

Gabriela Isabel Limoeiro Alves Nascimento

Abordagem estatística e geoestatística da precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil

Recife

8 de dezembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

**Abordagem estatística e geoestatística da precipitação pluviométrica do Sertão do
Pajeú, Pernambuco - Brasil**

Tese julgada adequada para obtenção
do título de Doutor em Biometria e
Estatística Aplicada, defendida e apro-
vada por unanimidade em 20/12/2023
pela comissão examinadora

**Área de concentração: Biometria e Esta-
tística Aplicada**

Orientador: Dr. Moacyr Cunha Filho

Recife

8 de dezembro de 2023

Gabriela Isabel Limoeiro Alves Nascimento

Abordagem estatística e geoestatística da precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil/ Gabriela Isabel Limoeiro Alves Nascimento. – Recife, 8 de dezembro de 2023-

77 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Moacyr Cunha Filho

– UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA, 8 de dezembro de 2023.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Orientador. II. Universidade Federal Rural de Pernambuco. III. Faculdade de xxx. IV. Título

CDU 02:141:005.7

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Abordagem estatística e geoestatística da precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil

Gabriela Isabel Limoeiro Alves Nascimento

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 20/12/2023 pela comissão examinadora

Orientador:

Dr. Moacyr Cunha Filho
Orientador

Banca examinadora:

Dra. Rosângela Estevão Alves Falcão
Universidade de Pernambuco

Dr. Maurício Costa Goldfarb
Universidade de Pernambuco

Dr. Manoel Rivelino Gomes de Oliveira
Universidade Federal da Bahia

Dr. Lucian Bogdan Bejan
Universidade Federal Rural de Pernambuco

*Este trabalho é dedicado
a minha filha Geovanna.*

Agradecimentos

Inicio os agradecimentos refletindo sobre a vida, com poema de autoria do Bráulio Bessa. Pois, minha trajetória nesse doutorado foi exatamente isso, refletir, persistir, resistir e não desistir.

A corrida da vida

Na corrida dessa vida
é preciso entender
que você vai rastejar,
que vai cair, vai sofrer
e a vida vai lhe ensinar
que se aprende a caminhar
e só depois a correr.

A vida é uma corrida
que não se corre sozinho.
E vencer não é chegar,
é aproveitar o caminho
sentindo o cheiro das flores
e aprendendo com as dores
causadas por cada espinho.

Aprenda com cada dor,
com cada decepção,
com cada vez que alguém
lhe partir o coração.

O futuro é obscuro
e às vezes é no escuro
que se enxerga a direção. {...}

Viver esse processo não foi fácil, mas tenho muito a agradecer por todas as etapas percorridas e aprendizados conquistados com o doutorado. Aprendizados estes que foram muito além da questão acadêmica, foi uma luta árdua e de autoconhecimento, onde a perseverança e o apoio emocional foram essenciais para esta conquista.

Agradeço inicialmente, à Deus, por me guiar e colocar pessoas sábias ao meu lado quando mais precisei.

Aos meus pais, Maristela e Moisés, pela educação que sempre me foi oferecida, meu infinito agradecimento.

Ao meu irmão Gérson, que me inspira e orgulha, mesmo não sabendo. A minha irmã Vanessa, por torcer incondicionalmente por mim.

Agradeço ao meu amado esposo, Dâmocles, por todo o apoio e me incentivar nos momentos mais difíceis.

A minha filha, por sempre me perguntar: "Mamãe terminou sua pesquisa da chuva?". A cada momento que ouvi essa pergunta, lembrava que essa conquista não é só minha e que educação se promove com o exemplo. A Louise, compartilho carinhosamente essa conquista.

Aos geógrafos, Ludmilla, Emile Maely e Douglas, por todo o apoio e consultoria incansável.

Aos meus queridos amigos Carol, Miguel, Tássia, Marina, Andrea, Shirley, Teresa, Paulinha, Gabi Lins, Joyce, Ísis e Ademir, sei o quanto vocês torceram por mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho, pelos seus ensinamentos passados de forma muito generosa. A paciência e disponibilidade durante o desenvolvimento da pesquisa, o meu muito obrigada!!

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada por todo o apoio nesta jornada. Um agradecimento especial à Henrique, que foi um anjo ainda na fase da seleção, jamais esquecerei da sua ajuda.

À toda rede de apoio do Núcleo Apoio Psicossocial de PE, que foi fundamental na reta final para realização deste sonho.

À todos que também contribuíram indiretamente na concepção deste estudo e na minha formação.

Gratidão!

*“A persistência é o caminho do êxito.”
(Charles Chaplin)*

Resumo

Mudanças no comportamento da precipitação pluviométrica afetam o ciclo hidrológico e conseqüentemente os recursos hídricos. Em casos de mudanças climáticas extremas, o impacto está relacionado às alterações nos recursos hídricos, a ocorrência de inundações e secas mais severas e frequentes. Nesse sentido, estudar os impactos das modificações climáticas sobre os recursos hídricos, é estratégico para a elaboração, implementação e fortalecimento de políticas públicas associadas ao gerenciamento dos recursos hídricos. A presente pesquisa teve como objetivo caracterizar a precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú - PE, bem como fornecer subsídios para as políticas públicas voltadas a escassez hídrica através do estudo e análise do espaço/tempo. Para tal, foram coletadas informações dos postos pluviométricos da região e entorno, correspondente ao período de 1993 e 2022, e, utilizou-se de metodologias estatísticas e geoestatísticas. Inicialmente foram realizados os tratamentos dos dados com o método de regressão para complementar os dados faltantes. Em seguida, a série foi verificada quanto à tendência, consistência e ruptura das informações. Em todos casos, o resultado do testes mostraram que apontara que não houve tendência estatisticamente significativa, a consistência dos dados foi validada e as rupturas identificadas não foram significantes ao nível de 5%. Por conseguinte, acerca da caracterização estatística da precipitação do Pajeú identificou que a normal climatológica foi de 80,62mm. Ademais, a classificação dos anos foi realizada pela técnica dos quantis. Os resultados foram satisfatório, mostrando que alguns anos classificados como Muito Seco ou Seco (1993, 1998, 2015 e 2016) coincidiram com a ocorrência dos eventos ENOS. Em relação à análise geoestatística, foram realizada ajuste dos modelos esférico, exponencial e gaussiano. Os modelos foram verificados pelo método de validação cruzada. Todos os modelos foram bem ajustado, no entanto o modelo gaussiano apresentou maior bondade do ajuste $R^2 = 90,5\%$. Desse modo, o modelo gaussiano, mostrou-se mais adequado para ajustar a precipitação do Sertão do Pajeú. Por último, técnicas de interpolação espacial simples (*Thiessen*, *Spline* e *IDW*), o método de *Spline*, apresentou melhor ajuste e acurácia na interpolação. Com relação às demais técnicas, a krigagem considerando os parâmetros do modelo gaussiano apresentou melhores resultados tanto de ajuste ($R^2 = 95,1\%$) quanto de acurácia (menores medidas de erro). Dessa forma, é possível concluir que a metodologia utilizada para o estudo da precipitação pluvial média anual na microrregião do Pajeú permitiu a obtenção de resultados satisfatórios na avaliação da sua variabilidade espacial, sendo capaz de determinar e expressar a continuidade espacial das chuvas e subsidiar as políticas públicas relacionadas às questões hídricas da região.

Palavras-chaves: Precipitação pluviométrica; Interpolação; Geoestatística; Validação cruzada; Pajeú.

Abstract

Changes in the behavior of rainfall evolution affected the hydrological cycle and consequently water resources. In cases of extreme climate change, the impact is related to changes in water resources, the occurrence of more severe and frequent floods and droughts. In this sense, studying the impacts of climate change on water resources is strategic for the elaboration, implementation and strengthening of public policies involved in the management of water resources. The present research aimed to characterize the rainfall economy in Sertão do Pajeú - PE, as well as provide subsidies for public policies aimed at water scarcity through the study and analysis of space/time. To this end, information was collected from rainfall levels in the region and surrounding areas, corresponding to the period 1993 and 2022, and statistical and geostatistical methodologies were used. data were initially processed using the regression method to complement missing data. Then, a series was checked for trend, consistency and disruption of information. In all cases, the results of the tests showed that there was no statistically significant trend, the consistency of the data was validated and the ruptures identified were not significant at the 5% level. Therefore, we approached the statistical characterization of the Pajeú variation where the climatological normal was $80.62mm$. Furthermore, the classification of years was carried out using the quantile technique. The results were overwhelming, showing that some years classified as Very Dry or Dry (1993, 1998, 2015 and 2016) coincided with the occurrence of ENSO events. In relation to the geostatistical analysis, adjustments were made to the spherical, exponential and gaussian models. The models were selected using the cross-validation method. All models were well adjusted, however the gaussian model showed greater goodness of fit $R^2 = 90.5\%$. Therefore, the gaussian model proved to be more suitable for adjusting the precipitation in Sertão do Pajeú. Finally, simple spatial interpolation techniques (*Thiessen*, *Spline* and IDW), the *Spline* method, showed better fit and accuracy in interpolation. In relation to the other techniques, kriging considering the parameters of the gaussian model presented better results in terms of both adjustment ($R^2 = 95.1\%$) and accuracy (lower error measurements). Thus, it is possible to conclude that the methodology used to study the average annual rainfall in the Pajeú microregion allowed satisfactory results to be obtained in the assessment of its spatial variability, being able to determine and express the spatial continuity of rainfall and support policies public issues related to water issues in the region.

Key-words: Rainfall; Interpolation; Geostatistics; Cross validation; Pajeú.

Lista de Figuras

Figura 1 – Ilustração dos componentes do ciclo hidrológico	6
Figura 2 – Ilustração de chuvas convectivas em corte transversal ao deslocamento da massa de ar quente.	8
Figura 3 – Ilustração de seção vertical de uma superfície frontal	8
Figura 4 – Ilustração de chuvas orográficas em corte vertical ao deslocamento da massa de ar	9
Figura 5 – Unidades geomorfológicas da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil.	11
Figura 6 – Mapa altimétrico da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil. . . .	12
Figura 7 – Mapa da hidrografia da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil. .	14
Figura 8 – Vegetação natural na região da bacia hidrográfica do Pajeú - Pernambuco, Brasil.	16
Figura 9 – Porção leste da bacia hidrográfica do rio Pajeú vista do Pico do Papagaio, em Triunfo/PE.	17
Figura 10 – Exemplo de semivariograma	21
Figura 11 – Localização geográfica da área de estudo e os municípios pertencentes à microrregião do Pajeú - Pernambuco	29
Figura 12 – Localização geográfica dos postos pluviométricos utilizados na análise - Pernambuco - Brasil.	31
Figura 13 – Representação gráfica dos semivariogramas experimentais e os modelos teóricos	36
Figura 14 – Percentual de informação dos postos pluviométricos da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.	40
Figura 15 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (12 e 92) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.	42
Figura 16 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (148, 155, 182, 183, 184, 238, 290 e 336) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.	43
Figura 17 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (473,528 e 529) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.	44

Figura 18 – Precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - BR - 1993 a 2022.	45
Figura 19 – Box-plot da precipitação pluviométrica média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.	46
Figura 20 – Resultado do teste de ruptura de Pettit da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.	48
Figura 21 – Resultados do teste de Pettitt do primeiro semestre, para a precipitação média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.	50
Figura 22 – Resultados do teste de Pettitt do segundo semestre, para a precipitação média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.	51
Figura 23 – Diagrama de Voronoi da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.	54
Figura 24 – Interpolação pelo método Spline da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.	55
Figura 25 – Resultado do <i>IDW</i> , segundo os pesos, para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.	57
Figura 26 – Resultado do <i>IDW</i> (peso ótimo) para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.	58
Figura 27 – Semivariograma do modelo Esférico	59
Figura 28 – Semivariograma do modelo Exponencial	60
Figura 29 – Semivariograma do modelo Gaussiano	60
Figura 30 – Resultado da krigagem com o modelo gaussiano para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022. . .	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação dos locais selecionados e suas coordenadas geográficas dos municípios pertencentes à microrregião do Pajeú, para a série histórica de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.	30
Tabela 2 – Relação dos locais selecionados e suas coordenadas geográficas dos municípios do entorno da microrregião do Pajeú, para a série histórica de janeiro de 1993 a dezembro de 2022	30
Tabela 3 – Classificação dos Quantis	35
Tabela 4 – Medidas de desempenho dos métodos de interpolação espacial.	38
Tabela 5 – Relação dos postos pluviométricos segundo a quantidade total e percentual das informações disponíveis no período de janeiro/1993 a dezembro/2022.	41
Tabela 6 – Modelos de regressão ajustados para preenchimento de falhas dos postos pluviométricos	42
Tabela 7 – Estatísticas descritivas da precipitação pluviométrica (<i>mm</i>) mensal no Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil, durante o período de 1993 a 2022.	46
Tabela 8 – Testes de Mann-Kendall aplicados às séries das médias mensais e anuais da precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil, para o 1993 a 2022.	47
Tabela 9 – Testes de Pettitt aplicados às séries das médias mensais da precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil, para o 1993 a 2022.	49
Tabela 10 – Caracterização dos períodos “MS, S, N, C, MC” através de dados pluviométricos (1993 a 2022) para microrregião do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil.	53
Tabela 11 – Relação dos anos considerados “Muito Seco” e “Seco” do Sertão do Pajeú, em anos de ENOS	54
Tabela 12 – Valores de efeito pepita, alcance e patamar dos modelos ajustados para a série anual do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil.	59
Tabela 13 – Resultado das medidas de erro para cada técnica de interpolação.	62
Tabela 14 – Postos pluviométricos do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil	70
Tabela 15 – Precipitação média (<i>mm</i>) mensal dos postos pluviométricos do Sertão do Pajeú utilizados nas análises - Pernambuco - Brasil	72

Lista de abreviaturas e siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
EAM	Erro Absoluto Médio
EQM	Erro Quadrático Médio
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão de Literatura	6
2.1	Precipitação Pluviométrica	6
2.1.1	Fenômenos ENOS	9
2.2	Sertão do Pajeú	10
2.2.1	Características ambientais	10
2.2.2	Características socioeconômicas	17
2.3	Geoestatística	18
2.3.1	Variograma	20
2.4	Validação cruzada	22
2.4.1	Métodos de Interpolação	22
2.4.1.1	Thiessen	23
2.4.1.2	Spline	23
2.4.1.3	Inverso da Distância Ponderada	24
2.4.1.4	Krigagem	24
3	Objetivos	26
3.1	Objetivo Geral	26
3.2	Objetivos Específicos	26
4	Metodologia	27
4.1	Dados	27
4.2	Preenchimento de Falhas	28
4.3	Área de estudo	28
4.4	Análise Estatística	31
4.4.1	Teste de Consistência	31
4.4.2	Teste de Tendência	32
4.4.3	Teste de Rupturas	33
4.5	Técnica dos Quantis	34
4.6	Geoestatística	35
4.6.1	Modelos Experimentais	35
4.6.1.1	Modelo Esférico	35
4.6.1.2	Modelo Exponencial	36
4.6.1.3	Modelo Gaussiano	36

4.6.2	Interpolação Espacial	37
4.6.3	Avaliação de desempenho das interpolações	37
5	Resultados e Discussões	39
5.1	Tratamento dos dados	39
5.2	Estatística Descritiva	44
5.3	Técnica dos Quantis	52
5.4	Análise Espacial	54
5.4.1	Método de <i>Thiessen</i>	54
5.4.2	<i>Spline</i>	55
5.4.3	Inverso da Distância Ponderada	55
5.4.4	Geoestatística	58
5.4.5	Krigagem	61
5.5	Comparação dos métodos de interpolação	62
6	Conclusão	63
	Referências Bibliográficas	64
	Apêndices	69
	APÊNDICE A Postos pluviométricos do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil.	70
	APÊNDICE B Precipitação média dos postos pluviométricos do Sertão do Pajeú utilizados nas análises	72
	Anexos	73
	ANEXO A Principais pacotes do R	74
	ANEXO B Plugins do QGIS	77

1 Introdução

As mudanças climáticas emergem como uma pauta de destaque na ciência global contemporânea, ganhando cada vez mais relevância e instigando investigações de alcance mundial. Diversos estudos têm corroborado a premissa de que essas transformações climáticas podem deflagrar impactos de magnitude considerável, os quais, vale destacar, podem se manifestar de maneira diversificada em diferentes regiões do planeta. Esses impactos reverberam profundamente em um número de setores críticos, incluindo, mas não se limitando a eles, a agricultura, a saúde da população e a biodiversidade dos ecossistemas, sendo essas apenas algumas das áreas mais sensíveis e diretamente afetadas por esse fenômeno global (NOVAIS, 2021).

A complexa teia de consequências advindas das mudanças climáticas é amplamente evidenciada e exige uma abordagem holística para sua compreensão. Nos campos agrícolas, por exemplo, alterações nos padrões de precipitação e temperaturas podem impactar significativamente a produção de alimentos, a segurança alimentar e, por conseguinte, a economia de diversas regiões. No âmbito da saúde pública, eventos climáticos extremos, como ondas de calor e tempestades intensas, colocam em risco a vida das populações e sobrecarregam os sistemas de saúde. Já a biodiversidade dos ecossistemas enfrenta pressões crescentes à medida que habitats são transformados e espécies são forçadas a se adaptar ou enfrentar extinção (NOVAIS, 2021).

Além disso, as mudanças climáticas interagem de forma sinérgica com outros fatores, ampliando ainda mais sua complexidade. Essas interações podem criar uma cascata de desafios que afetam não apenas os setores já mencionados, mas também a infraestrutura, a segurança hídrica, os deslocamentos populacionais e muito mais.

Portanto, a urgência de compreender e enfrentar as mudanças climáticas de maneira integral e colaborativa nunca foi tão premente. O conhecimento científico e a cooperação global são essenciais para mitigar os impactos e adotar estratégias que promovam a resiliência e a adaptação às mudanças climáticas, visando garantir um futuro sustentável para as gerações vindouras.

A gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos são elementos de vital importância no cenário contemporâneo, desempenhando um papel crítico na preservação e disponibilidade da água. A sua efetiva administração é imperativa, visando garantir o suprimento e a satisfação das crescentes demandas, com a missão primordial de prevenir conflitos de

natureza hídrica. Esta necessidade se torna ainda mais urgente nas regiões caracterizadas pela aridez, onde a escassez de água é uma característica intrínseca e onde, portanto, a gestão hídrica desempenha um papel ainda mais preponderante (VIANA; NETO; FARIAS, 2023).

Nessas áreas áridas e semiáridas, a vulnerabilidade das populações rurais ganha destaque, tornando-se uma preocupação central. A instabilidade climática, agravada por períodos de seca cada vez mais frequentes e intensos, atua como um catalisador, expondo essas comunidades a riscos substanciais. A disponibilidade de água é a espinha dorsal da subsistência e do desenvolvimento em regiões rurais, onde a agricultura e a pecuária frequentemente constituem a principal fonte de renda e segurança alimentar. Portanto, qualquer ruptura no fornecimento de água pode resultar em sérias consequências para a vida cotidiana dessas populações, incluindo a fome, o deslocamento forçado e a perda de meios de subsistência.

Diante desse cenário, é crucial adotar abordagens abrangentes para a gestão da água que considerem não apenas os desafios atuais, mas também os impactos em evolução das mudanças climáticas. Políticas públicas, práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias inovadoras desempenham um papel essencial na construção de resiliência em comunidades rurais, mitigando os efeitos devastadores da seca e promovendo a sustentabilidade de longo prazo. Além disso, a cooperação entre governos, organizações não governamentais e a sociedade civil é fundamental para garantir que a gestão hídrica seja eficiente, inclusiva e equitativa, atendendo às necessidades de todos, especialmente das populações rurais vulneráveis.

Conforme destacado por Souza e Azevedo (2012) a minuciosa análise de registros climáticos de longo prazo assume uma relevância incontestável no contexto das sociedades contemporâneas. Essa análise oferece alicerces sólidos para a compreensão das tendências climáticas e suas possíveis causas, uma vez que os impactos resultantes das variações climáticas estão intrinsecamente relacionados aos eventos extremos de precipitação.

O estudo aprofundado de registros climáticos ao longo do tempo é essencial não apenas para a ciência, mas também para a tomada de decisões informadas em diversos setores da sociedade. Ao estabelecer conexões entre padrões climáticos e eventos climáticos extremos, é possível prever e preparar-se para impactos potencialmente devastadores, como inundações, secas prolongadas, tempestades violentas e outros fenômenos climáticos extremos. Essa antecipação torna-se crucial para a implementação de medidas de adaptação e mitigação que reduzam os riscos e protejam as comunidades, a infraestrutura e os ecossistemas (SOUZA; AZEVEDO, 2012).

A gestão da água representa um fator central na configuração, solidificação e

progresso de qualquer território. A água é inquestionavelmente um elemento natural indispensável, essencial para o funcionamento e a sustentabilidade dos ecossistemas, bem como para a subsistência e o desenvolvimento das sociedades humanas. Ela desempenha um papel crítico ao possibilitar a expansão geográfica das comunidades, ao atender às suas necessidades básicas e ao impulsionar o progresso de suas atividades econômicas, conforme afirmam [Viana, Neto e Farias \(2023\)](#).

No entanto, é crucial reconhecer que a gestão adequada da água é um desafio complexo e multifacetado. Em muitas regiões do mundo, a disponibilidade de água é limitada, e a pressão sobre os recursos hídricos é crescente devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico. Essa realidade exige uma abordagem cuidadosa para garantir que a água seja usada de maneira sustentável, equitativa e eficaz.

O Nordeste representa 18,3% do território brasileiro. Estando próximo da linha do Equador, apresenta características climáticas com baixas latitudes condicionadas a temperaturas elevadas (média de 26° C), número elevado de horas de sol por ano (estimado em 3000) e índices acentuados de evapotranspiração, devido a incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície do solo o Semiárido evapotranspira, em média, cerca de 2000 mm/ano, e em algumas regiões atinge cerca de 7 mm/dia ([ASA, 2018](#)).

As características do semiárido são, de modo geral, a aridez do clima, a deficiência hídrica com imprevisibilidade das precipitações pluviométricas e a presença de solos pobres em matéria orgânica. Os critérios para delimitação do Semiárido aprovados pelas Resoluções do Conselho Deliberativo da Sudene de nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017, os seguintes aspectos: a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; o índice de aridez de *Thorntwaite* igual ou inferior a 0,50; percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

Ademais, a região Semiárida enfrenta desafios significativos que vão muito além das questões ambientais, como a desertificação e a seca extrema. Essa vasta extensão territorial sofre impactos socioeconômicos profundos decorrentes da escassez de água e das complexidades inerentes ao desenvolvimento da agricultura, que é a atividade predominante nessa região. Esses desafios contribuem para a perpetuação da pobreza e para a criação de condições de vida precárias ([CORREIA; CAVALCANTE; MARIN, 2011](#)).

A escassez de água no Semiárido brasileiro desencadeia um ciclo de dificuldades que afeta a qualidade de vida de suas comunidades. A agricultura como sustentáculo econômico dessa região, se depara com a constante luta contra a incerteza climática e a falta de recursos hídricos, o que limita a produção de alimentos e a geração de renda. A falta de segurança hídrica tem implicações diretas na nutrição e saúde das populações, à medida que a oferta de alimentos é prejudicada, e a pobreza é exacerbada.

O acesso à água de qualidade é um direito humano fundamental e a chave para a transformação da realidade do Semiárido. Nesse sentido [Correia, Cavalcante e Marin \(2011\)](#) afirmam que a gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos nessa região é essencial para combater a pobreza, melhorar as condições de vida e fomentar o desenvolvimento econômico. Isso inclui a implementação de práticas agrícolas resilientes à seca, o investimento em infraestrutura de armazenamento e distribuição de água, bem como políticas sociais que promovam o acesso equitativo à água potável.

