologia: ciência e aplicação. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: **Editora da UFRGS/ABRH**. v.4, 2013.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations 1. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, n.2, p.175-184, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.1-54. v.1. 2000.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. **Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2008.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. p.319-344, 1980.

WMO - World Meteorological Organization – **International Meteorological Vocabulary** – nº182, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 1992.

XAVIER, T. M. B. S. Tempo de chuva: estudos climáticos e de previsão para o Ceará e Nordeste setentrional. Fortaleza: **ABC Editora**. 478p. 2001.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Classificação e Monitoração de Períodos Secos ou Chuvosos e Cálculo de Índices Pluviométricos para a Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos**, Blumenau, v.5, n.2, p.7-31, 1987.

XUE, X.; HONG, Y.; LIMAYE, A. S.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; KHAN, S. I.; CHEN, S. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v.499, p.91-99, 2013.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística. **Conceitos e Aplicações: Editora Oficina de Textos, 215 pp, 2013.**

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. D. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v.18, n.6, 2014.

