



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFERICAS – ICAT
CURSO DE BACHARELADO EM METEOROLOGIA



RENATA CARVALHO DE ARAÚJO

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO
PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ AL/PE**

MACEIÓ

2025

RENATA CARVALHO DE ARAÚJO

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO
PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ AL/PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Meteorologia da
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharelado em Meteorologia.

Orientador: Prof^ª. Dra. Maria Luciene Dias
de Melo.

Maceió

2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB4 - 661

- A663c Araújo, Renata Carvalho de.
 Comparação de métodos de interpolação de precipitação para a bacia hidrográfica do rio Mundaú AL-PE / Renata Carvalho de Araújo. – 2025.
 47 f. : il.
- Orientadora: Maria Luciene Dias de Melo.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 42-44.
 Apêndices: f. 45-47.
1. Espacialização de chuva. 2. Métodos de interpolação. 3. Bacia hidrográfica.
 4. Mundaú, rio (AL/PE). 5. Meteorologia. I. Título.

CDU: 551.508.7

Folha de Aprovação

Renata Carvalho de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 19 de maio de 2025.



Documento assinado digitalmente
MARIA LUCIENE DIAS DE MELO
Data: 29/05/2025 17:47:58-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Orientadora – Prof^ª. Dra. Maria Luciene Dias de Melo

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
GEIZA THAMIRYS CORREIA GOMES
Data: 29/05/2025 15:58:59-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Examinadora Externa – Prof^ª. Ma. Geiza Thamirys Correia Gomes

Examinador Interno – Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano



Documento assinado digitalmente
GLAUBER LOPES MARIANO
Data: 29/05/2025 17:44:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria Luciene de Melo Dias, e Prof. Ma. Vera Núbia Carvalho de Farias pelo apoio e orientação que foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Ricardo e Lucivânia, as minhas irmãs, Lorrany e Mariana, e ao meu noivo, Alberon, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo nos momentos mais desafiadores.

Agradeço também aos professores e colegas do curso de Meteorologia, pelos debates, sugestões e pelo convívio acadêmico enriquecedor.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Epígrafe

"Chuva, música do céu que cai na terra,
sem pressa, sem fim".
(QUINTANA, 1997.)

RESUMO

Este trabalho analisa a aplicação de métodos de interpolação espacial para estimar a distribuição da precipitação na bacia do rio Mundaú, localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco. Foram utilizados os métodos do Inverso da Distância Ponderada (IDW) e Krigagem, com o objetivo de avaliar suas eficácias na representação da variabilidade espacial da chuva. Para isso, foram utilizados dados pluviométricos 23 estações inseridas dentro e no entorno da bacia, processados no Qgis e em ambiente Python para gerar a interpolação de precipitação acumulada para três eventos de cheias, períodos analisados. Os resultados demonstraram que, nos três eventos, a Krigagem apresentou maior capacidade de capturar a heterogeneidade espacial da chuva. Conclui-se que o uso de técnicas de interpolação mais sofisticadas pode contribuir para uma melhor representação da chuva em estudos hidrológicos, especialmente em regiões com topografia e clima complexos.

Palavras-chave: espacialização de chuva; métodos de interpolação; bacia hidrográfica.

ABSTRACT

This work analyzes the application of spatial interpolation methods to estimate the distribution of precipitation in the Mundaú River basin, located between the states of Alagoas and Pernambuco. The Inverse Distance Weighted (IDW) and Kriging methods were used to evaluate their effectiveness in representing the spatial variability of rainfall. For this purpose, rainfall data from 23 stations located within and near the basin were used, processed in Qgis and in Python environment to generate the interpolation of accumulated precipitation for three flood events, analyzed periods. The results demonstrated that, in the three events, Kriging presented a greater capacity to capture the spatial heterogeneity of rainfall. It is concluded that the use of more sophisticated interpolation techniques can contribute to a better representation of rainfall in hydrological studies, especially in regions with complex topography and climate.