Além disso, é necessário um enfoque abrangente que considere as dimensões social, econômica e ambiental, de modo a promover uma abordagem integrada que não apenas mitigue os impactos da seca, mas também construa a resiliência das comunidades semiáridas diante dos desafios climáticos em constante evolução. Dessa forma, a superação dos problemas sociais e econômicos associados à escassez de água na região Semiárida torna-se uma meta alcançável e um imperativo moral ([CORREIA; CAVALCANTE; MARIN, 2011](#)).

Em que pese as questões ambientais, é importante ressaltar que o Estado de Pernambuco possui um histórico de desastres naturais ligados a eventos de estiagem e seca prolongados. As estiagens, comparadas às secas, são menos intensas e caracterizam-se pela menor intensidade e menores períodos de tempo. A seca é caracterizada por longos períodos sem chuva e consequências severas para a região nordeste, a qual, por sua vez, afeta muitos municípios pernambucanos, matando animais e ameaçando a sobrevivência de milhares de famílias, ocasionando um problema muito grave para o abastecimento urbano e para a geração de energia elétrica.

Em vista disso, é possível associar os objetivos relacionados ao desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, a Agenda 2030, que contemplam temas acerca das mudanças climáticas, bem como a conservação da biodiversidade, como por exemplo: objetivo 2, acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável – em específico, o item 2.4 que visa garantir sistemas sustentáveis da produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo; objetivo 6, assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos e objetivo 13, tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos ([ONU, 2023](#)).

Outrossim, estudos como o de [Filho, Moraes e Bennati \(2016\)](#), apresentam os principais impactos das mudanças climáticas na biodiversidade no Brasil, Norte e Nordeste. Para a região nordeste, os impactos estão associados à redução da precipitação e o aumento

da evapotranspiração, a redução dos recursos hídricos em decorrência da mudança do clima e a vegetação semiárida que tende a ser substituída pela vegetação árida.

Estudos indicam que as mudanças no comportamento da precipitação pluviométrica afetam o ciclo hidrológico e conseqüentemente os recursos hídricos. Em casos de mudanças climáticas extremas, o impacto está relacionado às alterações nos recursos hídricos, a ocorrência de inundações e secas mais severas e frequentes, (SILVA; MONTENEGRO; SOUZA, 2017). Nesse sentido, estudar os impactos das modificações climáticas sobre os recursos hídricos, em especial para a região do sertão, como o Pajeú, é estratégico para a elaboração, implementação e fortalecimento de políticas públicas associadas ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Considerando a grande importância da precipitação no semiárido brasileiro, os estudos da região Nordeste do Brasil são escassos ou quase inexistentes. Isso ocorre pelo fato da aplicação da estatística e geoestatística por meio desta variável representa maiores desafios se comparadas a outros componentes dos ecossistemas. Em todo o Nordeste têm sido introduzido ferramentas estatísticas, porém estudos referentes a precipitação pluviométrica ainda ainda são escassos, sendo informações importantíssimas e indispensáveis para manutenção das atividades vitais. Em razão disso contribuir socialmente e economicamente, é de grande interesse com este estudo a identificação se a geoestatística favorece confiabilidade.

Portanto, objetivamos caracterizar a precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, estatisticamente e utilizando os conceitos da geoestatística, aplicando nos dados técnicas de interpolação para construção da superfície estimada, a fim de identificar o melhor ajuste.

Por fim, o trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, o capítulo 3, aponta os objetivos, geral e específicos, o capítulo 4, descreve a metodologia utilizada no estudo, no capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões da pesquisa, e por fim, o capítulo 6, discorre a conclusão da pesquisa.

2 Revisão de Literatura

Nesse capítulo é apresentada uma revisão de literatura sobre as metodologias utilizadas. A seção 2.1 apresenta o conceito de precipitação pluviométrica e os principais tipos de chuva. A seção 2.2, caracteriza o Sertão do Pajeú com indicadores ambientais e socioeconômicos. A seção 2.3, apresenta os conceitos e trabalhos relacionados ao uso da geostatística. Por último a seção 2.4 descreve o algoritmo para a realização da validação cruzada e apresenta as técnicas de interpolação espacial que foram consideradas.

2.1 Precipitação Pluviométrica

O conceito de precipitação está relacionado à concentração de águas provenientes do vapor d'água na atmosfera, depositada na superfície terrestre, como forma de chuva, granizo, neblina, neve ou geada (PINTO et al., 1976).

Inicialmente, torna-se necessário destacar o ciclo hidrológico (Figura 1), que de forma geral, pode-se dizer, tem origem na evaporação das águas, com posterior formação de nuvens (condensação) e finalmente, a precipitação quando novamente o ciclo tem início.

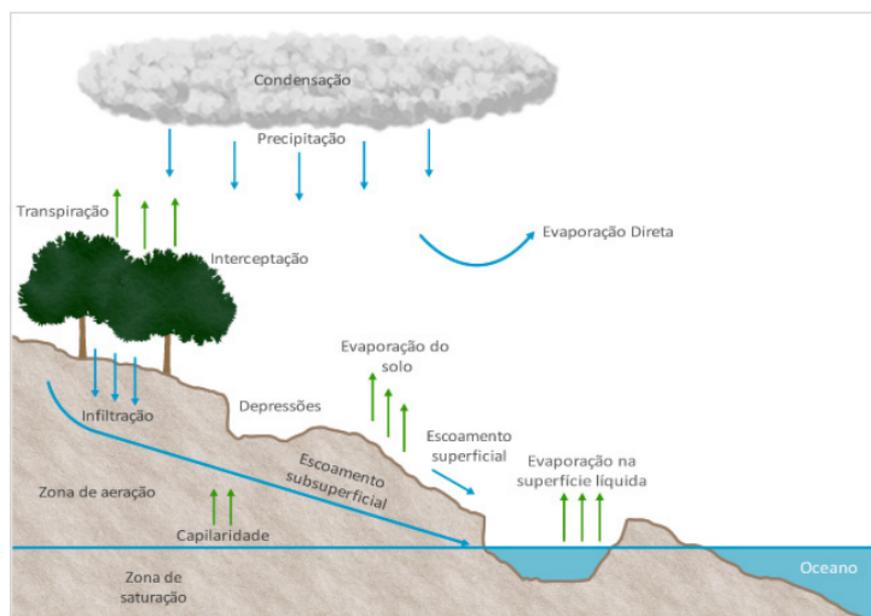


Figura 1 – Ilustração dos componentes do ciclo hidrológico

Fonte: Hartwig (2012)

Quando se trata de região tropical a precipitação que mais interessa é em forma de chuva, pois é fundamental na manutenção hídrica e também devido à demanda pela água em seus diversos usos. De acordo com [Soares e Batista \(2004\)](#) a chuva a precipitação de partículas de água líquida sob a forma de gotas com diâmetro mínimo de 0,5 mm e velocidade de queda de $3m.s^{-1}$.

Segundo [Tubelis e Nascimento \(1984\)](#), a chuva inicia-se quando é atingido o nível de condensação, e se prolonga até o nível em que a temperatura do ar torna-se igual a $-12^{\circ}C$. Neste estágio, a nuvem é caracterizada por vapor d'água e gotículas de água líquida, e se resfria na ascensão segundo o gradiente adiabático úmido que se estabelece. A precipitação que se forma, a partir de nuvens até este estágio é sempre pluvial. As gotículas da nuvem, entre as temperaturas de $0^{\circ}C$ e $-12^{\circ}C$ não se solidificam e por esta razão são denominadas gotículas de água super-resfriadas, ou seja, a água é resfriada a uma temperatura inferior a seu ponto de congelamento ($0^{\circ}C$ à pressão normal) e permanece, todavia, no estado líquido, em função, basicamente, das condições atmosféricas diferenciadas em altitude, onde se destaca, principalmente, a menor pressão atmosférica.

As chuvas podem ser classificadas em 3 tipos principais, de acordo com sua gênese: Chuvas Convectivas ou de Convecção, Frontais ou Ciclônicas e Chuvas Orográficas ou de Relevo ([TORRES; MACHADO, 2008](#)).

1. **Chuvas Convectivas:** as nuvens de convecção (grandes Cúmulos ou Cumulonimbos) são formadas a partir da ascensão de uma massa de ar úmido em regiões quentes, sendo pois, comuns em áreas quentes e úmidas. Com o aumento da concentração de vapor d'água ou com o resfriamento dessa massa de ar (seja em função da altitude, seja pela presença de ventos mais frios), ocorre a saturação do ar, resultando em chuvas pesadas e intensas, embora de duração mais curta. Nas regiões equatoriais, onde ocorrem baixas pressões e a evaporação é constante e intensa, devido às elevadas temperaturas, ocorrem, comumente, chuvas de convecção, também provocadas pela ação dos ventos Alísios oriundos das áreas de alta pressão das latitudes dos $30^{\circ}C$ na região Tropical. Estas chuvas são comuns no verão, quando, depois de atingida a temperatura máxima do dia, com o decréscimo da mesma no final da tarde ou início da noite, “despencam” um forte aguaceiro, em geral de curta duração e acompanhadas de raios, relâmpagos e trovões.

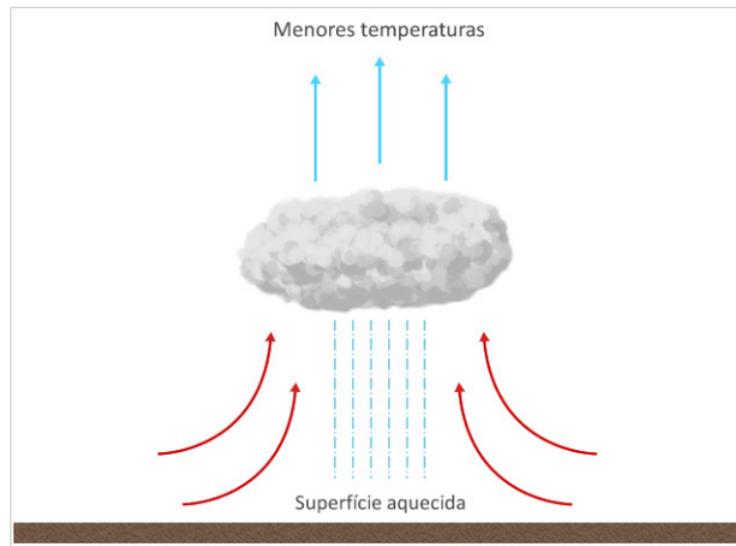


Figura 2 – Ilustração de chuvas convectivas em corte transversal ao deslocamento da massa de ar quente.

Fonte: [Hartwig \(2012\)](#)

2. **Chuvas Frontais:** este tipo de chuva, também chamada de ciclônica, está associada à instabilidade causada pelo encontro de duas massas de ar de características térmicas diferentes (uma massa de ar quente e outra de ar frio). É uma precipitação moderadamente intensa, contínua e que afeta áreas bastante extensas. São comuns nas áreas de médias latitudes, onde ocorrem, normalmente (principalmente no período do inverno) o encontro de massas de ar de característica opostas. Com o lento resfriamento do ar, ocorre a saturação e posterior condensação do vapor d'água, e conseqüentemente, as chuvas frontais.

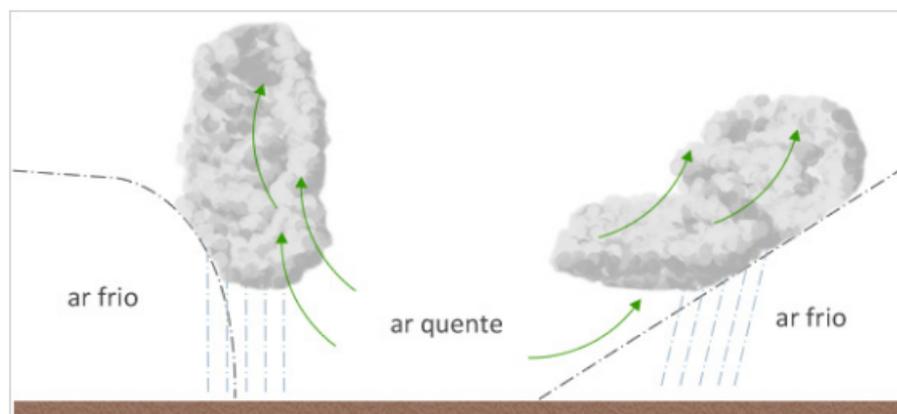


Figura 3 – Ilustração de seção vertical de uma superfície frontal

Fonte: [Hartwig \(2012\)](#)

3. **Chuvas Orográficas:** as chuvas orográficas (orogênicas ou de relevo) ocorrem

devido à ascensão forçada de ventos úmidos ante um obstáculo do relevo. O ar, obrigado a se elevar para transpor o obstáculo, resfria-se (com a altitude), podendo saturar-se. As vertentes do obstáculo voltadas para o vento, ficam cobertas de nuvens das quais cai a chuva. Do outro lado do obstáculo, o ar descendente é seco e, em geral, frio, com suas características iniciais modificadas.

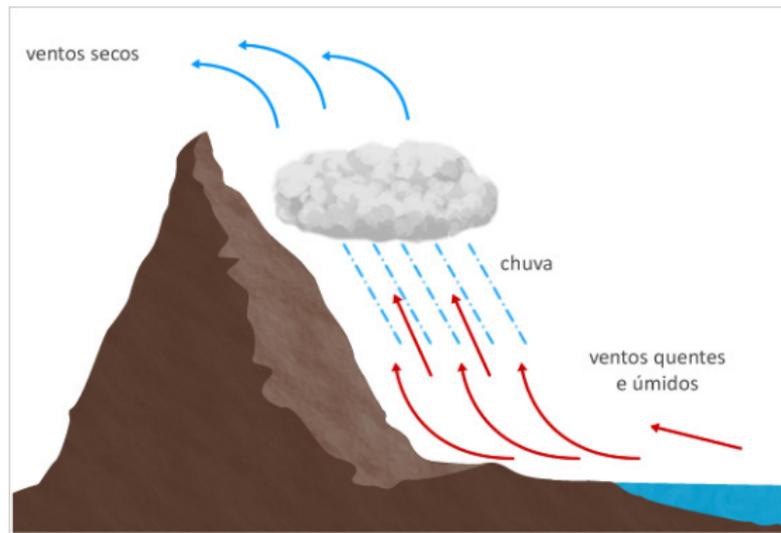


Figura 4 – Ilustração de chuvas orográficas em corte vertical ao deslocamento da massa de ar

Fonte: [Hartwig \(2012\)](#)

2.1.1 Fenômenos ENOS

As precipitações em cada ano estão sujeitas a totais bem definidos, podendo se afastar grandemente dos valores normais devido a influência dos fenômenos El Niño e La Niña.

O El Niño e a La Niña são partes de um mesmo fenômeno atmosférico-oceânico que ocorre no oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). O ENOS refere-se às situações nas quais o oceano Pacífico Equatorial está mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) do que a média histórica. A mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais na temperatura e precipitação ([CPTEC, 2023](#)).

A caracterização do ENOS é analisada por meio do cálculo de alguns índices, como o Índice Oceânico Niño (*Oceanic Niño Index* – ONI) definido pela média móvel trimestral da anomalia de temperatura da superfície do mar (ATSM) para a região do Niño 3.4, por no mínimo, cinco meses consecutivos, onde a anomalia maior que 0,5 °C está associado a El Niño e inferior a -0,5 °C está associado a La Niña ([CPTEC, 2023](#)).

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil - INMET, no Brasil, o fenômeno aumenta o risco de seca na faixa norte das regiões Norte e Nordeste e de grandes volumes de chuva no Sul do País. Isso ocorre porque a água da superfície do Pacífico, que está muito mais quente do que o normal, evapora com mais facilidade. Ou seja, o ar quente sobe para a atmosfera mais alta, levando umidade e formando uma grande quantidade de nuvens carregadas (INMET, 2023).

Logo, no meio do Oceano Pacífico, chove muito e com frequência durante o El Niño. Durante as chuvas, esse mesmo ar quente, agora mais seco, continua circulando e, dessa vez, desce no norte da América do Sul, inibindo a formação de nuvens e, conseqüentemente, a ocorrência de chuvas em parte do Norte e Nordeste do Brasil. Afinal, o ar que provoca a formação de nuvens é aquele que sobe da superfície terrestre para a atmosfera e não o contrário (INMET, 2023).

Já na Região Sul, o El Niño aumenta a probabilidade de chuvas acima da média porque a circulação dos ventos em grande escala, causada pelo El Niño, também interfere em outro padrão de circulação de ventos na direção norte-sul e essa interferência age como uma barreira, impedindo que as frentes frias, que chegam pelo Hemisfério Sul, avancem pelo País. Logo, as frentes ficam concentradas por mais tempo na Região Sul do Brasil (INMET, 2023).

2.2 Sertão do Pajeú

2.2.1 Características ambientais

Segundo Ribeiro, Marçal e Correa (2010) os processos morfogenéticos moldam o relevo no semiárido em conjunto com o clima rigoroso da região. Esses processos são profundamente influenciados pela variabilidade das formações da cobertura vegetal e pela proteção que elas oferecem aos solos e afloramentos rochosos. Esse entendimento é essencial para compreender a dinâmica do ambiente semiárido.

A vegetação desempenha um papel crucial na conservação do solo e na redução da erosão, já que suas raízes ajudam a fixar o solo e minimizam a perda de nutrientes e material sedimentar. Além disso, a cobertura vegetal também ajuda a regular o microclima, controlando a evaporação da água do solo e proporcionando sombra, o que é particularmente importante em uma região com altas temperaturas.

Ribeiro, Marçal e Correa (2010) define ainda que há uma interconexão entre os elementos do ambiente semiárido e a importância de proteger e conservar a vegetação nativa como parte integrante da estratégia de manejo sustentável desse ecossistema desafiador.

O Sertão do Pajeú está inserido na unidade geomorfológica da Depressão Sertaneja, que se apresenta como uma depressão periférica em relação aos planaltos da Borborema e da Bacia Sedimentar do Jatobá, além da Chapada do Araripe, e compreende um diversificado conjunto de padrões de relevo com amplo predomínio de superfícies aplainadas com relevo plano e suavemente ondulado, resultante de processos de arrasamento generalizado do relevo sobre diversos tipos de litologias, Figura 5. O Domínio das Superfícies Aplainadas Degradadas da Depressão Sertaneja é o mais extenso do território de Pernambuco e está assentado em rochas do embasamento ígneo-metamórfico pré-cambriano da Província Borborema. Nessas superfícies aplainadas ocorre um conjunto de solos rasos, com fertilidade natural de baixa a alta, em ambiente de absoluto predomínio de intemperismo físico em clima tropical semiárido (Bsh), com índices pluviométricos variando entre 400 a 700 mm e chuvas concentradas nos meses de janeiro a abril, no período de maior avanço da massa equatorial continental (mEc), associado à oscilação máxima, para o hemisfério sul, da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esses terrenos se apresentam, invariavelmente, recobertos com vegetação de caatinga hiperxerófito e compõem a típica paisagem do sertão nordestino, (SILVA, 2012) e (TORRES, 2014).

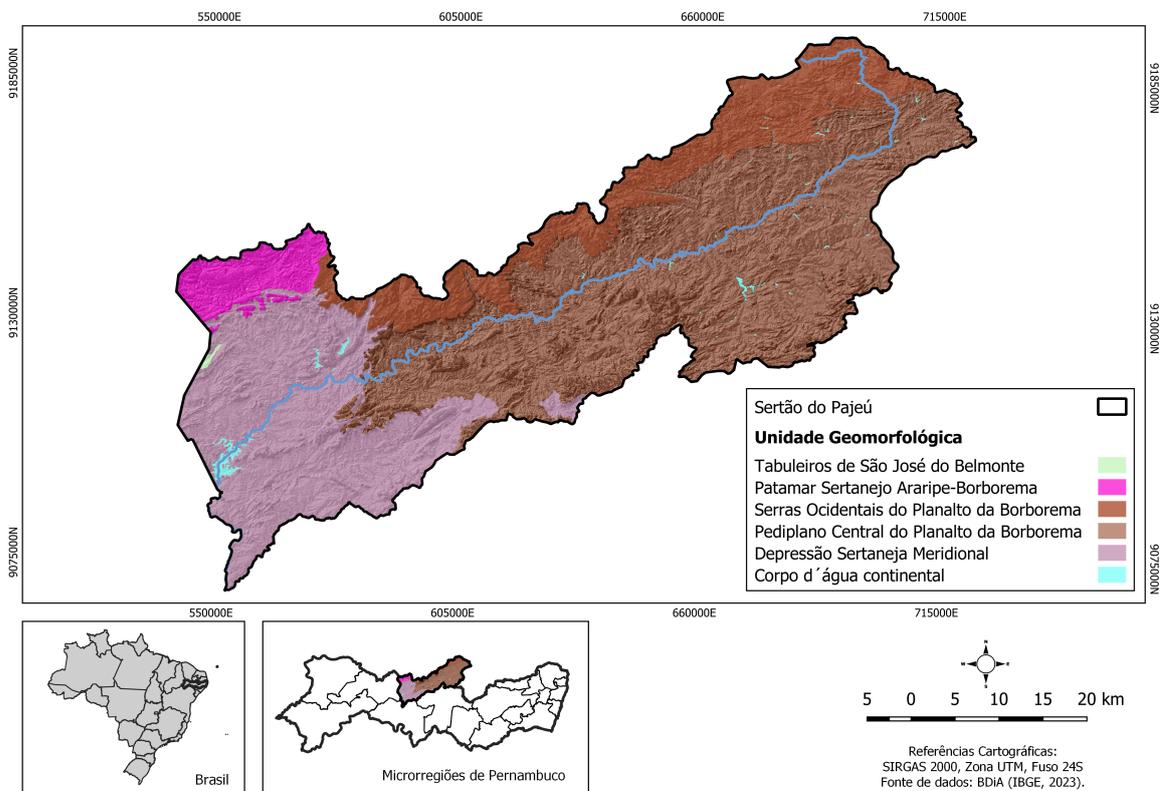


Figura 5 – Unidades geomorfológicas da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6 apresenta as características altimétricas da microrregião do Pajeú. Na serra da Baixa Verde, onde se localiza o município de Triunfo, está o ponto mais alto do estado, o Pico do Papagaio, com 1.260 m de altitude. O maciço montanhoso de Triunfo se sobressai na paisagem da Depressão Sertaneja pelo contraste fitoclimático que um brejo de altitude de vegetação florestal causa em meio ao vasto terreno, topograficamente rebaixado, recoberto por vegetação de caatinga em pleno sertão semiárido. Ressalta-se que a análise da flora da caatinga mostra que a maior diversidade das espécies vegetais está associada às maiores altitudes, principalmente nas áreas rochosas e nos brejos, (GIULIETTI et al., 2020).

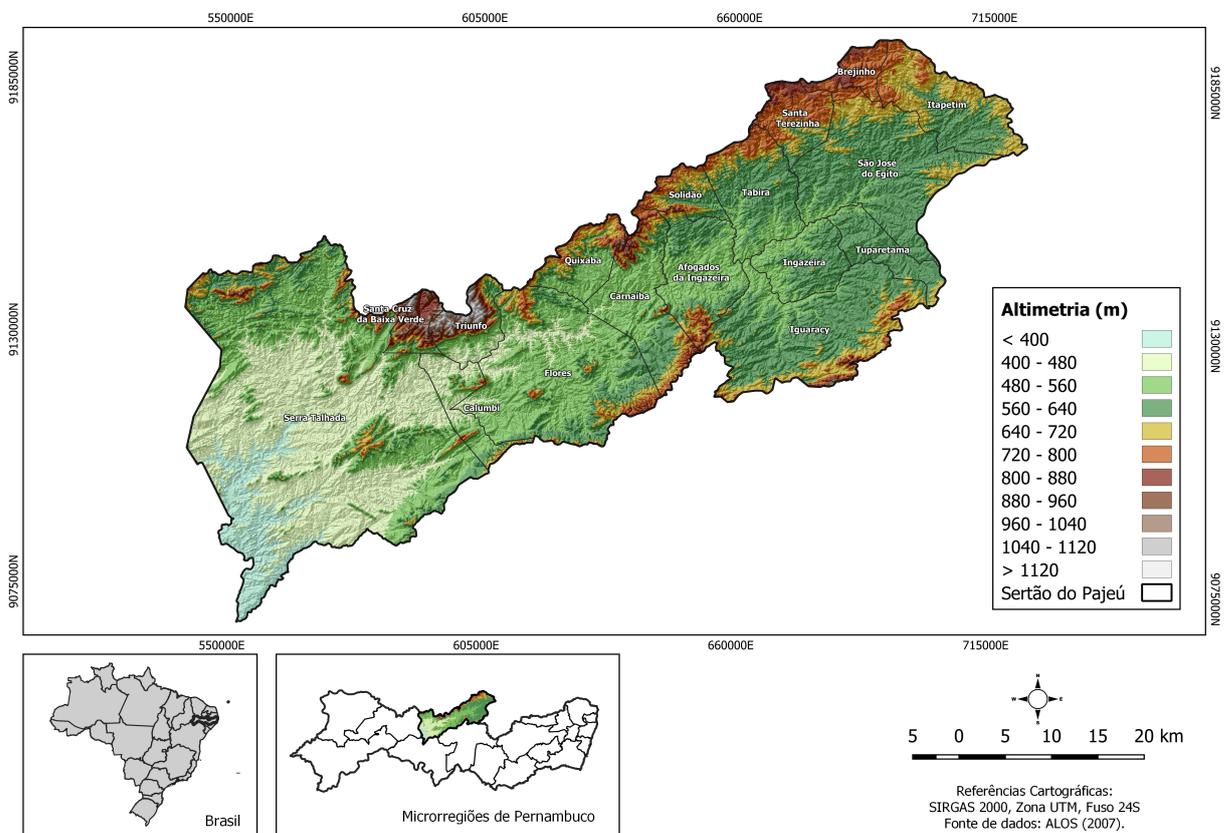


Figura 6 – Mapa altimétrico da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

Os sertões nordestinos não escapam a um fato peculiar a todas as regiões semiáridas do mundo: a variabilidade climática. Assim, a média das precipitações anuais de uma localidade qualquer serve apenas para normatização e referência, em face de dados climáticos obtidos em muitos anos. Efetivamente, é muito grande a variabilidade climática do domínio das caatingas. Em alguns anos as chuvas chegam no tempo esperado, totalizando,

às vezes, até dois tantos a mais do que a média das precipitações da área considerada. Entretanto, na sequência dos anos, acontecem alguns dentre eles em que as chuvas se atrasam ou mesmo não chegam, criando os mais diferentes tipos de impactos para a economia e as comunidades viventes dos sertões. Deste modo, a hidrologia regional do Nordeste seco está íntima e totalmente dependente do ritmo climático sazonal, dominante no espaço fisiográfico dos sertões. Ao contrário do que acontece em todas as áreas úmidas do Brasil – onde os rios sobrevivem aos períodos de estiagem devido à grande carga de água economizada nos lençóis subsuperficiais – no Nordeste seco o lençol se afunda e se resseca e os rios passam a alimentar o lençol. Secando, todos eles, desde suas cabeceiras até perto da costa (SILVA, 2012).

A Figura 7, apresenta a hidrografia da microrregião do Pajeú. O rio Pajeú é um curso d'água intermitente e sazonal – padrão dos rios sertanejos, que percorrem uma grande extensão de terrenos aplainados, com solos rasos e de baixa capacidade de armazenamento de água – com período de seis a oito meses de estiagem. Banhando o estado de Pernambuco, corresponde ao rio com a maior bacia hidrográfica do Estado, com 353 km de comprimento. O seu curso principal toma a direção nordeste-sudoeste e em seguida aponta para o sul, desaguando no lago de Itaparica, no rio São Francisco.

O rio Pajeú nasce na serra da Balança, no município de Brejinho-PE, próximo à divisa entre os estados da Paraíba e de Pernambuco e margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada, Floresta e Itacuruba, todas no estado de Pernambuco. Nesta última cidade o rio se encontra com o rio São Francisco, do qual é afluente. Os afluentes são os rios e cursos d'água menores que desaguam nos rios principais.

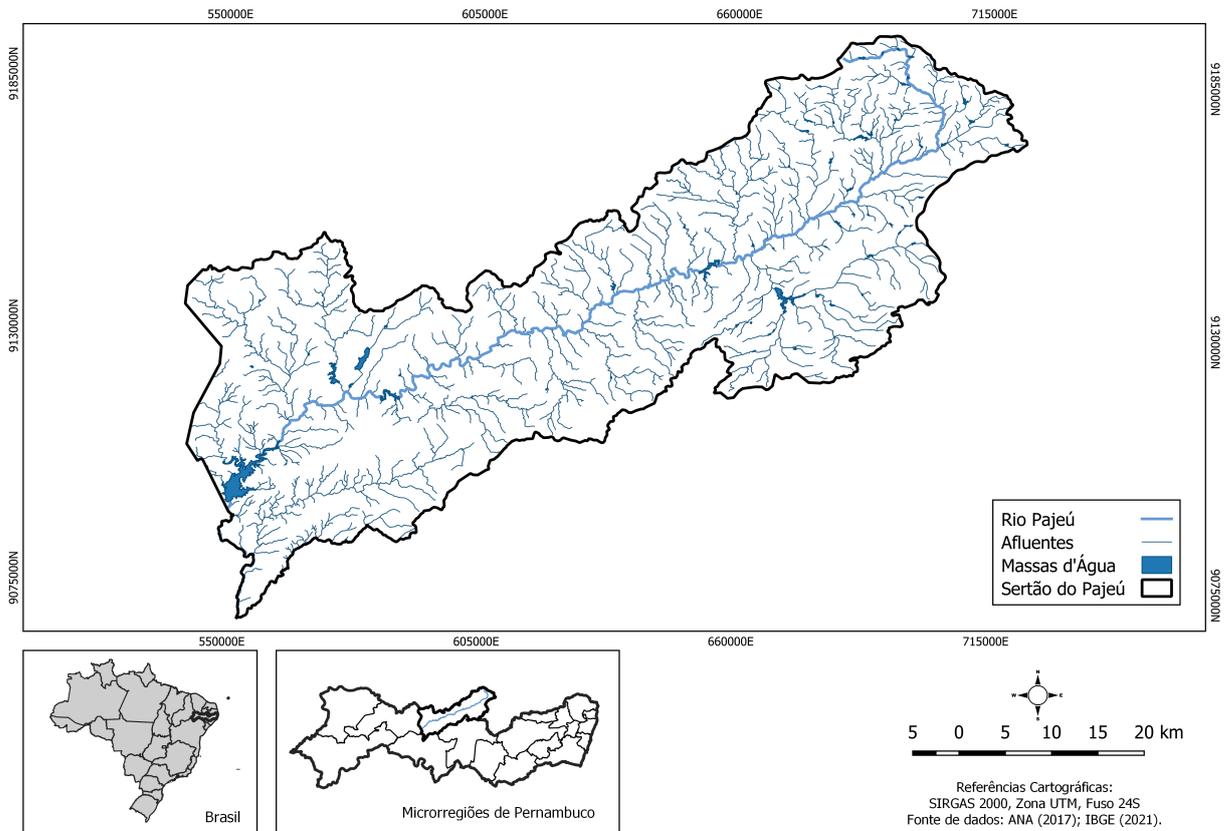


Figura 7 – Mapa da hidrografia da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

A mata de caatinga, com suas mais de 4.320 espécies vegetais, é um componente fundamental dos ecossistemas do semiárido brasileiro. Ela desempenha um papel crucial na manutenção da biodiversidade e na promoção da vida nessa região marcada por condições climáticas desafiadoras. A pesquisa realizada por [Gonçalves et al. \(2022\)](#) destaca duas funções vitais desempenhadas por essa vegetação única.

A primeira função, que envolve a capacidade de acumular água em seu interior, é de grande importância para a sobrevivência da fauna e flora do semiárido. A caatinga é conhecida por suas estratégias de adaptação, como a capacidade de armazenar água em troncos e raízes, permitindo que a vegetação sobreviva em períodos de seca prolongada. Essa função desempenha um papel crítico na disponibilidade de recursos hídricos para as espécies que habitam a região, contribuindo para a manutenção da biodiversidade.

A segunda função relevante da mata de caatinga é a regulação da temperatura e a proteção do solo. A vegetação atua como um regulador natural, diminuindo a amplitude térmica na região. Ela fornece sombra e reduz a exposição direta ao sol, ajudando a manter

as temperaturas mais amenas durante o dia e, conseqüentemente, criando um ambiente mais favorável para a vida. Além disso, a vegetação protege o solo da erosão, garantindo sua fertilidade e promovendo a retenção de nutrientes.

Essas funções desempenhadas pela mata de caatinga são fundamentais para a resiliência do ecossistema do semiárido e para a sobrevivência das comunidades que dependem dos recursos naturais da região. Além disso, destacam a importância de preservar e restaurar a caatinga como parte de estratégias de conservação da biodiversidade e mitigação dos impactos das mudanças climáticas no Brasil.

Segundo [Feitosa \(2012\)](#), a bacia do rio Pajeú é predominantemente coberta pela caatinga hiperxerófila, um ecossistema característico das regiões áridas e semiáridas do Nordeste do Brasil. A caatinga hiperxerófila é notável por sua capacidade de adaptação às duras condições climáticas, marcadas por chuvas escassas e temperaturas elevadas.

Dentro da caatinga hiperxerófila, [Feitosa \(2012\)](#) identifica três tipos fisionômicos distintos que variam de acordo com fatores como hierarquia topográfica, relevo, embasamento geológico, características do solo e umidade disponível. Essa diferenciação é fundamental para compreender a diversidade e a complexidade desse ecossistema único.

O primeiro tipo fisionômico é a caatinga arbórea, que se desenvolve em áreas com características mais favoráveis, como relevo suave, solos com maior capacidade de retenção de água e maior umidade. Nesse ambiente, árvores de diferentes espécies conseguem se estabelecer e formar uma cobertura arbórea mais densa.

O segundo tipo, conhecido como caatinga arbóreo-arbustiva, é encontrado em áreas intermediárias, onde as condições são um pouco menos favoráveis. Nesse cenário, além das árvores, arbustos desempenham um papel significativo na composição da vegetação, contribuindo para a adaptação às condições de aridez.

Por fim, a caatinga arbustiva é o terceiro tipo fisionômico, prevalecendo em áreas de maior aridez, relevo acidentado e solos mais pobres em umidade. Nesse ambiente, os arbustos se destacam como a forma predominante de vegetação, adaptando-se a essas condições desafiadoras.

A Figura 8 apresenta as características da vegetação natural na região da bacia hidrográfica do Pajeú. A compreensão dessas diferentes formas de caatinga hiperxerófila é essencial para a conservação e manejo sustentável dos recursos naturais na bacia do rio Pajeú. Além disso, essas informações são valiosas para o desenvolvimento de estratégias de preservação da biodiversidade, recuperação de áreas degradadas e o planejamento de ações relacionadas ao uso sustentável da terra, demonstrando a rica diversidade da caatinga na região ([FEITOSA, 2012](#)).

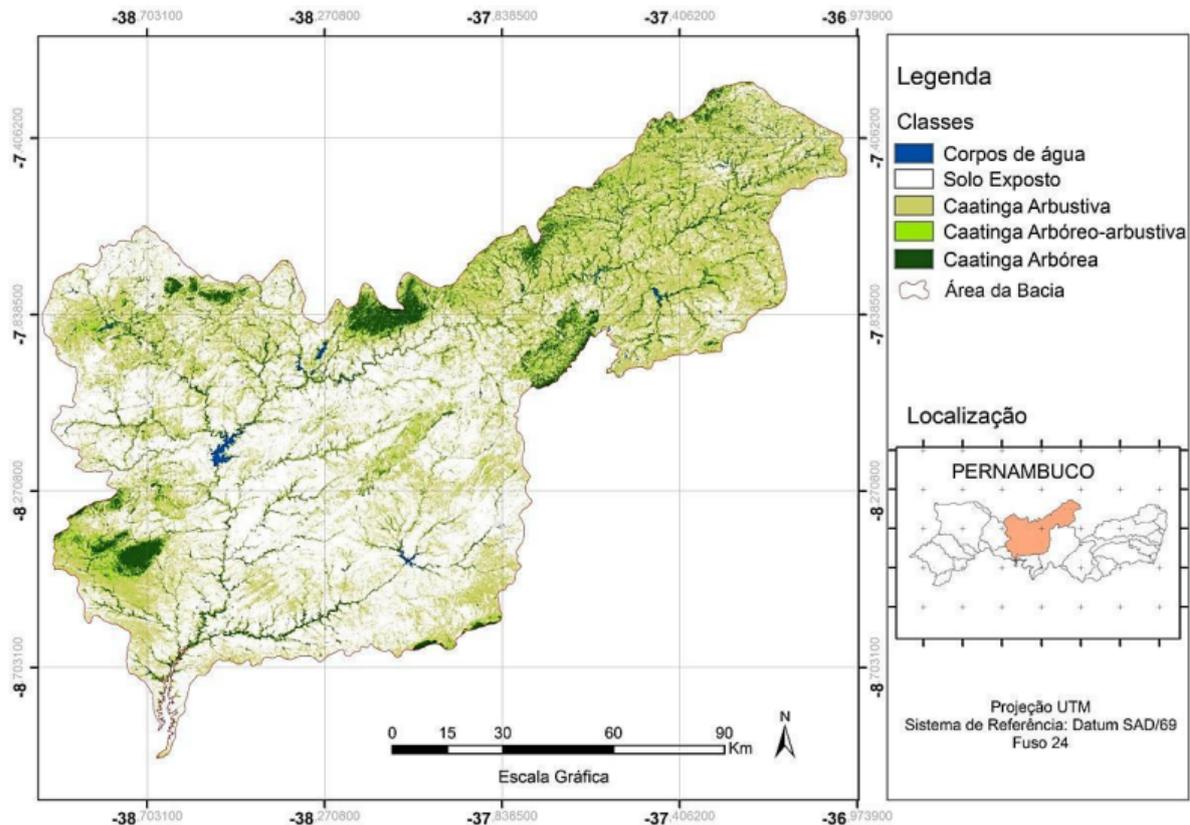


Figura 8 – Vegetação natural na região da bacia hidrográfica do Pajeú - Pernambuco, Brasil.

Fonte: Feitosa (2012)

Dentre as espécies arbóreas do espaço da bacia hidrográfica do rio Pajeú, algumas se destacam pela alta quantidade de nitrogênio em suas folhas como a Aroeira, Caraibeira, Catingueira, Juazeiro, Jurema e a Umburana de cheiro. Cada qual possui sua supremacia e suas peculiaridades, como a capacidade adaptativa de sobrevivência à falta de água e a rápida regeneração com a presença das chuvas. De acordo com [Gonçalves et al. \(2022\)](#), estas espécies são primordiais para o funcionamento equilibrado do meio ambiente e para prover à natureza a capacidade de se recuperar de distúrbios naturais como a abertura de clareiras, ou distúrbios antrópicos como desmatamentos e queimadas, mesmo que em uma área já habitada. A Figura 9, apresenta características geomorfológicas da porção leste da bacia hidrográfica do rio Pajeú.



Figura 9 – Porção leste da bacia hidrográfica do rio Pajeú vista do Pico do Papagaio, em Triunfo/PE.

Fonte: Mendes (2023). ¹

2.2.2 Características socioeconômicas

Em relação às questões demográficas, pode-se afirmar que na microrregião do Pajeú, o município com maior densidade demográfica corresponde à Afogados da Ingazeira (106,54 *hab/km²*), ao passo que Iguaracy apresentou menor população relativa (13,2 *hab/km²*), [IBGE \(2022\)](#).

A respeito das características socioeconômicas do sertão do Pajeú, segundo os dados obtidos no Atlas do Desenvolvimento Humano, o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) médio da região é de 0,607, o que corresponde a faixa média do

¹ Acervo pessoal da discente Emile Maely Mendes Melo, concluinte do curso de Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Fotografia retirada em pesquisa de campo ao Sertão do Pajeú, realizada no dia 02 de agosto de 2023.

desenvolvimento humano (entre 0,600 e 0,699), mesma faixa do estado de Pernambuco, cujo IDH para o mesmo ano foi 0,673, (PNUD, 2010).

Com relação aos desdobramentos do IDHM, nas três dimensões, renda, educação e longevidade, a região do Pajeú teve os seguintes valores médio: 0,577, 0,513 e 0,756, respectivamente. Estes valores podem indicar uma baixa renda e educação, e alta expectativa de vida na região.

Ainda sobre o IDHM, cerca de 53% dos municípios da região do Pajeú, foram classificados com IDHM baixo, valores entre 0,500 e 0,599, são eles: Flores (0,556), Calumbi (0,571), Brejinho (0,574), Quixaba (0,577), Carnaíba (0,583), Solidão (0,585), Itapetim (0,592), Santa Terezinha (0,593) e Iguaracy (0,598). Os demais municípios da região, foram classificados com IDHM médio, valores entre 0,600 e 0,699, são eles: Tabira (0,605), Ingazeira (0,608), Santa Cruz da Baixa Verde (0,612), Tuparetama (0,634), São José do Egito (0,635), Afogados da Ingazeira (0,657), Serra Talhada (0,661) e Triunfo (0,670).

Segundo dados do IBGE (2020), o município de Serra Talhada apresenta o maior PIB *per capita* com R\$ 18.214,14, seguido dos municípios de Afogados da Ingazeira (R\$ 12.528,31), São José do Egito (R\$ 11.549,47), Santa Cruz da Baixa Verde (R\$ 9.977,25), Tabira (R\$ 9.900,06), Triunfo (R\$ 9.639,82), Tuparetama (R\$ 9.582,62), Brejinho (R\$ 9.243,93), Calumbi (R\$ 9.125,74), Ingazeira (R\$ 8.914,87), Carnaíba (R\$ 8.900,39), Itapetim (R\$ 8.732,97), Quixaba (R\$ 8.485,99), Iguaracy (R\$ 8.133,91), Flores (R\$ 8.125,68), Solidão (R\$ 8.114,67), enquanto o município de Santa Terezinha é o que apresenta o menor PIB *per capita* da microrregião com R\$ 7.802,12.

2.3 Geoestatística

O professor Georges Matheron, apresentou nos anos 1960, uma série de publicações com relevantes contribuições para o estudo da formalização da Teoria das Variáveis Regionalizadas, sendo reconhecido na literatura como o criador da Geoestatística (MATHERON, 1962), (MATHERON, 1963) e (MATHERON; FRANCE, 1965).

Segundo Matheron (1971), uma variável regionalizada é uma função $f(x)$ do ponto x , mas também é uma função irregular na qual se têm dois aspectos contraditórios ou complementares: um aspecto aleatório, cuja irregularidade não permite prever as variações de um ponto a outro; e, um aspecto estruturado, que reflete as características estruturais do fenômeno regionalizado. Para Matheron, a Teoria Regionalizadas tem dois objetivos: teoricamente, descrever a correlação espacial; na prática, resolver problemas de estimativa de uma variável regionalizada com base de uma amostra.

Segundo Yamamoto e Landim (2013) os métodos geoestatísticos fornecem um

conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados, os quais apresentam, porém uma possível estruturação espacial, estabelecendo desse modo, uma função de correlação espacial. Essa função representa a base da estimativa da variabilidade espacial em Geoestatística.

A Geoestatística tem por objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Essa técnica distingue-se da estatística clássica pelo fato de considerar que os valores de uma variável estão de alguma forma relacionada à sua distribuição espacial, ou seja, observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes do que aquelas tomadas a distâncias maiores, e por levar em consideração o comportamento espacial das variáveis apresenta grande potencial de aplicação nas geociências/ciências ambientais.

Inicialmente a geoestatística foi desenvolvida para a mineração, atualmente, empregada nos mais diversos campos da ciência, dentre os quais se destacam: geologia, meio ambiente, geotecnia, hidrogeologia, petróleo, agricultura, recursos florestais, entre outros.

Magerski e Filho (2021) utilizaram técnica de geoestatística, a krigagem ordinária, para realizar o preenchimento das falhas de dados mensais de precipitação pluviométrica nas sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, apesar do modelo estável apresentar uma pequena sensibilidade ao percentual de falhas dos registros históricos. A espacialização realizada com as séries de dados de pluviosidade das sub-bacias do Baixo Rio Ivaí e Alto Rio Tibagi, gerou padrões georreferenciados dentro do esperado para os regimes pluviométricos locais, em todos os períodos avaliados, independentemente das regiões de classificação climática onde as mesmas estão inseridas no Estado do Paraná.

Em Fortes et al. (2004) a geoestatística foi aplicada com o objetivo modelar a distribuição espacial da ocorrência de ascaríase, utilizando mapas de risco mediante técnicas de geoprocessamento e análise geoestatística. Foi ajustado um modelo de semivariograma esférico isotrópico, e não se observou uma direção preferencial da distribuição dos casos de ascaríase. Com o resultado do estudo apontaram que a utilização da krigagem indicadora permitiu estimar áreas de risco com base na utilização de uma variável categórica (presença ou não de infecção).

Eneas et al. (2022) avaliam a variabilidade espacial das propriedades dendrométricas de *Eucalyptus urophyllacultivada* no Bioma Cerrado. Para tal, utilizaram 40 pontos geodésicos distribuídos em uma grade amostral regular para coletar quatro variáveis: comprimento vertical, comprimento longitudinal, diâmetro do fuste a 10 cm e diâmetro do fuste a 50 cm. E utilizam a krigagem para realizar estimativas quando o número de dados coletados é pequeno. Os resultados do encontrados no trabalho foram que todas as variáveis

analisadas apresentaram alto grau de dependência espacial e que o modelo esférico foi o melhor ajustado. Ademais, a faixa com valor semelhante para todos os atributos mostrou homogeneidade na *E. urophyllaficar*. Por último, concluem que os mapas elaborados com base nas análises geoestatísticas apresentaram resultados relevantes.

Em [Kethireddy et al. \(2014\)](#), técnicas geoestatística foram utilizadas para avaliar questões relacionadas à poluição por ozônio troposférico (O3), que é um grande problema em todo o mundo, inclusive nos Estados Unidos da América (EUA), principalmente durante os meses de verão. No leste do Texas, observações espaciais esparsas para O3 podem não fornecer uma fonte confiável de dados sobre uma região geoambiental. Para visualizar a distribuição do O3, técnicas geoestatísticas foram empregadas no *ArcMap*. Usando krigagem, as camadas geoestatísticas de O3 para todas as horas estudadas foram previstas e mapeadas em uma resolução espacial de 1 quilômetro, um ótimo nível de precisão da previsão foi alcançada e os resultados foram analisados por meio da validação cruzada.