Keywords: spatialization of rain; interpolation methods; watershed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem histórica dos estragos provocados pela enchente de 1969	16
Figura 2	Danos causados pela enchente de 2010 em União dos Palmares	17
Figura 3	Cidade de Rio Largo inundada (cheia de 2022)	18
Figura 4	Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Mundaú	26
Figura 5	Caracterização a bacia hidrográfica do rio Mundaú	27
Figura 6	Distribuição espacial das estações pluviométricas	30
Figura 7	Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG - Evento 1 (2015)	34
Figura 8	Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG - Evento 2 (2017)	35
Figura 9	Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG - Evento 3 (2022)	35
Figura 10	Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG - Evento 1	36
Figura 11	Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG - Evento 2	37
Figura 12	Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG - Evento 3	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características físicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú	26
Tabela 2	Eventos hidrometeorológicos selecionados para o estudo	29
Tabela 3	Informações técnicas das estações pluviométricas	30
Tabela 4	Classificação qualitativa do índice de Confiança - C.....	33
Tabela 5	Resumo das métricas estatísticas para análise de desempenho dos métodos IDW e KRG para as chuvas acumuladas por eventos.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CEMADEN	Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso da Distância Ponderada
KRG	Krigagen
MAE	Erro Médio Absoluto
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
SAH	Sistema de Alerta Hidrológico
SGB	Serviço Geológico do Brasil
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Retrospecto Histórico das Enchentes na bacia do Rio Mundaú.....	16
2.2 Chuvas Extremas	19
2.3 Fundamentação Teórica.....	21
2.3.1 Métodos de Interpolação.....	21
2.3.1.1 Método do Inverso da Distância (IDW).....	21
2.3.1.2 Método Krigagem (KG)	22
2.3.1.3 Polígonos de Thiessen	22
2.3.1.4 Spline.....	23
2.3.2 Técnicas de Validação	25
3 ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.1 Localização e Descrição Geral.....	26
3.2 Caracterização Geral da Bacia do Rio Mundaú.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Seleção dos Eventos e Aquisição dos Dados Utilizados.....	29
4.2 Geração e Interpolação dos Dados de Chuva.....	31
4.3 Análise de Desempenho.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE.....	45

1. INTRODUÇÃO

As chuvas intensas têm provocado inúmeros impactos de ordem social, econômica e ambiental, especialmente quando ocorrem de forma recorrente e com distribuição espacial e temporal irregular. Esse cenário tem despertado crescente preocupação na comunidade científica, dada a complexidade de prever eventos extremos em ambientes vulneráveis. A qualidade da previsão de precipitação torna-se, portanto, um fator essencial para mitigar os efeitos dessas ocorrências, sobretudo no contexto da implementação de sistemas de alerta e previsão de cheias, que dependem diretamente da confiabilidade das estimativas pluviométricas.

No que se refere à previsão de inundações, a precipitação é a variável meteorológica de maior relevância. A abordagem mais comumente adotada ainda se baseia no uso de dados registrados por pluviômetros. No entanto, esses instrumentos estão sujeitos a diversas incertezas na representação da distribuição espacial da chuva, uma vez que realizam medições pontuais, com área de abrangência limitada ao seu entorno imediato (FARIAS et al., 2024). Nesse sentido, a fim de reduzir as lacunas decorrentes da utilização desses dados, torna-se fundamental testar diferentes métodos de interpolação da precipitação, buscando aquele que melhor represente a variabilidade espacial da chuva sobre a bacia hidrográfica em estudo.

Diversos métodos de interpolação, como o Inverso da Distância Ponderada (IDW), Krigagem (KG), os Polígonos de Thiessen, dentre outros, são amplamente aplicados na literatura para a espacialização de dados pluviométricos. Estudos como os de Farias et al. (2017) e Ferreira Filho et al. (2019) utilizaram essas técnicas em bacias hidrográficas brasileiras, demonstrando sua relevância na estimativa da distribuição espacial das chuvas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco, é historicamente afetada por eventos de inundações catastróficas, como as ocorridas em 1969, 2010 e 2022, que resultaram em significativas perdas humanas e materiais. Compreender com precisão a distribuição espacial da precipitação nessa bacia é essencial para a análise dos processos hidrometeorológicos que contribuem para tais eventos extremos.

Nesse sentido, estudos que visem avaliar métodos de interpolação para estimar a distribuição espacial das chuvas são essenciais para identificar qual deles oferece maior precisão na representação espacial pluviométrica de uma dada região, podendo fornecer subsídios para o aprimoramento de modelos hidrológicos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar comparativamente o desempenho de distintos métodos de interpolação espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL/PE), com o intuito de identificar aquele que proporciona a representação mais adequada da distribuição espacial da chuva na bacia.