A pesquisa de [Martins, Alves e Damasceno \(2019\)](#) se propõe a comparar e analisar a eficiência entre métodos determinísticos e geoestatísticos. De acordo com o autor, a Climatologia Geográfica tem incorporado ferramentas de geotecnologias em suas pesquisas como os métodos de interpolação e espacialização de dados, permitindo um excelente ganho de tempo e qualidade no tratamento e análise da informação. Os resultados apontaram que em áreas com baixa densidade de estações os métodos determinísticos apresentam um menor percentual de erro médio final, embora os métodos geoestatísticos forneçam dados mais exatos e com maior correlação entre os dados registrados e os dados estimados, permitindo inclusive a inserção de covariáveis como a altitude (Cokrigagem) que reduz o erro médio e aumenta a correlação entre dados registrados e estimados.

2.3.1 Variograma

Por meio do estudo geoestatístico obtêm-se a estrutura de dependência espacial dos pontos amostrados e possibilita a construção de mapas temáticos de cada atributo da área. Como ferramenta fundamental da geoestatística, o variograma permite realizar análise da estrutura e correlação espacial da variável. A função de variograma é definida como a variância do incremento $[Z(x+h) - Z(x)]$, descrita da seguinte forma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (2.1)$$

em que $Z(x)$ e $Z(x+h)$ são os pares de valores medidos separados por um vetor h

A função variograma mede a variância entre pontos separados por uma distância

h. Desse modo, para os pontos próximos, a diferença é pequena e, portanto, a variância é pequena. Ao aumentar a distância, os valores dos pontos tornam-se mais diferentes e, conseqüentemente se estabiliza em torno de uma variância máxima, a partir de certa distância. Isso significa que, mesmo com o aumento da distância a função variograma irá oscilar em torno da variância máxima, denominada em patamar Yamamoto e Landim (2013).

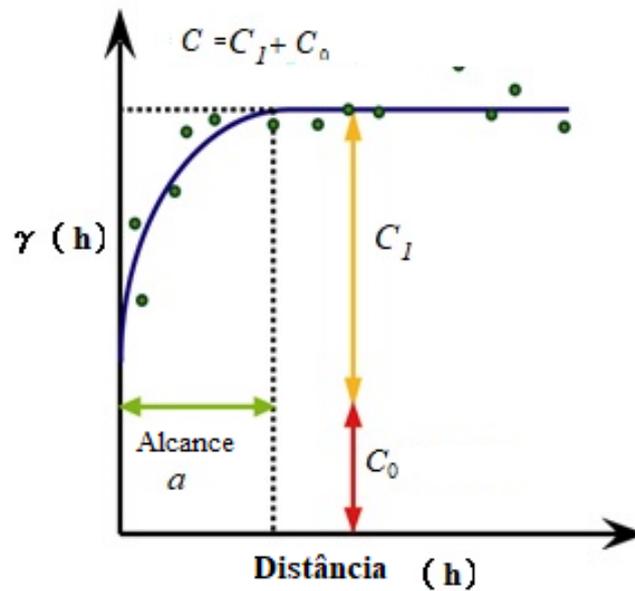


Figura 10 – Exemplo de semivariograma

Fonte: Adaptado de (CAMARGO, 1998)

em que:

- **Alcance** (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- **Patamar** (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). A partir deste ponto considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras;
- **Efeito Pepita** (C_0): representa a descontinuidade na origem do semivariograma, correspondendo à diferença entre as amostras de maior proximidade e gerada por microrregionalizações, erros de amostragens ou erros de medidas;
- **Contribuição** (C_I): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

2.4 Validação cruzada

A validação cruzada é uma técnica que permite comparar valores estimados e verdadeiro usando apenas a informação disponível no conjunto de pontos de dados (ISAACS *et al.*, 1989). O procedimento de validação do modelo de ajuste é uma etapa que tem como objetivo avaliar a adequação do modelo de semivariograma ajustado no processo que envolve a re-estimação dos valores amostrais observados, consequentemente tornando possível avaliar o erro de estimação e a qualidade do método de estimação (OLEA, 1999).

Olea (1999) descreve o algoritmo para a realização da validação cruzada da seguinte forma:

1. Selecione o estimador;
2. Defina todos os parâmetros do estimador;
3. Retire $z(x_i)$ da amostra, onde x_i é um local de amostra que não foi visitado;
4. Estime $z(x_i)$, utilizando o estimador selecionado nos Passos 1 e 2. Se o estimador for krigagem, calcule a variância da estimativa;
5. Calcule o erro da estimativa $\hat{z}(x_i) - z(x_i)$;
6. Substitua $z(x_i)$ na amostra;
7. Se houver mais locais a serem visitados, selecione um local ainda não visitado e volte para o passo 3. Caso contrário, pare.

De acordo com Olea (1999), mesmo que a validação cruzada seja imperfeita, recomenda-se a utilização desse processo como melhor alternativa para tomar decisões do que fazer suposições arbitrárias.

2.4.1 Métodos de Interpolação

Após a análise variográfica, e verificada a possibilidade de estimação por técnicas geoestatísticas, pode-se proceder a uma estimação de valores em locais não amostrados. Constitui-se essa, numa tarefa importantíssima dos estudos ambientais, principalmente no que diz respeito a espacialização e representação cartográfica de diversos fenômenos de interesse.

Os métodos de interpolação podem ser classificados em globais e locais. Os métodos

globais ajustam uma única função matemática aos pontos de dados, mas a retirada ou inserção de um único ponto de dado irá se propagar sobre o domínio de definição da função. Por outro lado, os métodos locais ajustam funções para pequenas área de estudo, até completar a totalidade da área. Os métodos globais foram utilizados, nas décadas de 1950 e 1960, pois os recursos computacionais eram precários, e, portanto, limitados para cálculos complexos e intensivos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Atualmente, diversas técnicas de interpolação espacial estão disponíveis com vários graus de complexidade. Este trabalho irá comparar a aplicabilidade de técnicas de interpolação propostas para estimar a precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú - PE. Para tal, serão considerados os seguintes métodos: *Thiessen*, *Spline*, *IDW* e krigagem.

2.4.1.1 Thiessen

O método de *Thiessen* é bastante utilizado para espacialização de dados de chuva e consiste em dar diferentes pesos aos totais precipitados, de acordo com a área que cada aparelho de amostragem abrange. Deste modo, o método assume que a precipitação em um ponto da bacia será sempre igual àquela registrada no posto pluviométrico mais próximo (HOLT, 1976).

2.4.1.2 Spline

O método de interpolação *Spline* consiste no ajuste de uma função matemática coincidente aos pontos disponíveis, de modo a minimizar a curvatura total da superfície gerada. Esse método é adequado para gerar superfícies que variam suavemente, como elevação, nível de água ou concentração de poluição (FRANCO; UDA, 2015).

Em geral, uma função *Spline* $S(x)$ deve preencher a condição de que $S(x)$ para os pontos medidos deve ser igual a $z(x)$ e ao mesmo tempo a seminorma de suavização $I(S)$ deve ser o menor possível.

$$S(x_j) = z(x_j) \quad (2.2)$$

e

$$I(S) = \min \quad (2.3)$$

em que, $z(x_j)$ são os valores das variáveis nos pontos x_j amostrados; e $I(S)$ é uma função que mede a suavização de S chamada de seminorma de suavização. Um ponto x é definido pelos valores (x_1, x_2) sendo x_1 a localização na coordenada x cartesiana e x_2 a coordenada y cartesiana (TALMI; GILAT, 1977).

2.4.1.3 Inverso da Distância Ponderada

O *Inverse Distance Weighting* - *IDW*, conhecido como Inverso da Distância Ponderada, é uma técnica utilizada com frequência e consiste em atribuir o peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo o peso na medida em que a distância aumenta em função de um coeficiente de potência (α). A sua formulação matemática pode ser descrita da seguinte forma:

$$\hat{Z}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \frac{1}{d_{ij}^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\alpha}} \quad (2.4)$$

onde \hat{Z} corresponde aos valores estimados, x representa a quantidade de amostras, x_i os valores conhecidos, d_{ij} a distância entre os pontos i e j , (CAMARGO, 1998).

Em geral, expoentes inferiores a dois, destacam anomalias locais, iguais a dois, corresponde ao inverso do quadrado da distância, o mais usado. Valores entre três e cinco, suavizam anomalias locais. Por último, os expoentes superiores a dez, em geral, geram estimativas poligonais (planas) (LANDIM, 2000).

2.4.1.4 Krigagem

Segundo Olea (1991), krigagem é o nome dado a uma coleção de técnicas de regressão que minimizam a variância da estimativa, a partir de um modelo de covariância. Dentre as diversas formas de krigagem, aquela conhecida como krigagem ordinária se tornou a mais popular e praticamente o padrão da indústria mineral, bem como em outras áreas de aplicação, como a agricultura, por exemplo. Esta técnica foi originalmente definida por Matheron (1963).

A krigagem constitui-se em um método de estimação por médias móveis e tem como característica particular, que o diferencia e o torna superior aos demais métodos de estimação, o fato de permitir o cálculo do erro associado às estimativas, chamado de variância de estimação.

Segundo Camargo (1998) a krigagem pode ser usada para:

- a. Previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico; é um procedimento de interpolação exato que leva em consideração todos os valores observados, o qual pode ser a base para cartografia automática por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área.

- b. Cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico, como por exemplo, no cálculo do teor médio de uma jazida a partir de informações obtidas de testemunhos de sondagens.
- c. Estimação do *drift*, de modo similar à análise de superfícies de tendência.

O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência (CAMARGO, 1998).

3 Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo caracterizar a precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil, bem como fornecer subsídios para as políticas públicas voltadas a escassez hídrica através do estudo e análise do espaço/tempo.

3.2 Objetivos Específicos

1. Analisar estatisticamente a precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil;
2. Analisar geoestatisticamente a precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil;
3. Modelar a precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil;
4. Comparar os métodos de interpolação;
5. Validar os modelos propostos;
6. Analisar o padrão de distribuição espacial dos postos pluviométricos situados no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil;

4 Metodologia

4.1 Dados

A chuva ou precipitação pluvial é o fenômeno alimentador da fase terrestre do ciclo hidrológico e constitui, portanto, fator importante do escoamento superficial, infiltração de água no solo, evapotranspiração, recarga de aquíferos, vazão dos rios e, conseqüentemente, disponibilidade hídrica.

O monitoramento da chuva pode ser feito por meio de pluviômetros convencionais ou automáticos. Os pluviômetros convencionais são aparelhos totalizadores que medem a altura de chuva total em um determinado período de tempo. Os pluviômetros automáticos podem ser digitais ou analógicos. Os automáticos digitais são equipamentos que registram automaticamente as variações de chuva ao longo do tempo e armazenam as informações em formato digital. Já os automáticos analógicos, também denominados de pluviógrafos, são equipamentos que registram em um gráfico as alturas de precipitações em função do tempo. Esse gráfico é denominado pluviograma. Por meio dos pluviômetros automáticos pode-se quantificar a altura pluviométrica, a duração e a intensidade de chuvas.

Segundo [Tucci \(1993\)](#) a altura pluviométrica corresponde a altura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo-se que essa água não infiltrasse, não evaporasse, nem escoasse para fora dos limites da região. A unidade de medição habitual é o milímetro de chuva, definido como a quantidade de precipitação correspondente ao volume de $1L/m^2$ de superfície

As Plataformas de Coleta de Dados (PCD's) são estações automáticas que coletam, armazenam e transmitem, via satélite, dados meteorológicos e agrometeorológicos, como: temperaturas do ar (instantâneas, máximas e mínimas); umidade relativa do ar; direção e velocidade dos ventos; radiação solar global; pressão atmosférica; precipitação pluviométrica; temperatura e umidade do solo a 10, 20 e 40 cm de profundidade.

As “Normais Climatológicas” são obtidas pelo cálculo das médias de parâmetros meteorológicos, obedecendo a critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). A Organização recomenda que a Normal Climatológica deve ter pelo menos 30 anos de observação para ter acurácia. Para esse estudo, o período de análise considerado foi entre os anos de 1993 a 2022.

A respeito da fonte dos dados, foram utilizadas informações das estações pluviométricas (automáticas e convencionais) da Agência Nacional de Águas (ANA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Por último, o tratamento e análise dos dados utilizaram-se os *softwares* R (versão 4.3.0) e QGIS (versão 3.16), com a aplicação dos pacotes e *plugins* descritos, respectivamente, nos Anexos A e B.

4.2 Preenchimento de Falhas

Em séries históricas climatológicas a ausência de dados diários, mensais ou anuais é um problema recorrente. Estudos como [Giovannella et al. \(2021\)](#), aponta que as principais causas são ausência do observador; falhas nos aparelhos que registram os dados; perdas nas anotações ou transcrições dos dados pelo observador; encerramento das atividades. O pesquisador pode optar em trabalhar com a série incompleta, dependendo da análise que pretende realizar; ou aplicar alguma técnica para suprir as falhas o que é mais usual.

Métodos para preencher falhas podem contribuir na compreensão da variação climática e na previsão de fenômenos que venham a se repetir por influência do clima. O preenchimento de falhas é necessário para aproveitar séries longas de precipitação, evitando que as mesmas sejam descartadas ([COSTA; BECKER; BRITO, 2013](#)).

Entre os métodos para o preenchimento de falhas destacam-se a ponderação a partir de Regressão Linear Múltipla (RLM), em que a precipitação no posto com falhas é correlacionada estatisticamente com a precipitação de postos vizinhos. Para a Regressão Linear Múltipla, as informações pluviométricas do posto Y são correlacionadas com as observações correspondentes de vários postos vizinhos, por meio de uma equação linear:

$$Y = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \dots + \beta_i.X_i + \epsilon \quad (4.1)$$

em que Y representa a variável dependente, nesse caso a precipitação estimada; X_1, \dots , são as variáveis independentes, nesse caso os postos considerados; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i$ são os coeficientes da regressão; e ϵ indica o erro residual.

4.3 Área de estudo

O estado de Pernambuco está subdividido em cinco mesorregiões e dezenove microrregiões (IBGE, 2017). A área de estudo faz parte da mesorregião do Sertão e corresponde ao grupo de municípios da microrregião do Pajeú Pernambucano com uma área aproximada de 8.770 km² e corresponde a 8,95% do território Pernambucano ([IBGE, 2021a](#))

A microrregião do Pajeú faz fronteira com as microrregiões do Sertão do Moxotó, Itaparica e Salgueiro, de Pernambuco e o estado da Paraíba (Figura 18). De acordo com o (IBGE, 2021b), a população corresponde a 333.724 habitantes e representa 3,47% da população do Estado.

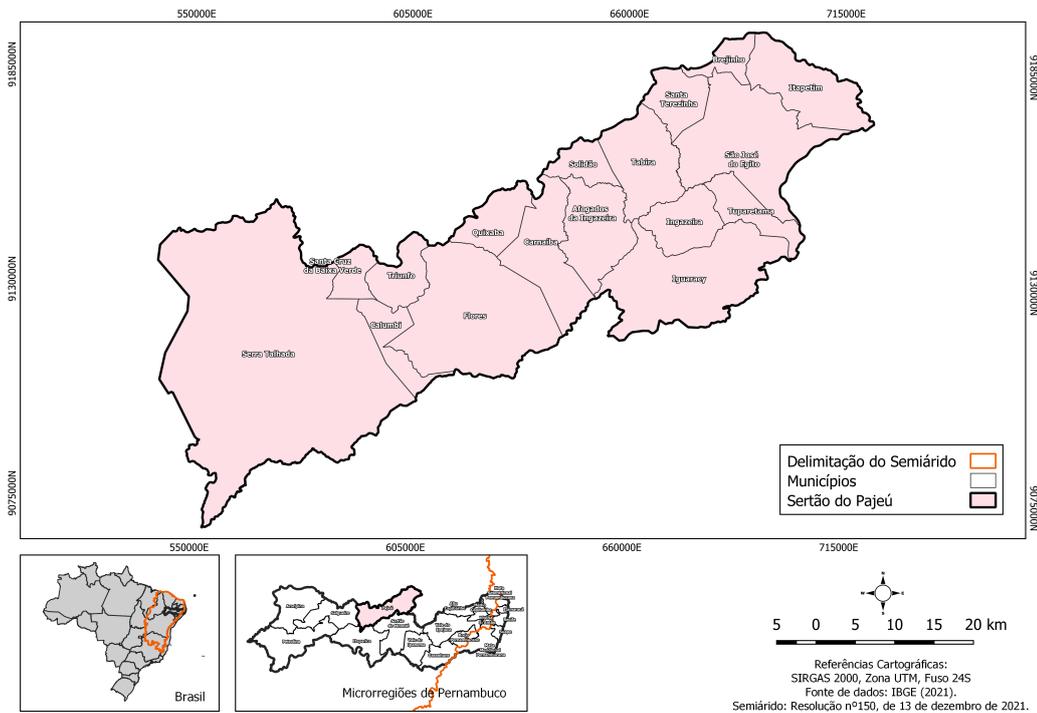


Figura 11 – Localização geográfica da área de estudo e os municípios pertencentes à microrregião do Pajeú - Pernambuco

Fonte: Elaboração própria.

Nesse sentido, os municípios que compõem o Sertão do Pajeú são apresentados na Tabela 1, ao passo que os municípios do entorno da microrregião são apresentados na Tabela 2, com as respectivas coordenadas geográficas.

Tabela 1 – Relação dos locais selecionados e suas coordenadas geográficas dos municípios pertencentes à microrregião do Pajeú, para a série histórica de janeiro de 1993 a dezembro de 2022.

Município	Latitude	Longitude
Afogados da Ingazeira	-7,74295	-37,6252
Brejinho	-7,34566	-37,2897
Carnaíba	-7,79430	-37,7913
Flores	-8,04636	-37,8329
Iguaracy	-7,84256	-37,5415
Ingazeira	-7,69161	-37,4894
Itapetim	-7,37536	-37,1902
Quixaba	-7,71775	-37,8494
Santa Cruz da Baixa Verde	-7,88839	-38,197
São José do Egito	-7,50761	-37,2749
Serra Talhada	-7,99341	-38,2938
Triunfo	-7,83051	-38,1056
Tuparetama	-7,63308	-37,3279

Tabela 2 – Relação dos locais selecionados e suas coordenadas geográficas dos municípios do entorno da microrregião do Pajeú, para a série histórica de janeiro de 1993 a dezembro de 2022

Município	Latitude	Longitude
Betânia	-8,18227	-37,9812
Custódia	-8,07769	-37,6526
Floresta	-8,59800	-38,5810
Mirandiba	-8,09200	-38,7060
Monteiro	-7,88538	-37,1267
São José do Belmonte	-7,83268	-38,7642
Sertania	-8,42957	-37,4096

Como critérios para escolha dos postos, adotou-se a disponibilidade de dados para a normal climatológica estudada (1993-2022) e simultaneamente apresentassem menor números de falhas em relações aos demais municípios da microrregião e entorno. A Figura 12, apresenta a distribuição espacial dos postos pluviométricos utilizados nas análises.

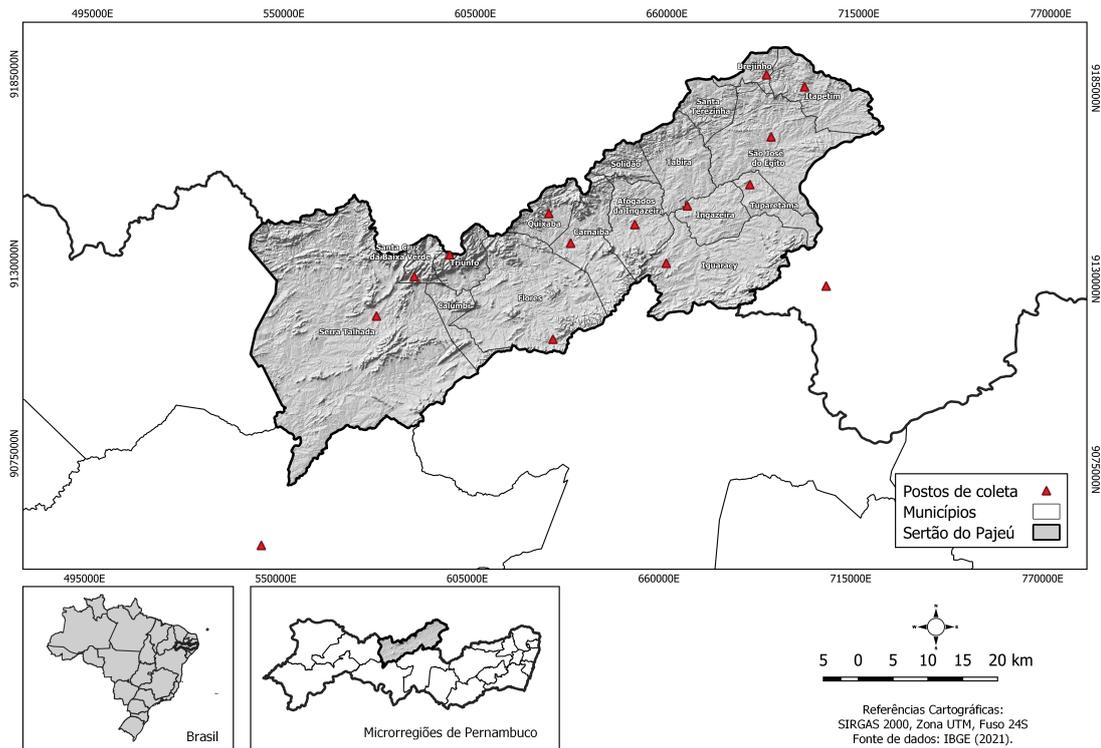


Figura 12 – Localização geográfica dos postos pluviométricos utilizados na análise - Pernambuco - Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Análise Estatística

A análise descritiva dos dados, considerou medidas estatística (de posição e dispersão) e análise gráfica do comportamento mensal. Complementarmente, observou-se características da série temporal quanto à consistência, rupturas e a tendência.

4.4.1 Teste de Consistência

A consistência dos dados dentro de uma visão regional é necessária com intuito de comprovar a homogeneidade dos dados disponíveis num posto com relação às observações registradas em postos vizinhos. Para tal, após o preenchimento das falhas, foi realizada a análise da consistência, através de um método chamado Dupla Massa, desenvolvimento pelo *Geological Survey* (USA), nessa metodologia são empregados dados da estação de interesse que se deseja avaliar e as estações vizinhas (TUCCI, 1993).

Segundo Tucci (1993), o método consiste em selecionar postos de uma região, considerar os dados mensais, e plotar num gráfico cartesiano os valores acumulados

correspondentes ao posto a consistir (nas ordenadas) e de um outro posto confiável adotado como base de comparação (nas abscissas). Há ainda nessa técnica, a possibilidade de aprimoramento, que consiste em obter-se os valores médios das precipitações mensais acumuladas em vários postos da região. Caso os valores dos postos estejam alinhadas em um única reta, corresponde à característica desejável quanto a consistência dos dados.

Segundo [Tucci \(1993\)](#), é possível que os postos não se alinhem segundo uma única reta podendo apresentar as seguintes situações:

1. **Mudança de declividade determinando duas ou mais retas** - Representa um exemplo típico derivado de erros sistemáticos, mudanças nas condições de observação ou a existência de uma causa física real, como alterações climáticas no local provocadas pela presença de reservatórios artificiais. Para se considerar a existência de mudança de declividade, é prática comum exigir a ocorrência de pelo menos cinco pontos sucessivos alinhados segundo a nova tendência;
2. **Alinhamento dos postos em retas paralelas** - Ocorre quando existem erros de transcrição de um ou mais dados ou pela presença de anos extremos em uma ou duas séries plotadas. A ocorrência de alinhamentos, segundo duas ou mais retas aproximadamente horizontais (ou verticais), pode ser evidência da comparação de postos com diferentes regimes pluviométricos;
3. **Distribuição errática dos pontos em retas paralelas** - Em geral, é resultante da comparação de postos com diferentes regimes pluviométricos, sendo incorreta toda a associação que se deseje fazer entre os dados dos postos plotados.

Na presente pesquisa, adotou-se como referência (eixo das abscissas) a média acumulada das estações que tiveram menor valor médio do erro acumulado ao longo do preenchimento de falhas dos dados pelo método da Regressão Linear Múltipla. Ademais, os postos utilizados nas análises posteriores, foram os que obtiveram resultados satisfatórios quanto à consistência dos dados.

4.4.2 Teste de Tendência

A tendência da série foi realizada através do teste não-paramétrico de Mann-Kendall ([SNEYERS, 1975](#)). O teste considera a hipótese de estabilidade de uma série temporal cuja sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples) ([PINHEIRO; GRACIANO; SEVERO, 2013](#)). A estatística de teste é dada por:

$$t_n = \sum_{i=1}^N m_i \quad (4.2)$$

em que, t_n corresponde ao somatório, m_i representa o número de termos da série em relação a Y_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo tempo ($Y_j < Y_i$). Para séries com grande número de termos (N), sob a hipótese nula de ausências de tendências (H_0), t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância dada por:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{N} \quad (4.3)$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (4.4)$$

Testando a significância estatística de t_n para hipótese nula, usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores $U(t_n)$, fornecida pela equação:

$$U(t_n) = \frac{(t_n - E(t_n))}{(Var(t_n))^{\frac{1}{2}}} \quad (4.5)$$

4.4.3 Teste de Rupturas

Como complemento para o teste de tendências de Mann-Kendall, encontra-se na literatura o teste de ruptura de Pettitt (PETTITT, 1979). O teste de Pettitt, é considerado também um teste não-paramétrico, que utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney, onde se verifica se duas amostras Y_1, \dots, Y_T e Y_{t+1}, \dots, Y_T pertencem à mesma população. Esta estatística considera todos os valores $t = 2, \dots, T$ e avalia a existência ou não de ponto de mudança brusca nas médias da série histórica. Para realização da estatística de teste, considera-se inicialmente $D_{ij} = sinal(Y_i - Y_j)$, onde

$$sinal(Y) = \begin{cases} 1, & \text{se } y > 0, \\ 0, & \text{se } y = 0, \\ -1, & \text{se } y < 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

O D_{ij} deve ser calculado sobre todos os possíveis pares de amostras e adiciona-se os resultados obtidos, construindo uma única estatística de interesse:

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij} \quad (4.7)$$

Para o caso bilateral (mudança nos dois sentidos da H_1), a estatística de teste é definida por:

$$K_t = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}|.$$

Nesse caso, as hipóteses associadas consistem em testar:

H_0 : não há nenhuma mudança na série

H_1 : existe alguma mudança na série.

A decisão sobre a rejeição ou não rejeição da hipótese nula pode ser realizada comparando o p -valor obtido no teste com o nível de significância (α) adotado, ou seja, a hipótese nula será rejeitada quando o p -valor for inferior ao nível de significância. Na presente pesquisa, considerou-se α de 5%.

Segundo Pettitt (1979), para dados contínuos, $U_{t,T}$ pode ser encontrado através da soma entre $U_{t-1,T}$ e $V_{t,T}$, para $t = 1, 2, \dots, T$, onde $V_{t,T} = \sum_{j=1}^T \text{sign}(Y_t - Y_j)$. Sendo assim, a probabilidade de significância (p -valor) de k^+ (ou k^-) associado a K_T^+ (ou K_T^-), para a hipótese bilateral é dada por:

$$p = 2 \exp \left\{ \frac{-6(k^+)^2}{(T^3 - T^2)} \right\}. \quad (4.8)$$

O teste de ruptura foi realizado utilizando o pacote **Trend** do *software* R, conforme descrito no Anexo A.

4.5 Técnica dos Quantis

Na literatura, há estudos que demonstram a relevância da análise da precipitação pluviométrica no território, bem como utilizam técnicas estatísticas para descrever o fenômeno. Em Holanda, Medeiros e França (2021), o objeto principal foi identificar a variabilidade pluvial e suas oscilações espaço temporal através da técnica de quantis, gerar os balanços hídricos climatológicos para diferentes regimes pluviométricos. Nesse estudo, foi possível concluir que as técnicas dos quantis foram essenciais para demonstrar as flutuações pluviais e suas irregularidades nos períodos: seco; muito seco para a área

estudada mostrando também que a avicultura deverá ter planos emergências para o armazenamento de água.

A técnica dos quantis a ser utilizada, considera a proposta de [Xavier e Xavier \(1987\)](#), por meio dela é possível avaliar a acontecimento de períodos secos ou chuvosos de um total pluviométrico em relação a um banco de dados. Os intervalo percentuais de cada quantil, delimitados nos percentis representam as frequências de ocorrência dos eventos pluviométricos extremos de chuva.

No presente trabalho, os quantis utilizados para caracterização climática da precipitação foram definidos, conforme categorias apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos Quantis

Categoria	Probabilidade
Muito Seco (MS)	$p(x) < Q_{0,15}$
Seco (S)	$Q_{0,15} \leq p(x) < Q_{0,35}$
Normal (N)	$Q_{0,35} \leq p(x) < Q_{0,65}$
Chuvoso (C)	$Q_{0,65} \leq p(x) < Q_{0,85}$
Muito Chuvoso (MC)	$p(x) \geq Q_{0,85}$

O quantil (Q_p), para cada número p entre 0 e 1, é o valor de precipitação satisfatório à condição probabilidade ($x \leq Q_p = p$). Para cada valor observado x_0 da chuva, o número ($0 < p_0 < 1$) tal que $f(x_0)$, diz-se de ordem quantil p_0 , associada a x_0 .

4.6 Geoestatística

A Geoestatística foi utilizada com a finalidade de realizar a caracterização espacial da precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú, tendo em vista que há alguma dependência espacial na variável estudada. A dependência espacial foi verificada pelo índice de Moran global, que varia entre -1 e +1 e fornece sua significância estatística. A análise geoestatística considerou a realização do estudo do semivariograma dos dados coletados e ajuste dos principais modelos experimentais descritos a seguir.

4.6.1 Modelos Experimentais

4.6.1.1 Modelo Esférico

O mais facilmente encontrado nas aplicações da geoestatística apresenta como característica o fato de que a tangente na origem da curva atinge o patamar a uma distância correspondente a $2/3$ da amplitude (α).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0, \\ C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{\alpha} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\alpha} \right)^3 \right], & \text{se } 0 < h \leq \alpha, \\ C_0 + C_1, & \text{se } h > \alpha. \end{cases} \quad (4.9)$$

4.6.1.2 Modelo Exponencial

Outro modelo de transição comumente encontrado tem como característica o fato de que o “range” é atingido quando o valor do semivariograma alcança apenas assintoticamente, 95% do valor do patamar.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0, \\ C_0 + C_1(1 - e^{-\frac{h}{\alpha}}), & \text{se } 0 < h < \infty. \end{cases} \quad (4.10)$$

4.6.1.3 Modelo Gaussiano

Este modelo tem bastante semelhança com o exponencial, principalmente no que se refere a forma como atinge o patamar e larga amplitude variográfica. Difere quanto a seu comportamento parabólico na origem.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h = 0, \\ C_0 + C_1(1 - e^{-(\frac{h}{\alpha})^2}), & \text{se } 0 < h < \infty. \end{cases} \quad (4.11)$$

A Figura 13, apresenta o modelo teórico dos modelos experimentais implementados.

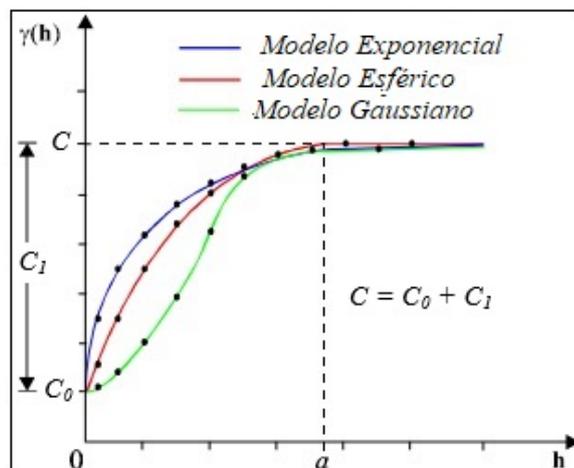


Figura 13 – Representação gráfica dos semivariogramas experimentais e os modelos teóricos

Após a análise variográfica, e verificada a possibilidade de estimação por técnicas geoestatísticas, procedeu-se a estimação de valores em locais não amostrados. Constitui-se essa, numa tarefa importantíssima dos estudos ambientais, principalmente no que diz respeito a espacialização e representação cartográfica de diversos fenômenos de interesse.

4.6.2 Interpolação Espacial

Após ajuste dos modelos, procedeu-se com técnicas de interpolação afim de inferir os dados para a área de pesquisa. Dentre as técnicas de interpolação, a primeira utilizada foi a Triangulação de Delauny utiliza pontos de amostragem para criar uma superfície formada por triângulos com base em informações do ponto de vizinho mais próximo, sendo representado pelo diagrama de Voronoi. As células de Voronoi que também são conhecidas como polígonos de *Thiessen*.

No segundo momento, aplicou-se a interpolação IDW, que consiste em atribuir pesos ponderados aos pontos amostrais, de modo que a influência de um ponto sobre outro diminui com a distância do novo ponto a ser estimado. Para tal, foram realizadas interpolações do IDW, variando o peso de 1 a 6.

A última estratégia de interpolação foi o uso da krigagem, que corresponde a um método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas. Nas variáveis regionalizadas deve existir uma certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido. Ao ser constatado que a variável não possui continuidade espacial na área estudada, não há sentido lógico em estimar/interpolar usando-se a krigagem.

4.6.3 Avaliação de desempenho das interpolações

As medidas de erro são importantes para avaliar a acurácia dos métodos de interpolação espacial. Dentre as diversas medidas apresentadas na literatura, para esse trabalho, pretende-se utilizar o erro absoluto médio, erro quadrático médio e a raiz do erro quadrático médio, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Medidas de desempenho dos métodos de interpolação espacial.

Medida	Notação	Expressão
Erro Absoluto Médio	EAM	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i) $
Erro Quadrático Médio	EQM	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]^2$
Raiz do Erro Quadrático Médio	REQM	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]^2}$

onde N é o número de observações ou de postos amostrais; $F(x_i, y_i)$ corresponde ao valor observado da coordenada (x_i, y_i) ; $\hat{F}(x_i, y_i)$ é o valor interpolado ou estimado na coordenada (x_i, y_i) ; $\bar{F}(x_i, y_i)$ representa a média dos valores observados ou dos postos amostrais. Em geral, quanto menor as medidas de erro elencadas, melhor a acurácia do modelo ajustado.

5 Resultados e Discussões

Este capítulo está estruturado em quatro seções: Seção 5.1, apresenta o tratamento inicial da base de dados, bem como o conjunto de postos pluviométricos considerados na pesquisa. Seção 5.2, apresenta os resultados das estatísticas descritivas da série em estudo. Seção 5.3, apresenta os resultados obtidos no processo da técnica dos quantis. Já a Seção 5.4, os resultados da análise espacial, bem como os modelos geoestatísticos implementados. Por último, a Seção 5.5 são comparadas a acurácia da interpolação dos modelos implementados.

5.1 Tratamento dos dados

A ocorrência de falhas em leituras de variáveis meteorológicas em estações de superfície pode comprometer a consistência das séries históricas, inviabilizando ou prejudicando sua utilização. Neste sentido, a etapa inicial do trabalho consistiu em identificar e realizar o preenchimento de falhas nas séries históricas.

A princípio, foi possível identificar nas instituições responsáveis 49 postos pluviométricos pertencentes ao Sertão do Pajeú e 5 na região do entorno, durante o período analisado, a lista completa encontra-se no Apêndice A. No entanto, a adequabilidade quanto à quantidade de informações disponíveis foram previamente analisadas.

A Figura 14 apresenta o comportamento dos postos pluviométricos e o percentual de informações constantes ao longo dos 360 meses analisados. As áreas em branco, representam falta de informação daquele posto no referido ano, ou seja, correspondem aos *missing* do conjunto de dados. É possível identificar que poucos postos pluviométricos, contém informações completas ao longo de todo o período estudado, em sua maioria há lacunas em algum período do tempo.

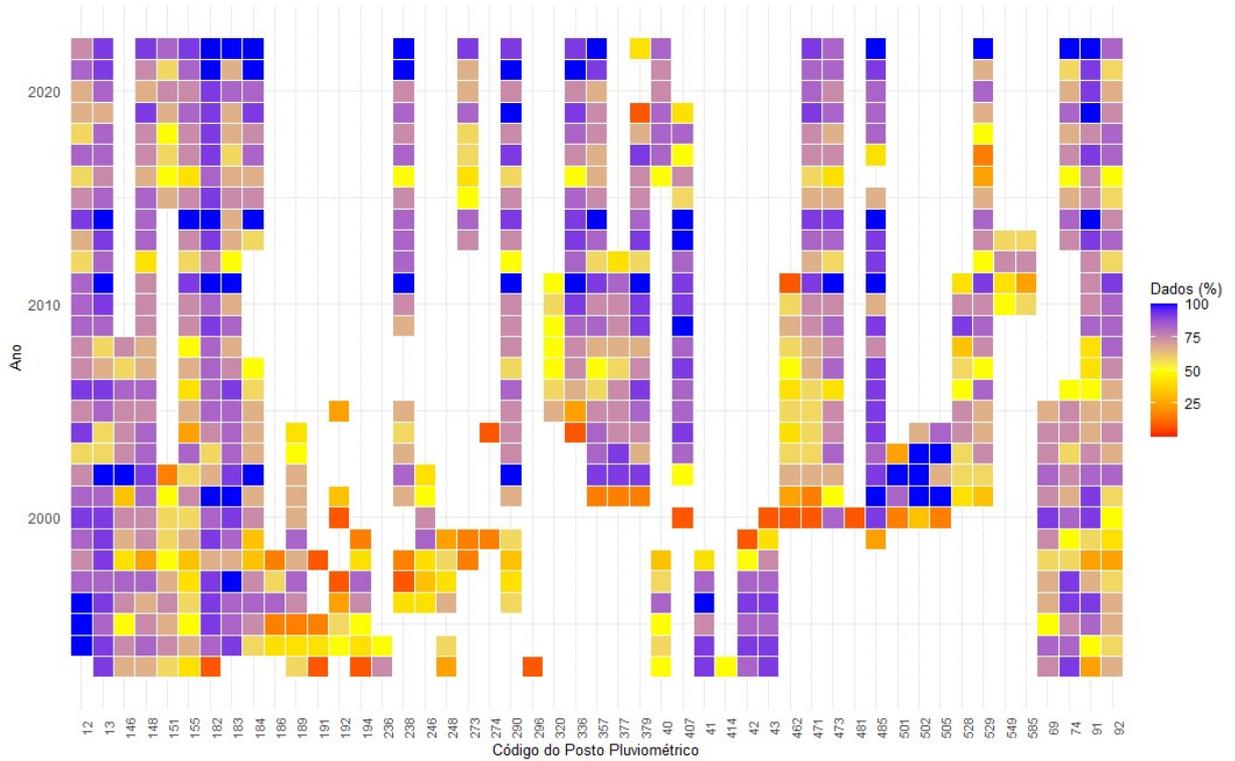


Figura 14 – Percentual de informação dos postos pluviométricos da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.

Tendo em vista que o excesso de *missing* podem comprometer as análises, foram considerados postos viáveis para as análises aqueles com percentual de pelo menos 40% de informação durante o período dos 30 anos em estudo, sendo assim a Tabela 5 apresenta os postos pluviométricos que foram considerados. Importante ressaltar, que as falhas apresentadas em cada posto foram preenchidas, pelo método da regressão múltipla.

Tabela 5 – Relação dos postos pluviométricos segundo a quantidade total e percentual das informações disponíveis no período de janeiro/1993 a dezembro/2022.

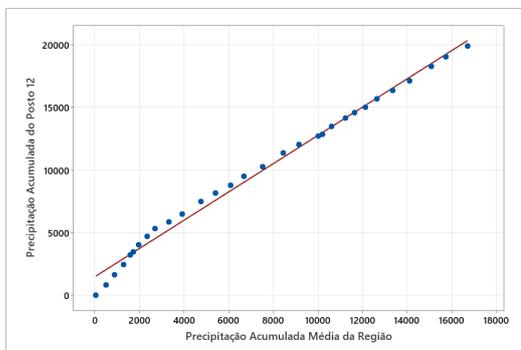
Código	Instituição	UF	Nome	Total	Percentual
12	APAC	PE	Serra Talhada (IPA)	275	76%
92	APAC	PE	São José do Egito (Faz. Muquén)	245	68%
148	APAC	PE	Iguaracy	269	75%
155	APAC	PE	Itapetim	235	65%
182	APAC	PE	Triunfo	303	84%
183	APAC	PE	Flores	275	76%
184	APAC	PE	Carnaíba	209	58%
238	APAC	PE	Quixabá	185	51%
290	APAC	PE	Afogados da Ingazeira	232	64%
336	APAC	PE	Santa Cruz da Baixa Verde	173	48%
473	APAC	PE	Brejinho	204	57%
528	APAC	PE	Ingazeira (Sítio Macambira)	179	49%
529	APAC	PE	Tuparetama (Fazenda Riacho)	173	48%
A334	INMET	PB	Monteiro	154	43%
82792	INMET	PB	Monteiro	335	93%
A351	INMET	PB	Floresta	151	42%

A Tabela 6 apresenta os resultados dos métodos ajustados. Os modelos ajustaram-se bem aos dados com valores de coeficiente de variação entre 60,66%, para o modelo do Posto 529 (mês de novembro) e 98,88% no modelo referente ao Posto 528 (mês de novembro).

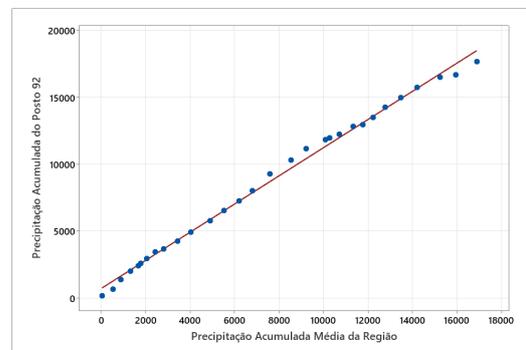
Tabela 6 – Modelos de regressão ajustados para preenchimento de falhas dos postos pluviométricos

Posto (i)	Mês (j)	Modelo ajustado	R^2
12	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 6,19 - 0,77Posto_{A351} + 0,017Posto_{336}$	64,61%
155	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 0,144 + 0,3949Posto_{92} + 0,5917Posto_{473}$	97,19%
155	Outubro	$\hat{y}_{i,j} = 2,09 + 0,115Posto_{92} + 1,052Posto_{473}$	93,89%
155	Novembro	$\hat{y}_{i,j} = 0,84 + 1,036Posto_{92} - 0,234Posto_{473}$	95,05%
184	Agosto	$\hat{y}_{i,j} = 1,02 + 0,1961Posto_{148} + 0,2320Posto_{238}$	69,21%
238	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 10,581 - 0,0402Posto_{182} - 0,2403Posto_{184}$	63,05%
238	Outubro	$\hat{y}_{i,j} = 5,47 - 0,385Posto_{182} + 1,728Posto_{184}$	80,73%
290	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 7,33 - 0,683Posto_{148} + 0,866Posto_{184}$	68,16%
336	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = -2,42 + 0,302Posto_{12} + 0,5469Posto_{182}$	93,58%
473	Outubro	$\hat{y}_{i,j} = 3,67 + 0,237Posto_{92} + 0,612Posto_{155}$	93,97%
528	Janeiro	$\hat{y}_{i,j} = 7,37 - 0,1715Posto_{184} + 1,2911Posto_{148}$	96,85%
528	Abril	$\hat{y}_{i,j} = 65,87 + 0,6221Posto_{184} + 0,2722Posto_{529}$	88,33%
528	Junho	$\hat{y}_{i,j} = -0,10 + 0,7770Posto_{92} - 0,0125Posto_{529}$	97,62%
528	Julho	$\hat{y}_{i,j} = 15,09 - 0,105Posto_{148} + 0,479Posto_{184}$	68,78%
528	Agosto	$\hat{y}_{i,j} = -1,102 + 0,2368Posto_{92} + 0,7397Posto_{148}$	96,93%
528	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 3,96 + 0,5679Posto_{92} + 0,314Posto_{148}$	94,22%
528	Outubro	$\hat{y}_{i,j} = 4,71 + 0,488Posto_{184} + 0,587Posto_{148}$	71,42%
528	Novembro	$\hat{y}_{i,j} = -0,36 + 0,4815Posto_{184} + 0,5126Posto_{148}$	98,88%
528	Dezembro	$\hat{y}_{i,j} = 5,30 + 0,2450Posto_{148} + 1,0358Posto_{529}$	96,84%
529	Setembro	$\hat{y}_{i,j} = 0,39 + 0,431Posto_{92} + 0,449Posto_{290}$	69,07%
529	Outubro	$\hat{y}_{i,j} = -1,05 + 0,140Posto_{92} + 0,785Posto_{290}$	95,68%
529	Novembro	$\hat{y}_{i,j} = 13,90 + 0,960Posto_{92} - 0,064Posto_{290}$	60,66%

Após o preenchimento dos dados faltantes, a consistência dos dados foi verificada pelo método de dupla massa. Todos os postos mostraram consistência conforme pode ser visto nas Figuras 15, 16 e 17.

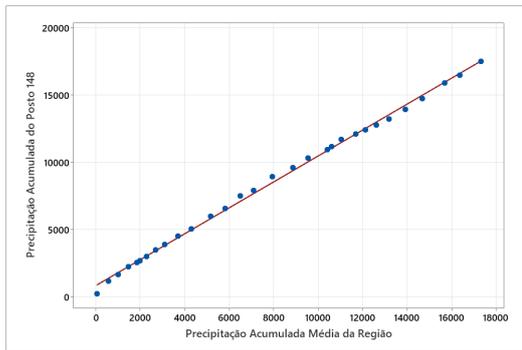


(a) Posto 12

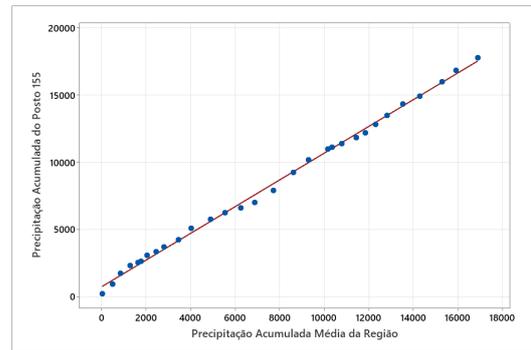


(b) Posto 92

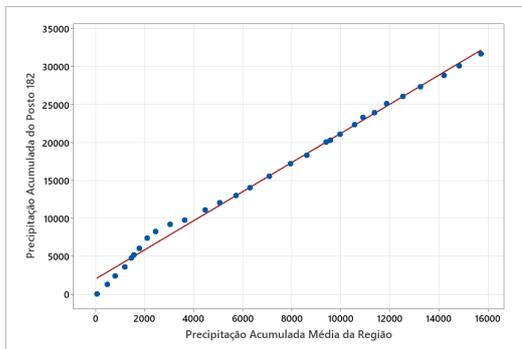
Figura 15 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (12 e 92) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.



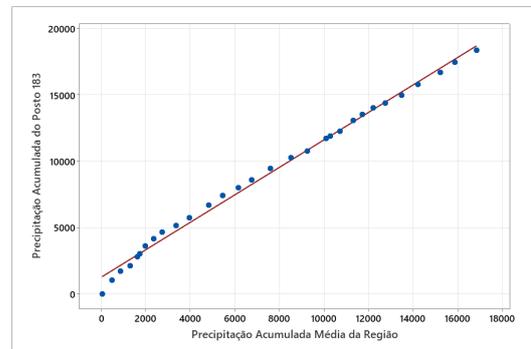
(a) Posto 148



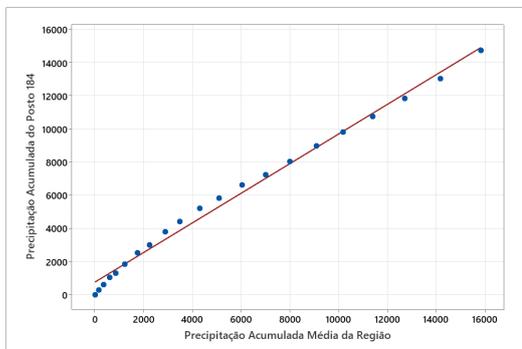
(b) Posto 155



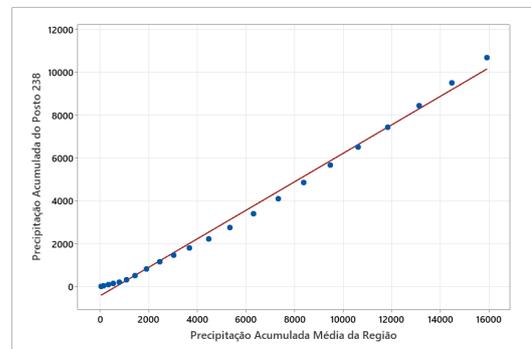
(c) Posto 182



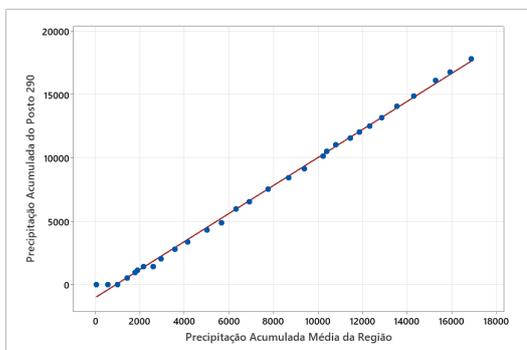
(d) Posto 183



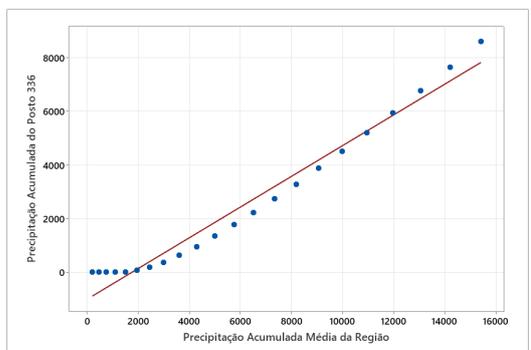
(e) Posto 184



(f) Posto 238



(g) Posto 12



(h) Posto 92

Figura 16 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (148, 155, 182, 183, 184, 238, 290 e 336) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.

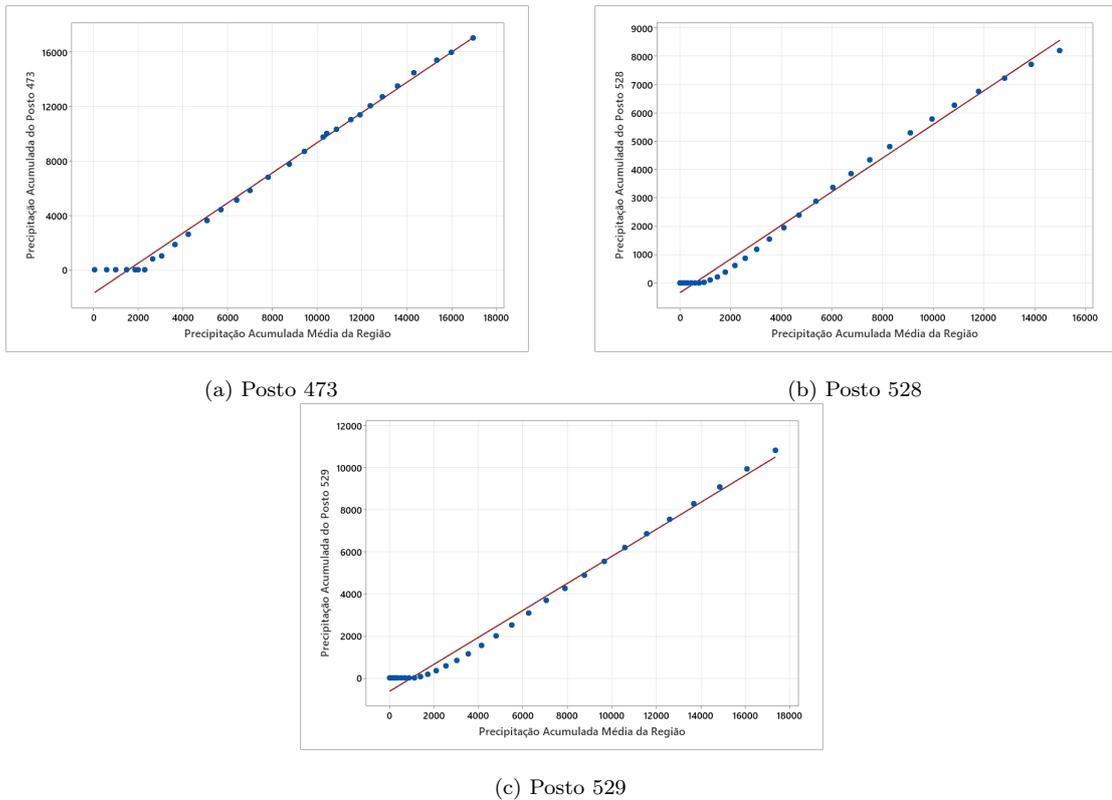


Figura 17 – Resultados do teste de consistência da precipitação média mensal dos postos (473,528 e 529) da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.

5.2 Estatística Descritiva

Após o tratamento inicial dos dados faltantes durante o período estudado, procedeu-se com a caracterização estatística do fenômeno. Tendo em vista, a importância do conhecimento do comportamento histórico das precipitações para poder monitorar os impactos advindos de um prolongado excesso (ou falta) de chuvas, foi realizada análise descritiva da precipitação pluviométrica na região.

A estatística descritiva se propõe a caracterizar séries de valores da mesma natureza, permitindo dessa forma que se tenha visão global da variação desses valores, com vistas a subsidiar a favorecer a integração de conhecimentos da pesquisa e a construção de modelos.

A série temporal da precipitação pluviométrica média anual do sertão do Pajeú, durante os anos de 1993 a 2022, teve como normal climatológica $80,62 \text{ mm}$ no período. Os anos de 1993, 1998 e 2012, foram os que apresentaram menores precipitação pluviométrica, Figura 18.

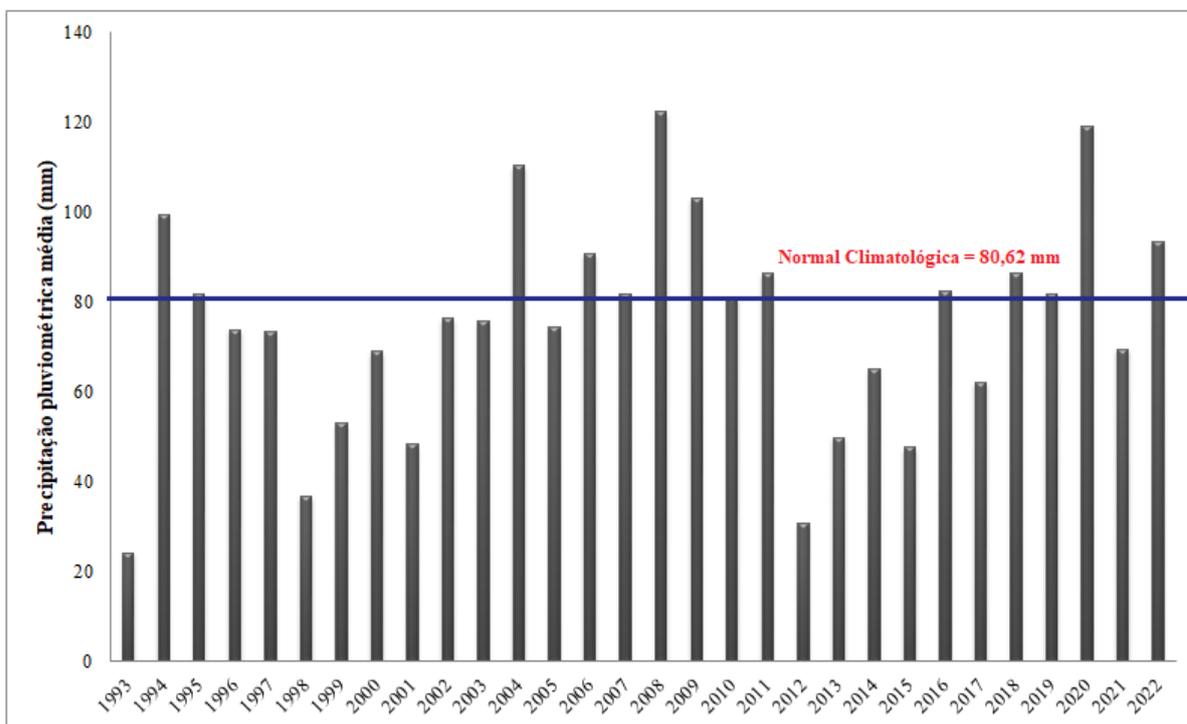


Figura 18 – Precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - BR - 1993 a 2022.

O comportamento mensal da precipitação pluviométrica da microrregião do Pajeú é apresentado na Figura 19. Tem-se que os períodos chuvosos ocorrem com entre os meses de janeiro a maio.

Tal resultado, converge com as informações apresentadas recentemente pela APAC (2022), onde informa o acumulado de chuva no Sertão, até o mês de junho, em que ocorre baixa precipitação, uma vez que a região está fora do seu período de maior ocorrência de chuva.

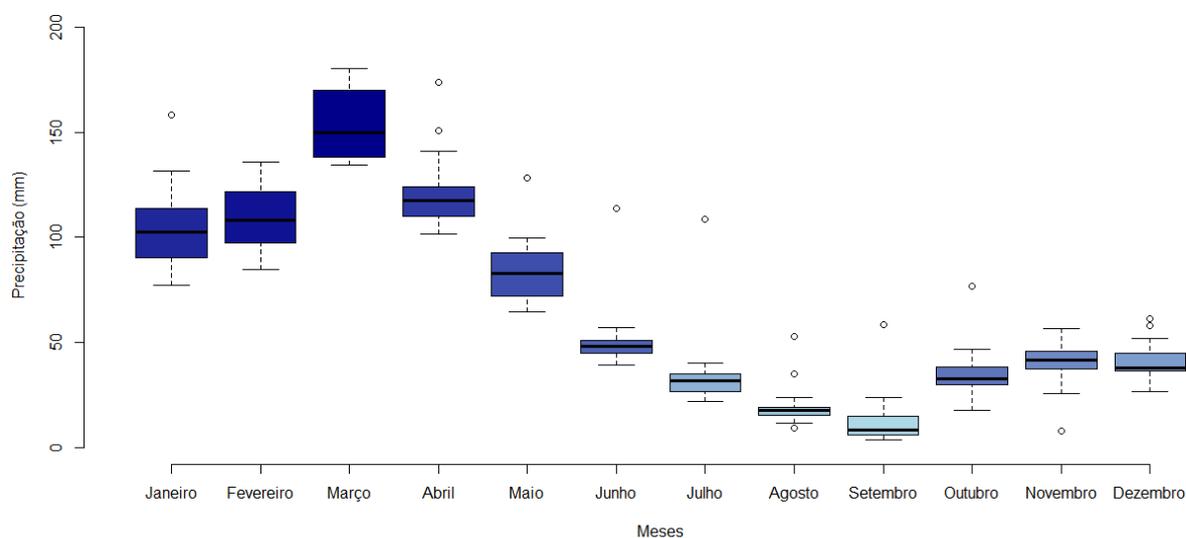


Figura 19 – Box-plot da precipitação pluviométrica média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.

A Tabela 7, apresenta as principais medidas descritivas acerca da precipitação pluviométrica do Sertão do Pajeú.

Tabela 7 – Estatísticas descritivas da precipitação pluviométrica (*mm*) mensal no Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil, durante o período de 1993 a 2022.

Meses	Estatísticas					
	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo
Janeiro	77,21	90,10	102,67	104,58	113,84	158,59
Fevereiro	84,93	97,21	108,37	110,03	122,00	136,07
Março	134,30	138,20	150,10	154,10	170,30	180,30
Abril	101,60	110,00	117,80	123,20	124,10	173,90
Maiο	64,40	71,81	82,87	84,09	92,50	128,33
Junho	39,23	44,79	48,32	52,55	50,70	113,75
Julho	21,95	26,49	31,46	36,86	34,91	108,85
Agosto	9,14	15,34	17,39	20,38	18,93	52,77
Setembro	3,41	5,94	8,40	13,58	15,02	58,20
Outubro	17,61	29,69	32,56	35,62	38,03	76,70
Novembro	7,77	37,22	41,69	39,46	45,65	56,55
Dezembro	26,47	36,45	37,97	41,39	44,73	61,03

Com relação à tendência da série temporal do Sertão do Pajeú, foi realizado o Teste de Mann-Kendal da precipitação média mensal e anual, durante o período de 1993 a

2022. Os resultados apontam que não foi possível rejeitar a hipótese nula ao nível de significância de 5%. Ou seja, não há indícios para rejeitar a hipótese do comportamento de estabilidade da série temporal e que a distribuição de probabilidade deve permanecer constante, Tabela 8.

Resultado similar foi encontrado no estudo elaborado por [Silva, Montenegro e Souza \(2017\)](#), cujo objetivo foi analisar as tendências climáticas de índices de precipitação pluviométrica nas principais bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. Os autores encontraram que a bacia do rio Pajeú (UP 09) não apresentou tendências significativas, e na bacia do rio Terra Nova (UP 10) foram observadas tendências de diminuição de chuvas moderadas.

Tabela 8 – Testes de Mann-Kendall aplicados às séries das médias mensais e anuais da precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil, para o 1993 a 2022.

Série	Estatística	<i>p-valor</i>
Janeiro	1,5252	0,1272
Fevereiro	0,3054	0,7603
Março	1,2812	0,2001
Abril	0,7931	0,4277
Março	1,1592	0,2464
Junho	0,6711	0,5022
Julho	-0,0610	0,9514
Agosto	1,0372	0,2997
Setembro	0,4271	0,6693
Outubro	1,7693	0,0769
Novembro	0,1830	0,8548
Dezembro	-0,9151	0,3601
Anual	1,2132	0,2251

Analisando o resultado apresentado pelo Teste de Pettitt para a média da precipitação pluviométrica anual, conclui-se que a ruptura ocorrida no ponto 9, que corresponde ao ano de 2001, não foi estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%. Graficamente é possível observar o comportamento da precipitação média anual do Sertão do Pajeú, Figura 20.

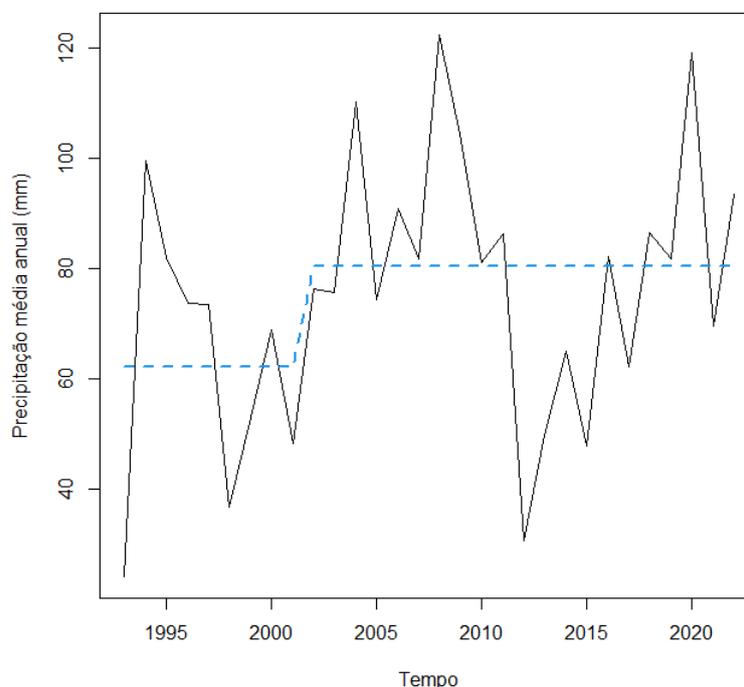


Figura 20 – Resultado do teste de ruptura de Pettitt da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - Brasil - 1993 a 2022.

Campos e Chaves (2020) utilizou o teste de Pettitt e os resultados indicaram que 13 das 125 séries temporais individuais do Cerrado analisadas apresentaram rupturas significativas ao longo do período de estudado (1977 - 2010). Dentre essas, 12 tiveram tendências de redução da precipitação depois da ruptura, e somente uma apresentou aumento da precipitação após a quebra. A série representando a média anual da precipitação no Cerrado não apresentou ruptura significativa. De acordo com os autores, as rupturas significativas nas séries ocorreram entre 1983 e 1998, sendo este último o ano com maior número de rupturas significativas observadas. Essas rupturas estão possivelmente associadas a fenômenos naturais ou a interferências nos registros dos dados pluviométricos. No entanto, como não foram encontradas inconsistências nos dados de precipitação, a primeira hipótese foi considerada a mais plausível.

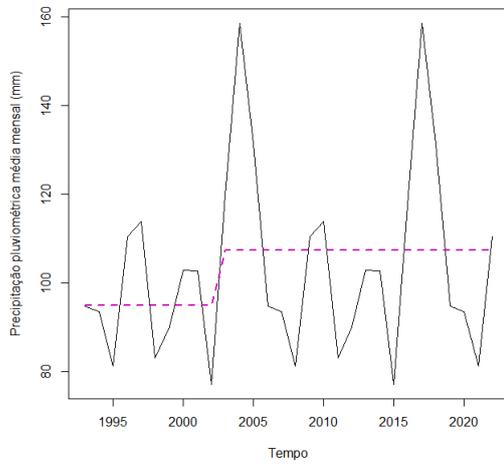
De forma similar, Silva et al. (2021), ao utilizar o teste de Pettitt identificou na série temporal dos casos de notificações de dengue no Estado Alagoas, alguns anos com mudanças drásticas, sendo caracterizadas em ciclos bianuais sendo os ciclos diretamente associados às fases do ENOS (El Niño e La Niña), principalmente na categoria moderada. Ademais, Silva et al. (2021) concluem que a geoespacialização e a estatística

aplicada são eficientes na avaliação espaço-temporal dos casos de dengue em Alagoas, principalmente na definição de novas políticas públicas de investimentos nas áreas com maiores casos notificados no Estado.

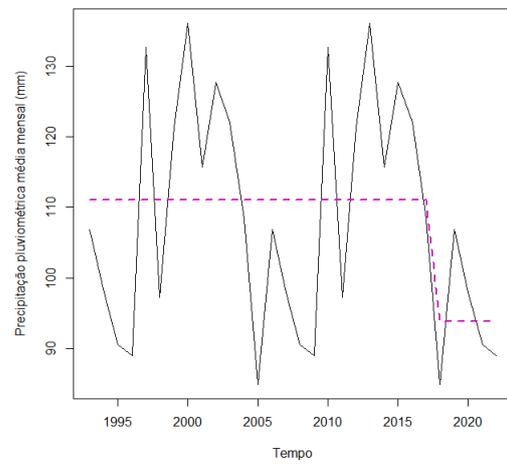
Com relação à análise das séries de precipitação mensais, os resultados são apresentados na Tabela 9. É possível afirmar que não houve ruptura estatisticamente significativa durante o período estudado, ao nível de significância de 5%.

Tabela 9 – Testes de Pettitt aplicados às séries das médias mensais da precipitação pluviométrica no Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil, para o 1993 a 2022.

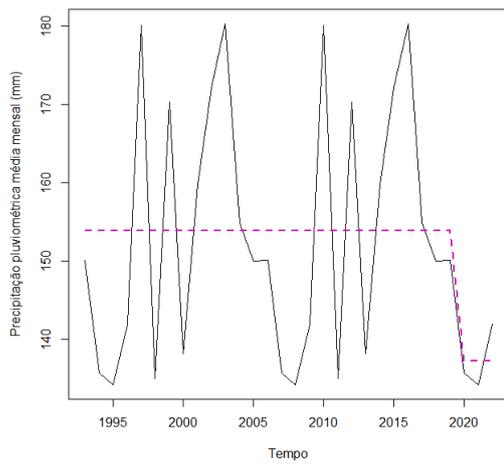
Mês	Ponto de ruptura	Ano	<i>p</i>-valor
Janeiro	10	2002	0,9222
Fevereiro	25	2017	0,5775
Março	27	2019	0,9991
Abril	25	2017	0,9702
Maió	8	2000	0,9980
Junho	7	1999	0,9901
Julho	24	2016	0,8750
Agosto	25	2017	0,9900
Setembro	25	2017	0,9222
Outubro	3	1995	0,9983
Novembro	23	2015	0,9904
Dezembro	6	1998	0,9981



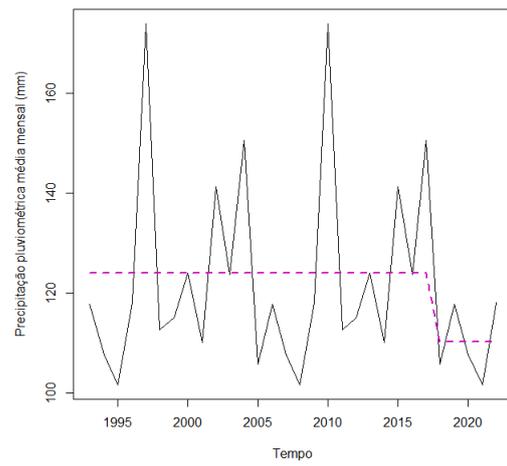
(a) Janeiro



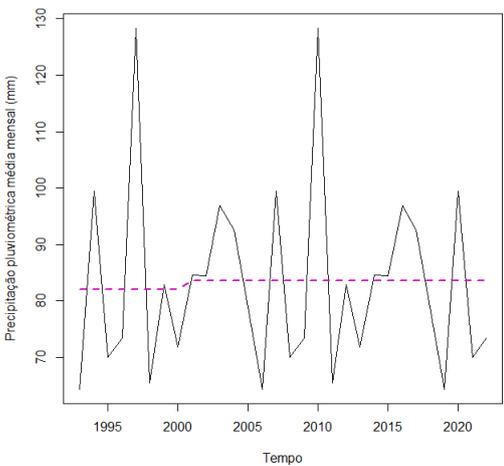
(b) Fevereiro



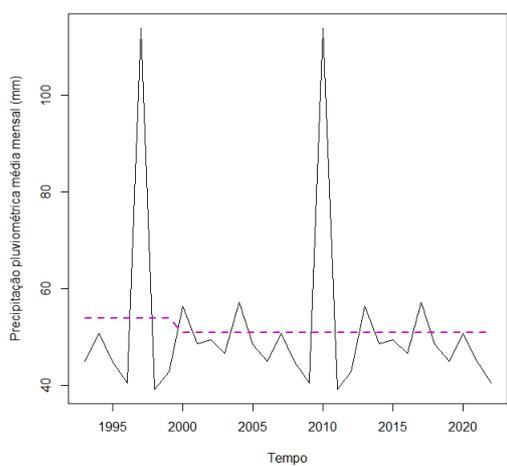
(c) Março



(d) Abril

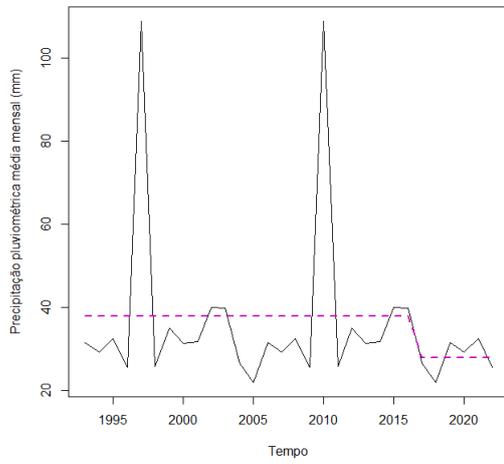


(e) Maio

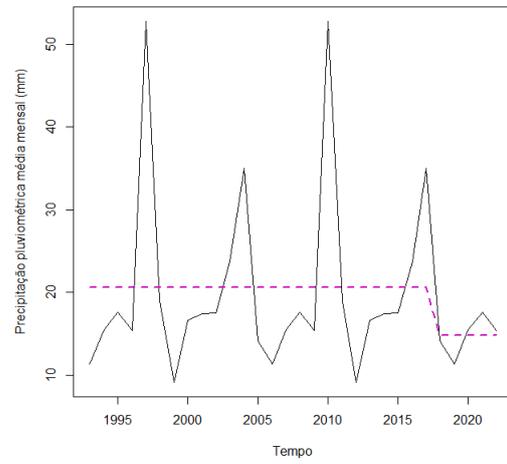


(f) Junho

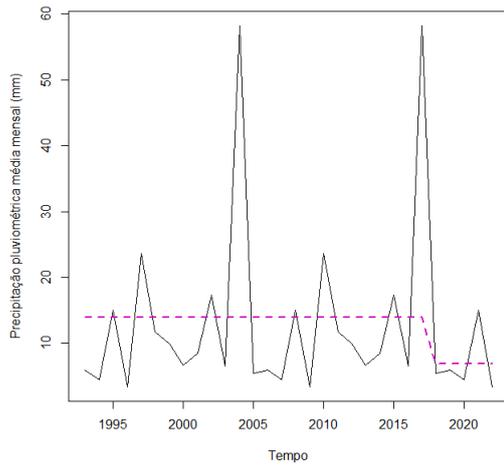
Figura 21 – Resultados do teste de Pettitt do primeiro semestre, para a precipitação média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.



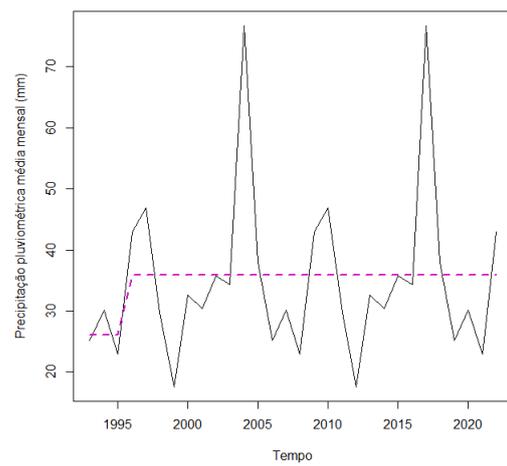
(a) Julho



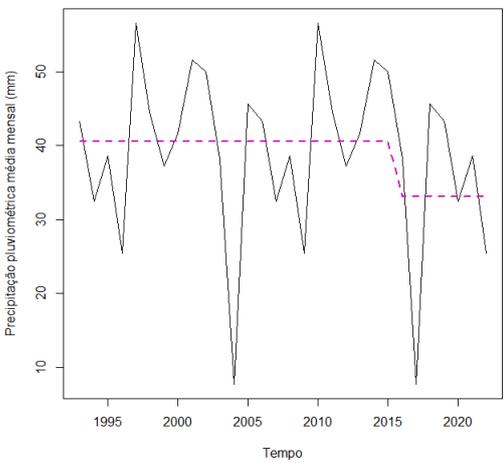
(b) Agosto



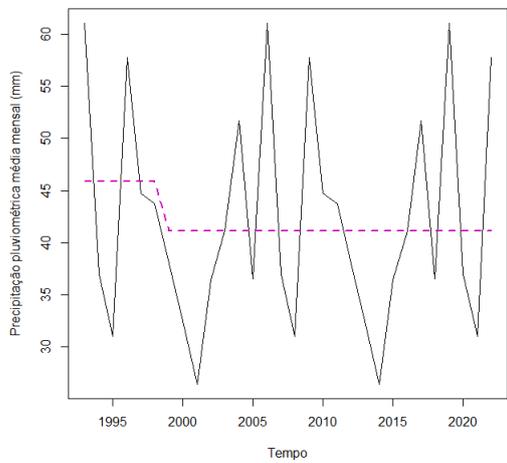
(c) Setembro



(d) Outubro



(e) Novembro



(f) Dezembro

Figura 22 – Resultados do teste de Pettitt do segundo semestre, para a precipitação média mensal da microrregião do Pajeú - Pernambuco, Brasil - 1993 a 2022.

5.3 Técnica dos Quantis

A série de dados utilizada está constituída pelos totais registrados de chuva (mensais e anuais), constituindo em atribuir uma probabilidade p univocamente a cada valor amostral.

A metodologia utilizada nos permitiu identificar a partir da série de dados estudada (1993-2022) para a microrregião do Sertão do Pajeú, os períodos muito seco (MS),seco (S), normal (N), chuvoso (C) e muito chuvoso (MC). A Tabela 10 apresenta a classificação dos anos, segundo à metodologia proposta por [Xavier e Xavier \(1987\)](#). É possível observar que 5 anos foram considerados “muito seco”; 6 anos “seco”; 8 anos “normal”; 6 anos “chuvoso” e 5 anos “muito chuvoso”.

Tabela 10 – Caracterização dos períodos “MS, S, N, C, MC” através de dados pluviométricos (1993 a 2022) para microrregião do Sertão do Pajeú, Pernambuco - Brasil.

Ano	$p(x) < Q_{0,15}$	$Q_{0,15} \leq p(x) < Q_{0,35}$	$Q_{0,35} \leq p(x) < Q_{0,65}$	$Q_{0,65} \leq p(x) < Q_{0,85}$	$p(x) \geq Q_{0,85}$
1993	MS	-	-	-	-
1994	-	-	-	C	-
1995	-	S	-	-	-
1996	-	-	N	-	-
1997	-	-	N	-	-
1998	MS	-	-	-	-
1999	MS	-	-	-	-
2000	-	S	-	-	-
2001	-	S	-	-	-
2002	-	-	-	C	-
2003	-	-	-	C	-
2004	-	-	-	-	MC
2005	-	-	-	C	-
2006	-	-	-	C	-
2007	-	-	N	-	-
2008	-	-	-	-	MC
2009	-	-	-	-	MC
2010	-	-	N	-	-
2011	-	-	-	C	-
2012	MS	-	-	-	-
2013	-	S	-	-	-
2014	-	-	N	-	-
2015	MS	-	-	-	-
2016	-	S	-	-	-
2017	-	S	-	-	-
2018	-	-	N	-	-
2019	-	-	N	-	-
2020	-	-	-	-	MC
2021	-	-	N	-	-
2022	-	-	-	-	MC

Os eventos ENOS estudados durante o período de 1993 a 2022, são apresentados na Tabela 11. Tais aspectos são relevantes para o planejamento e a gestão de ações mitigadoras antecipadas através da integração política, socioeconômica e ambiental, são fundamentais para a conscientização, prevenção e melhoramento na capacidade de reação das populações atingidas pelos efeitos ENOS.

Tabela 11 – Relação dos anos considerados “Muito Seco” e “Seco” do Sertão do Pajeú, em anos de ENOS

ENOS (Eventos estudados no período 1993 a 2022)	1993, 1997, 1998, 2002, 2003, 2006, 2007, 2009, 2010, 2015 e 2016
Muito seco e Seco	1993, 1995, 1998, 1999, 2000, 2001, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017.

Fonte: (CPTEC, 2023)

Nota: Em vermelho anos que coincidiram com períodos “MS”, “S” e “ENOS”.

5.4 Análise Espacial

Inicialmente foram avaliados a relação de interdependência espacial entre toda a região. O resultado do índice de Moran Global foi de 0,494 (p -valor = 0,005), apontando uma dependência espacial positiva e significativa ao nível de confiança de 5%. A seguir são apresentados os resultados que complementam a descrição espacial do território estudado, iniciando com dos procedimentos determinísticos (Método *Thiessen*, *Spline* e IDW) e seguindo as metodologias relacionadas à geoestatística.

5.4.1 Método de *Thiessen*

A Figura 23, apresenta o diagrama de voronoi da precipitação média anual que corresponde ao método de Thiessen. É possível observar que os municípios de Triunfo, Tabira, Brejinho e porções dos municípios de Ingazeira e Santa Terezinha, apresentaram maiores média de precipitação anual, na faixa de 872,7 a 1.176,1mm.

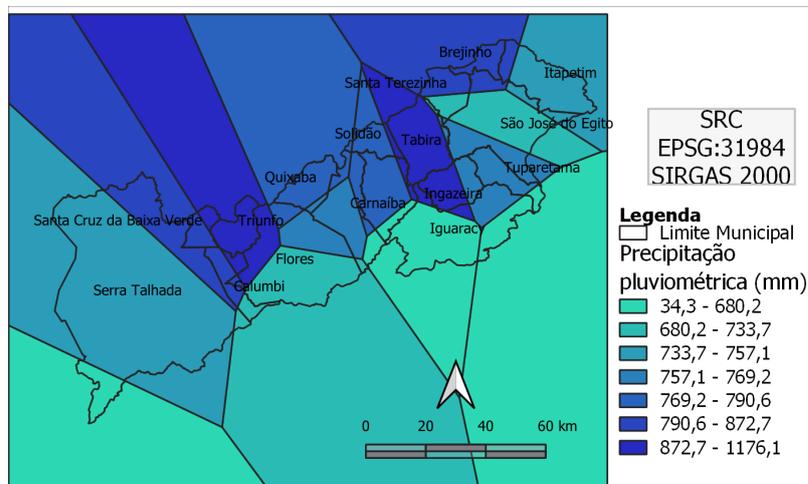


Figura 23 – Diagrama de Voronoi da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.

Marciano, Barbosa e Silva (2018), propôs para calcular as áreas de influência baseado no Método de Thiessen e considerando as linhas de cumeada do relevo. Considerou-se a localização das estações para traçar os polígonos e as linhas de cumeadas do relevo, que são geradas a partir de modelo digital de elevação, tornando o método proposto mais laborioso no sentido de ostentar informações de topografia.

Marciano, Barbosa e Silva (2018), concluiu que a análise de tal técnica deve ser feita com cautela em terrenos acidentados, tendo que vista que o método proposto possivelmente tem uma maior representatividade quanto à precipitação média em uma área, pois as linhas de cumeada das montanhas são divisores de águas e alteram o comportamento das chuvas de ambos os lados das vertentes.

5.4.2 Spline

O método de *Spline* obteve bom ajuste $R^2 = 97,21\%$. A Figura 24 apresenta interpolação da precipitação média anual. É possível observar que os municípios de Triunfo e Tabira, apresentaram maiores média de precipitação anual, com valores superiores a $1.054,15mm$.

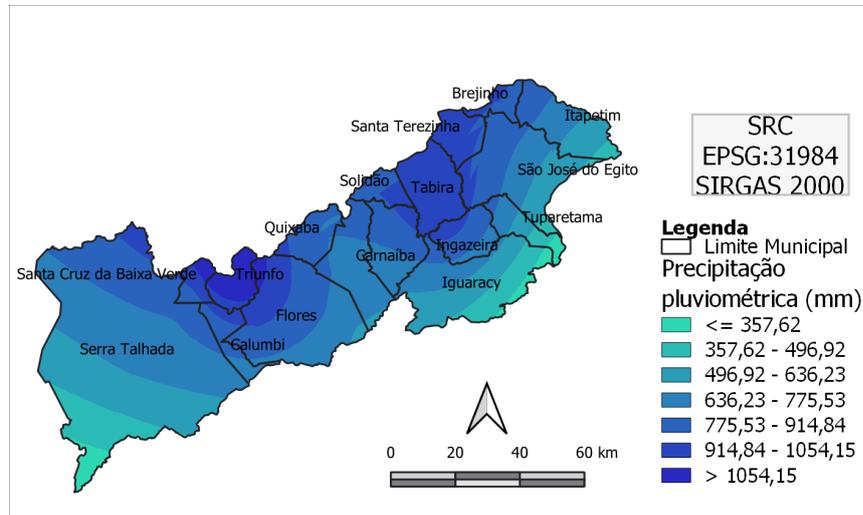
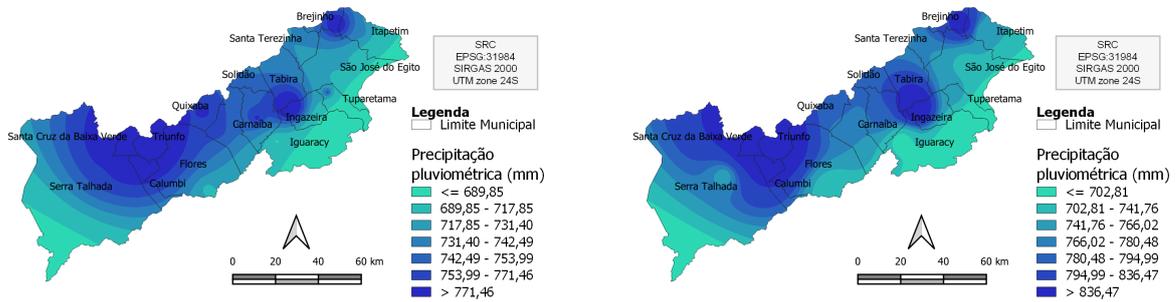


Figura 24 – Interpolação pelo método Spline da precipitação pluviométrica média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.

5.4.3 Inverso da Distância Ponderada

Com o mapa interpolado é possível identificar a distribuição espacial das chuvas na microrregião do Pajeú, bem como identificar os territórios com maiores e menores precipitações médias. Inicialmente foi realizadas interpolações, variando o peso de 1 a 6 (números inteiros), Figura 25.

Com intuito de garantir a comparabilidade visual das interpolações espaciais, para todas elas a faixa de classificação da legenda definida foi considerado o modo do intervalo igual e sete classes. Realizando a comparação entre as figuras é possível observar que a medida em que o coeficiente de potência aumenta, os valores previsto para última categoria também aumenta, de acordo com a literatura Os valores do peso aumentam a irregularidade da superfície, e fica mais suscetível a valores extremos.



(a) *Peso 1*

(b) *Peso 2*



(c) *Peso 3*

(d) *Peso 4*



(e) *Peso 5*

(f) *Peso 6*

Figura 25 – Resultado do *IDW*, segundo os pesos, para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.

Em seguida, gerou-se uma função para verificar qual o valor do peso ótimo considerando o erro quadrático médio. O resultado apontou que quando o coeficiente de potência

($\alpha = 1,58$), a interpolação apresentou menores medidas de erro. A Figura 26, apresenta a precipitação pluviométrica da região do Pajeú considerando o peso ótimo com a técnica do IDW.

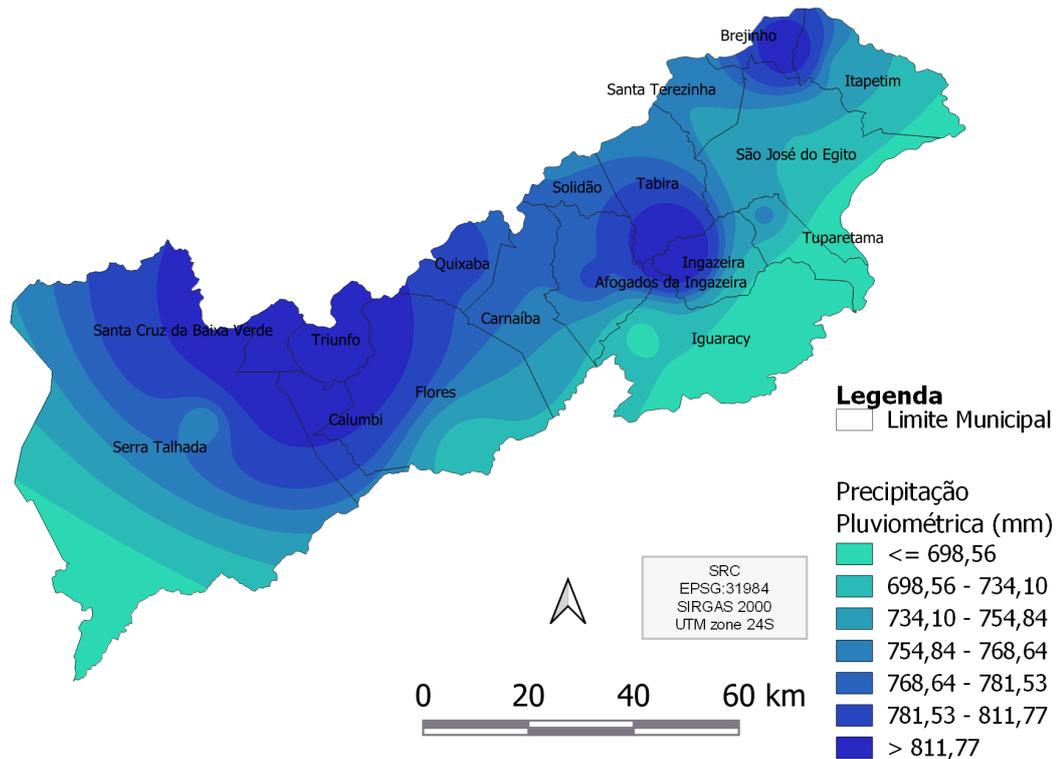


Figura 26 – Resultado do IDW (peso ótimo) para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.

5.4.4 Geoestatística

A respeito da análise Geoestatística, realizou-se o ajuste dos semivariogramas da precipitação pluviométrica média anual do Sertão do Pajeú considerando os três modelos: Esférico, Exponencial e Gaussiano. A Tabela 12 apresenta os parâmetros do modelo. Assim como ocorre no modelo teórico, as semelhanças entre os parâmetros do modelo exponencial e gaussiano são observadas. O que difere entre eles é o comportamento parabólico na origem do semivariograma gaussiano, como pode ser observado na Figura 29.

Tabela 12 – Valores de efeito pepita, alcance e patamar dos modelos ajustados para a série anual do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil.

Modelo	Efeito pepita	Alcance	Patamar
Esférico	3377	1321	1519
Exponencial	3377	2786	1076
Gaussiano	3377	2786	1076

A análise gráfica dos semivariogramas segundo os modelo Esférico, Exponencial e Gaussiano são apresentados, respectivamente, nas Figuras 27, 28 e 29.

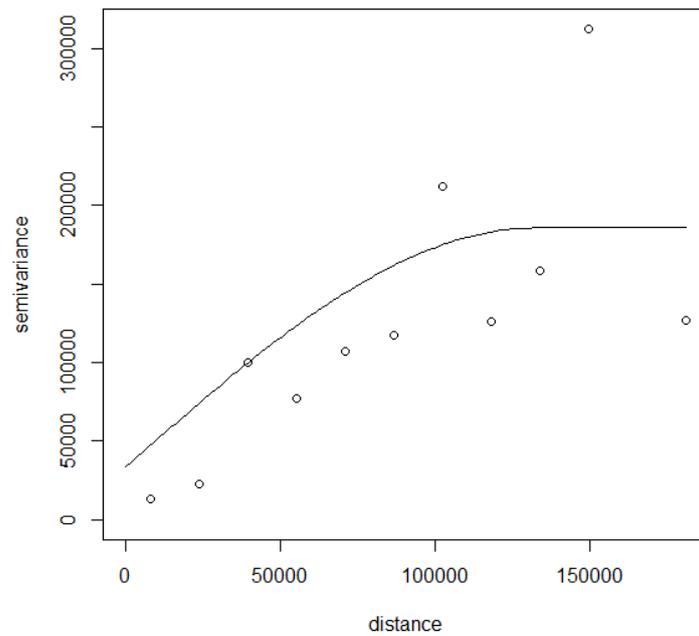


Figura 27 – Semivariograma do modelo Esférico

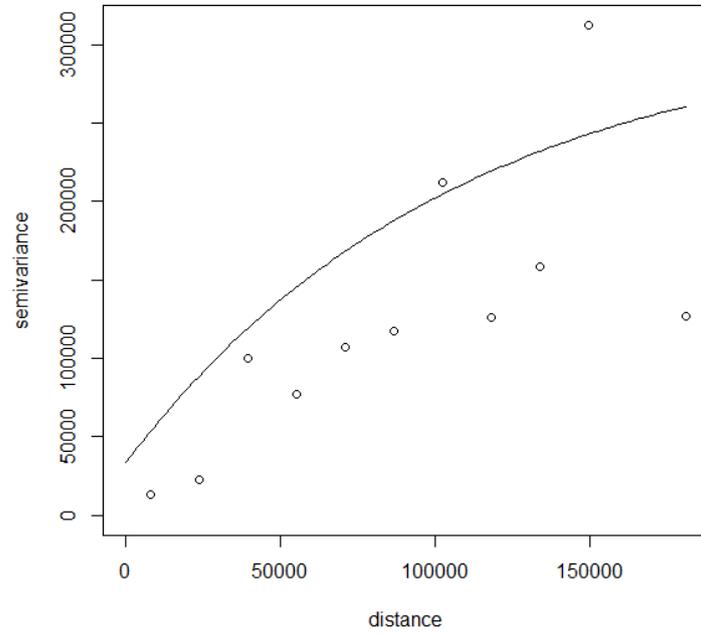


Figura 28 – Semivariograma do modelo Exponencial

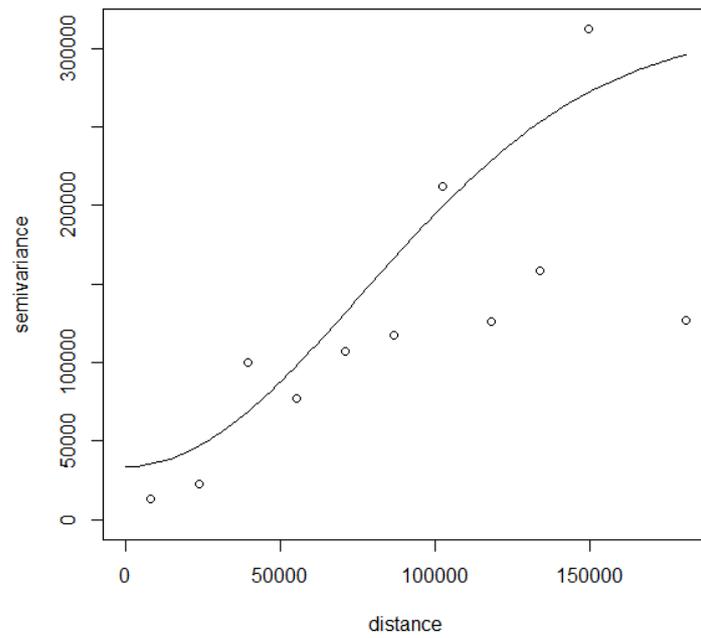


Figura 29 – Semivariograma do modelo Gaussiano

Com relação à qualidade do ajuste, o resultado do R^2 foi igual a 90,5%, 76,1% e 95,1%, para os modelos esférico, exponencial e gaussiano, respectivamente. Desta forma, é possível afirmar que todos os modelos foram bem ajustados, no entanto o modelo esférico apresentou o melhor ajuste.

5.4.5 Krigagem

Após a análise variograma, procedeu-se com a técnica de interpolação, a krigagem ordinária, foi utilizada por ser a mais usual para identificar e mapear padrões espaciais da superfície terrestre e que permite identificar se existe auto correlação.

A krigagem, constitui a ferramenta mais adequada para quantificar a dependência espacial quando as observações são realizadas em duas dimensões e define também os parâmetros necessários para fazer interpolação entre os locais não amostrados para construção de mapas.

Considerando que o modelo esférico apresentou o melhor ajuste da precipitação pluviométrica média do Sertão do Pajeú, os parâmetros identificados foram os utilizados para a interpolação. A Figura 5.5, apresenta o comportamento da região interpolada com a krigagem, nesta interpolação a região de Triunfo apresenta precipitação média anual superior a 1.004,49mm.

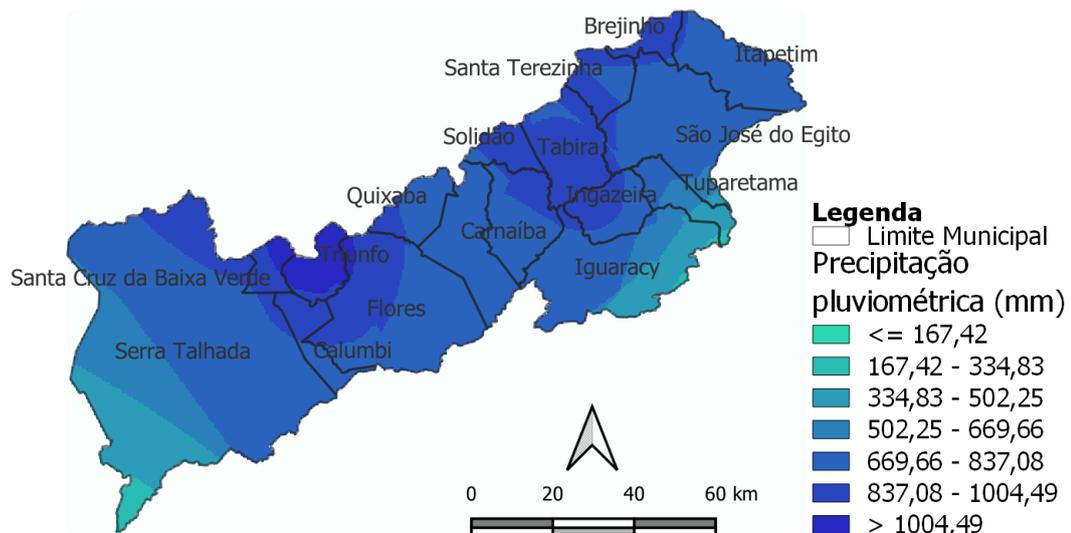


Figura 30 – Resultado da krigagem com o modelo gaussiano para a precipitação média anual da microrregião do Pajeú - Pernambuco - 1993 a 2022.

5.5 Comparação dos métodos de interpolação

Após ajustes dos modelos, realizou-se a comparação entre as técnicas de interpolação utilizada. De acordo com a Tabela 13 pode-se afirmar que dentre as técnicas simples de interpolação o método de *Spline* mostrou-se adequado tanto para descrever a precipitação média da região do Pajeú, quanto na acurácia da interpolação espacial (menores valores de erro de previsão).

O trabalho de Franco e Uda (2015) comparou os métodos simples de interpolação para avaliar a na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina. Os resultados *Thiessen* e *Spline*, apresentaram os maiores erros quadráticos médios. Os autores concluíram que o método de *Thiessen* apresentou-se adequado para estimativa de precipitação média total sobre a bacia, mas não como método de avaliação espacial dos dados pluviométricos. Nesse sentido, cabe ressaltar a importância da comparação entre as diferentes técnicas de interpolação, tendo em vista as especificidades de cada território.

Em que pese a análise geoestatística, o modelo gaussiano ($R^2 = 95,1\%$) mostrou-se mais adequado comparado aos demais. Do mesmo modo a interpolação da krigagem considerando o modelo gaussiano demonstrou melhor acurácia, conforme pode ser visto com menores valores de erro na Tabela 13. A Figura , apresentada anteriormente demonstra o resultado dessa interpolação.

Tabela 13 – Resultado das medidas de erro para cada técnica de interpolação.

Medidas de erro	Thiessen	Spline	IDW	Krigagem		
				Esférico	Exponencial	Gaussiano
EAM	98,421	54,251	95,5712	95,8893	96,3697	94,4591
EQM	28367,35	4144,87	25138,51	24456,7	27270,39	19702,58
REQM	168,4261	64,3807	158,5513	156,386	165,1375	140,3659

6 Conclusão

Estudos relacionados à precipitação pluviométrica enfrentam dificuldades com relação a qualidade dos dados. Em geral, há descontinuidade das informações coletadas pelos postos pluviométricos por diversas razões. Nesse sentido é relevante a aplicação de técnicas para realizar o preenchimento dos dados faltantes. No presente estudo a análise de regressão múltipla, mostrou-se adequada para realização dessa procedimento. No entanto, para grandes regiões maiores e/ou com maior quantidade de postos, tal etapa possivelmente será um trabalho com alta necessidade de dedicação para cumprimento.

Além das medidas descritivas, a caracterização estatística da série temporal foi dada pelo teste de Mann-Kendall e teste de Pettit. A série da precipitação média anual e mensal apresentaram estabilidade temporal e com distribuição de probabilidade deve constante. Com relação a descontinuidade desse comportamento, o ponto de ruptura ocorrido no ano de 2001, na precipitação pluviométrica média anual, não foi estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%. O mesmo comportamento ocorreu para as séries mensais, onde não houve ruptura significativa assim como encontrado em pesquisas anteriores para a região.

A caracterização da precipitação pluviométrica dos quantis considerou 5 anos como “muito seco” e 6 anos como “seco”. A técnica foi eficaz comparando tal identificação com relação aos anos de surgimento do Fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS).

A respeito das técnicas de interpolação espacial simples (*Thiessen*, *Spline* e *IDW*), o método de *Spline*, apresentou melhor ajuste e acurácia na interpolação. Com relação às demais técnicas a krigagem considerando os parâmetros do modelo gaussiano apresentou melhores resultados tanto de ajuste ($R^2 = 95,1\%$) quanto de acurácia (menores medidas de erro).

Dessa forma, é possível concluir que a metodologia utilizada para o estudo da precipitação pluvial média anual na microrregião do Pajeú permitiu a obtenção de resultados satisfatórios na avaliação da sua variabilidade espacial, sendo capaz de determinar e expressar a continuidade espacial das chuvas e subsidiar as políticas públicas relacionadas às questões hídricas da região.

Referências Bibliográficas

- APAC. **Boletim do Clima**. 2022. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/Boletim-climatico-junho-2022.pdf>. Acesso em: 17 de junho de 2023.
- ASA. **Articulação Semiárido Brasileiro**. 2018. Disponível em: <<https://www.asabrasil.org.br/semiario>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998.
- CAMPOS, J. d. O.; CHAVES, H. M. L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 1, p. 157–169, Jan 2020. ISSN 0102-7786. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>>.
- CORREIA, L. R.; CAVALCANTE, A. B.; MARIN, A. M. P. Desertificação e mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro. **Instituto Nacional do Semiárido - INSA**, 2011.
- COSTA, M.; BECKER, C.; BRITO, J. Análise das séries temporais de precipitação do semiárido paraibano em um período de 100 anos - 1911 a 2010 (analysis of the time series of precipitation of the paraiba semi arid in a period of 100 years - 1911 to 2010). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 680, 11 2013.
- CPTEC. **ENOS**. 2023. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> . Acesso em: 17 de junho de 2023.
- ENEAS, J. S. M. et al. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalyptus urophylla no bioma cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, p. e346111133638–e346111133638, 2022.
- FEITOSA, A. **Zoneamento de pequenas bacias hidrográficas e caracterização de várzeas na Bacia do Pajeú, Pernambuco**. Dissertação (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife-Pernambuco, 2012.
- FILHO, H. M.; MORAES, C.; BENNATI, P. Mudança do clima e os impactos na agricultura familiar no Norte e Nordeste do Brasil. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA**, 2016.
- FORTES, B. d. P. M. D. et al. Modelagem geoestatística da infecção por ascaris lumbricoides. **Cadernos de Saúde Pública**, SciELO Public Health, v. 20, p. 727–734, 2004.

FRANCO, A. C. L.; UDA, P. K. Comparação de métodos de espacialização da precipitação na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina. **Anais: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil**, v. 25, 2015.

GIOVANELLA, T. H. et al. Desempenho de métodos de preenchimento de falhas em dados de evapotranspiração de referência para região oeste do paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 3, p. 415–422, Jul 2021. ISSN 0102-7786. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-77863630001>>.

GIULIETTI, A. M. et al. **Diagnóstico da vegeta o nativa do bioma Caatinga**. 2020.

GONÇALVES, B. D. F. et al. Pajeú river basin - pe: use of natural resources, changes and environmental issues from 1991 to 2022. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, p. e186111537031, Nov. 2022.

HARTWIG, M. **Hidrologia**. 2012. Disponível em: <<https://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/pdf/hidr.pdf>> Acesso em: 15/06/2023.

HOLANDA, R.; MEDEIROS, R.; FRANÇA, M. A técnica dos quantis para diferentes regimes pluviais e a aplica o do balanço hídrico em São Bento do Una – PE, brasil visando apoio a avicultura. **Revista de Geografia**, v. 38, p. 108, 07 2021.

HOLT, A. C. T. Precipita o. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgar Blucher, p. 7–35, 1976.

IBGE. **Produto Interno Bruto**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

IBGE. ** reas Territoriais**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html>. Acesso em: 10 de março de 2023.

IBGE. **Estimativa da Popula o**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 10 de março de 2023.

IBGE. **Censo Demográfico - Popula o Residente**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 28 de setembro 2023.

INMET. **O que   e quais os impactos do El Niño?** 2023. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> . Acesso em: 17 de junho de 2023.

ISAAKS, E. H. et al. **Applied Geostatistics**. Oxford University Press, 1989. ISBN 9780195050134. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vC2dcXFLI3YC>>.

KETHIREDDY, S. R. et al. Geospatial interpolation and mapping of tropospheric ozone pollution using geostatistics. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI, v. 11, n. 1, p. 983–1000, 2014.

LANDIM, P. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. 2000. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 17 de junho de 2023.

MAGERSKI, J. M.; FILHO, J. S. das V. Avaliação da técnica de krigagem ordinária utilizando o modelo geoestatístico estável no preenchimento de falhas de séries de precipitação pluviométrica nas sub-bacias hidrográficas localizadas em regiões de classificação climática distintas no estado do paraná. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2149–2171, 2021.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Revista Ambiente & Água**, Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas, v. 13, n. 1, p. e1906, 2018. ISSN 1980-993X. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1906>>.

MARTINS, A. P.; ALVES, W. dos S.; DAMASCENO, C. E. Avaliação de métodos de interpolação para espacialização de dados de temperatura do ar na bacia do rio paranaíba–brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée – Tome I**. [S.l.]: Editions Technip., 1962.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée – Tome II**. [S.l.]: Editions Technip., 1963.

MATHERON, G. **Teoria das Variáveis Regionalizadas e Suas Aplicações**. [S.l.]: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971.

MATHERON, G.; FRANCE. **Traite De Geostatistique Appliquee Tome II. Le Krigeage**. [S.l.]: Editions B.R.G.M., 1965.

NOVAIS, T. F. e Sandra Hacon e J. Mudanças climáticas, poluição do ar e repercussões na saúde humana: Revisão sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, n. 0, 2021. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/72297>>.

OLEA, R. A. **Geostatistics glossary and multilingual dictionary**. [S.l.]: Oxford University Press, 1991.

OLEA, R. A. **Geostatistics for Engineers and Earth Scientists**. [S.l.]: Springer US, 1999. ISBN 9781461550013.

ONU. **Agenda 2030**. 2023. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society Series C**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:bla:jorssc:v:28:y:1979:i:2:p:126-135>>.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 3, p. 281–290, Sep 2013. ISSN 0102-7786. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>>.

PINTO, N. de S. et al. **Hidrologia básica**. Editora Blucher, 1976. ISBN 9788521217886. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DQG5DwAAQBAJ>>.

PNUD. **Atlas do Desenvolvimento Humano**. 2010. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.

RIBEIRO, S.; MARÇAL, M.; CORREA, A. C. D. B. Geomorfologia de áreas semi-áridas: Uma contribuição ao estudo dos sertões nordestinos. **Revista de Geografia UFPE**, v. 27, p. 120, 01 2010.

SILVA, A. K. de O. Ab'sÁber, aziz nacib. os domínios de natureza no Brasil: Potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê editorial, 2003. **Revista de Geografia**, v. 29, n. 1, p. 252–258, abr. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/228990>>.

SILVA, R. O. B. d.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Scielo, v. 22, n. 03, p. 579–589, 2017.

SILVA, S. D. d. et al. Dynamics of notified cases of dengue in Alagoas: Geospatialization and applied statistics. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e415101522990, Nov. 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22990>>.

SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, 1975. (Note technique - Organisation météorologique mondiale, N° 415; N° 423-424; N° 426). ISBN 9789263204158. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=gvZHAAAACAAJ>>.

SOARES, R.; BATISTA, A. **Meteorologia e Climatologia Florestal**. [S.l.]: UFPR, 2004.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de detecção de mudanças climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas em Recife-PE (detection indexes derived from climate change rainfall and temperatures in Recife-PE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 143–159, 2012.

TALMI, A.; GILAT, G. Method for smooth approximation of data. **Journal of Computational Physics**, v. 23, n. 2, p. 93–123, 1977. ISSN 0021-9991. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021999177901152>>.

TORRES, F.; MACHADO, P. **Introdução a Climatologia**. [S.l.]: Geographica, 2008. ISBN 9788521217886.

TORRES, F. S. d. M. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. [S.l.]: CPRM, 2014. (Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade). ISBN 9788574991412.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. [S.l.]: Nobel, 1984.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. [S.l.]: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1993.

VIANA, P.; NETO, J. de C.; FARIAS, T. da S. **Estrada das águas: a circulação rodoviária de recursos hídricos no semiárido paraibano**. Editora Appris, 2023. ISBN 9786525031620. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FDCnEAAAQBAJ>>.

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**, v. 5, n. 2, p. 7–31, 1987.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2013.

Apêndices

APÊNDICE A – Postos pluviométricos do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil.

Tabela 14 – Postos pluviométricos do Sertão do Pajeú - Pernambuco - Brasil

Código	Nome do Posto
12	Serra Talhada (IPA)
13	Serra Talhada
40	São José do Egito (IPA)
41	Afogados da Ingazeira (CHESF)
42	Flores (CHESF)
43	Serra Talhada (CHESF)
69	Iguaraci (Jabitaca)
74	Tabira
91	Calumbi
92	São José do Egito (Faz. Muquén)
146	Afogados da Ingazeira
148	Iguaracy
151	Tuparetama
155	Itapetim
182	Triunfo
183	Flores
184	Carnaíba
186	Flores (Fátima)
189	Serra Talhada (Varzinha)
191	Santa Terezinha
192	Solidão
194	Flores (St. dos Nunes)
236	Serra Talhada (Faz. Quixaba)
238	Quixaba
246	Serra Talhada (Fazenda Caiçara)

Continua na próxima página

Tabela 14 – *Continuação da tabela*

Código	Nome do Posto
248	Serra Talhada (Tauapiranga)
273	Ingazeira
274	Santa Cruz da Baixa Verde
290	Afogados da Ingazeira
296	Tuparetama (Jardim)
320	São José do Egito (Faz. Riacho Fundo)
336	Santa Cruz da Baixa Verde
357	Solidão
377	Afogados da Ingazeira (Açude Brotas)
379	Serra Talhada (Açude Cachoeira)
407	São José do Egito PCD
414	Iguaraci (Irajai)
462	Serra Talhada (Açude Jazigo)
471	Santa Terezinha
473	Brejinho
481	Ingazeira
485	Serra Talhada PCD
501	Afogados da Ingazeira PCD (Brotas)
502	Iguaraci PCD (Rosário)
505	Serra Talhada PCD (Serrinha)
528	Ingazeira (Sítio Macambira)
529	Tuparetama (Fazenda Riacho)
549	Afogados da Ingazeira PCD
585	Santa Cruz da Baixa Verde PCD

Fim da tabela

APÊNDICE B – Precipitação média dos postos pluviométricos do Sertão do Pajeú utilizados nas análises

Tabela 15 – Precipitação média (*mm*) mensal dos postos pluviométricos do Sertão do Pajeú utilizados nas análises - Pernambuco - Brasil

Código	Posto	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
12	Serra Talhada (IPA)	94,75	106,87	150,10	117,77	64,40	45,00	31,46	11,28	5,94	25,19	43,33	61,03
92	São José do Egito (Faz. Muquén)	93,47	97,94	135,74	107,63	99,52	50,70	29,23	15,45	4,43	30,15	32,44	36,98
148	Iguaracy	81,30	90,60	134,29	101,64	70,04	44,79	32,42	17,56	15,02	22,89	38,61	31,00
155	Itapetim	110,46	88,96	141,97	118,08	73,41	40,55	25,60	15,34	3,41	42,95	25,48	57,77
182	Triunfo	113,84	132,71	180,10	173,93	128,33	113,75	108,85	52,77	23,62	46,93	56,55	44,73
183	Flores	83,09	97,21	135,06	112,63	65,51	39,23	25,73	18,93	11,73	29,69	44,46	43,78
184	Carnaíba	90,10	121,33	170,32	115,04	82,87	42,80	34,91	9,14	9,91	17,61	37,22	37,97
238	Quixaba	102,88	136,07	138,25	124,07	71,81	56,34	31,27	16,62	6,58	32,56	41,68	32,48
290	Afogados da Ingazeira	102,68	115,72	159,83	110,03	84,60	48,56	31,68	17,39	8,40	30,33	51,58	26,47
336	Santa Cruz da Baixa Verde	77,21	127,71	172,14	141,24	84,39	49,46	39,95	17,50	17,36	35,75	49,98	36,45
473	Brejinho	119,82	122,00	180,26	123,60	96,93	46,53	39,69	23,70	6,50	34,27	38,25	41,12
528	Ingazeira (Sítio Macambira)	158,59	108,37	154,90	150,64	92,50	57,09	26,49	35,05	58,20	76,70	7,77	51,70
529	Tuparetama (Fazenda Riacho)	131,42	84,93	149,98	105,71	78,88	48,32	21,96	14,16	5,43	38,03	45,65	36,53

Anexos

ANEXO A – Principais pacotes do R

1. *trend*

A análise de dados ambientais requer frequentemente a detecção de tendências e pontos de mudança. Este pacote inclui testes para detecção de tendências (teste de tendência Cox-Stuart, teste de tendência Mann-Kendall, teste de Hirsch-Slack (correlacionado), teste de tendência Mann-Kendall parcial, teste de tendência multivariado (multisite) Mann-Kendall, (sazonal) inclinação de Sen, teste de tendência de correlação parcial de Pearson e Spearman), detecção de ponto de mudança (procedimentos de teste de Lanzante, teste de Pettitt, teste de faixa de Buishand, teste U de Buishand, teste de homogeneidade normal padrão), detecção de não aleatoriedade (teste de frequência de fase de Wallis-Moore, Bartels teste de razão de classificação de von Neumann, teste de Wald-Wolfowitz) e o teste distributivo robusto de ordem de classificação de duas amostras.

2. *sf*

Suporte para recursos simples, uma forma padronizada de codificar dados vetoriais espaciais. Vincula-se a “GDAL” para leitura e escrita dados, para “GEOS” para operações geométricas, e para “PROJ” para conversões de projeção e transformações de dados. Usa por padrão o “s2” pacote para operações de geometria esférica em coordenadas elipsoidais (long/lat).

3. *sp*

Classes e métodos para dados; o documento de classes onde as informações de localização espacial reside, para dados 2D ou 3D. Funções utilitárias são fornecidas, por exemplo, para plotagem de dados como mapas, seleção espacial, bem como métodos para recuperação de coordenadas, para subconjunto, impressão, resumo, etc.

4. *rgdal*

Fornece ligações à Biblioteca de Abstração de Dados “Geoespaciais” (“GDAL”) ($\geq 1.11.4$) e acesso às operações de projeção/transformação da biblioteca “PROJ”. Observe que “rgdal” será desativado em outubro de 2023, planeje a transição para as funções `sf/stars/terra` usando “GDAL” e “PROJ” o mais cedo possível

5. *raster*

Ler, escrever, manipular, analisar e modelar dados espaciais. Este pacote foi substituído pelo pacote “*terra*”.

6. *tmap*

Mapas temáticos são mapas geográficos nos quais as distribuições de dados espaciais são visualizadas. Este pacote oferece uma abordagem flexível, baseada em camadas e fácil de usar para criar os mapas matic, como coropleths e mapas de bolhas.

7. *dismo*

Métodos para modelar a distribuição de espécies, ou seja, prever a similaridade ambiental de qualquer local com os locais de ocorrências conhecidas de uma espécie.

8. *stars*

Ler, manipular, escrever e plotar matrizes espaço-temporais (raster e cubos de dados vetoriais) em 'R', usando 'GDAL' ligações fornecidas por 'sf' e ligações 'NetCDF' por 'ncmeta' e 'RNetCDF'.

9. *gstat*

Modelagem de variograma; (co)krigagem simples, ordinária e universal de pontos ou blocos; krigagem espaço-temporal; Gaussiana sequencial ou (co)simulação de indicadores; funções utilitárias de plotagem de variogramas e mapas de variogramas; suporta *sf* e estrelas.

10. *fields*

Para ajuste de curva, superfície e função com ênfase em splines, dados espaciais, geoestatística e estatísticas espaciais. Os principais métodos incluem splines cúbicos e de placa fina, krigagem e compactamente suportados funções de covariância para grandes conjuntos de dados.

11. *rcompanion*

Funções e conjuntos de dados para dar suporte ao resumo e análise de Avaliação do Programa de Extensão em R, e An R Companion for the Handbook of Biological Statistics. As vinhetas estão disponíveis em <http://rcompanion.org>>

12. *bestNormalize*

Estimar um conjunto de transformações de normalização, incluindo uma nova adaptação de uma técnica baseada em fileiras que pode garantir dados transformados

normalmente distribuídos se não houver empates: ordenados normalização quantílica (ORQ)

13. *geoR*

Análise geoestatística incluindo métodos baseados em variogramas, baseados em verossimilhança e bayesianos. Software companheiro para Diggle e Ribeiro (2007) <doi:10.1007/978-0-387-48536-2>.

14. *automap*

Uma interpolação automática é feita estimando automaticamente o variograma e, em seguida, chamando *gstat*. Uma visão geral é dada por Hiemstra *et al* (2008) <doi:10.1016/j.cageo.2008.10.011>.

ANEXO B – Plugins do QGIS

1. *Smart-Map*

Este *plugin* permite ao usuário importar dados de uma camada QGIS. Gere o semivariograma experimental e semivariogramas teóricos como: Linear, Esférico, Exponencial e Gaussiano. Gere a interpolação usando o método *Ordinary Kriging* e *Machine Learning*. Gerar zonas de gerenciamento.

2. *IDW*

Um *plugin* do QGIS, que cria um processo em lote do QGIS Raster Interpolation (TIN ou IDW) e `gdal_contour`.