1.1.2 Objetivo Específicos

- a) Estimar a distribuição espacial da precipitação acumulada em cada evento; e
- b) Comparar os resultados obtidos por cada método, com base em métricas estatísticas e análise espacial, a fim de identificar o mais adequado para representar a precipitação na área de estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção visa apresentar os principais referenciais teóricos que embasam este trabalho, abordando um retrospecto dos eventos de enchentes ocorridos na área de estudo, uma breve discussão sobre chuvas extremas e os conceitos relacionados à interpolação espacial de dados pluviométricos.

2.1. RETROSPECTO HISTÓRICO DAS ENCHENTES NA BACIA DO RIO MUNDAÚ

Ao longo de sua história, a bacia hidrográfica do rio Mundaú foi palco de enchentes de grandes magnitudes, que causaram severos impactos na infraestrutura, na economia local e na vida da população. Dentre os eventos mais significativos, destacam-se as cheias de 1914, 1941, 1969, 1988, 1989 e 2000, conforme registrado por Fragoso Júnior et al. (2010). Em anos mais recentes, a região foi novamente atingida por inundações expressivas, como as ocorridas em 2010, 2017 e 2022.

O evento de 1969 é frequentemente citado como um marco trágico na história hidrológica da região. Na ocasião, a cidade de São José da Laje foi devastada por uma enxurrada de grande intensidade, resultando em aproximadamente 1.100 mortes, segundo estimativas da época (SILVA et al., 2014). A magnitude desse episódio foi agravada pela ausência de infraestrutura de contenção e de sistemas de alerta. A Figura 1 ilustra alguns dos impactos causados por esse evento.

Figura 1 – Imagem histórica - enchente de 1969 em São José da Laje/AL.



Fonte: Agência Tribuna de Notícias (1969)

Em 2010, a bacia do rio Mundaú foi novamente afetada por um evento hidrológico extremo. Chuvas persistentes e de alta intensidade, concentradas entre os dias 17 e 20 de junho, com a precipitação acumulada superando 250 mm, provocaram o transbordamento de diversos rios e córregos, especialmente nos municípios de União dos Palmares, Branquinha, Murici, São José da Laje e Rio Largo. O evento resultou em 95 mortes, mais de 150 mil pessoas afetadas e cerca de 27 mil desalojados, distribuídos em 26 municípios, sendo 19 em Alagoas e 7 em Pernambuco. Além das perdas humanas e sociais, os danos à infraestrutura foram expressivos, com pontes e rodovias destruídas, e os prejuízos materiais estimados ultrapassaram R\$ 1 bilhão (CEPED, 2011; LOPES, 2020). A Figura 2 ilustra alguns dos impactos causados por esse evento em União dos Palmares, Alagoas.

Figura 2 – Danos causados pela enchente de 2010 em União dos Palmares



Fonte: Walter e Milan (2010).

Em 2017, outro evento de inundação foi registrado entre os dias 27 e 31 de maio, novamente com impactos significativos. A precipitação acumulada em cinco dias ultrapassou os 300 mm em alguns pontos da bacia. O nível do rio Mundaú, em União dos Palmares, alcançou valores superiores à cota de inundação, exigindo a evacuação de centenas de famílias em áreas ribeirinhas. Embora com menor número de vítimas, o episódio evidenciou a recorrência dos eventos extremos e a fragilidade da infraestrutura regional (COSTA, 2019).

O evento mais recente ocorreu em 2022, entre os meses de abril e agosto, principalmente entre os dias 01 e 02 de julho, onde a maioria dos pontos analisados registrou acumulados pluviométricos superiores a 150 mm em um intervalo inferior a 36 horas, associados a sistemas convectivos e episódios de ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) deslocada, ocasionaram transbordamentos em diversos afluentes do rio Mundaú. O Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) operado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) emitiu 56 boletins técnicos e 38 boletins extraordinários durante o período, em virtude da superação de cotas de alerta e de inundação (SGB, 2023). Municípios como São José da Laje, União dos Palmares, Quebrangulo, Atalaia e Rio Largo decretaram situação de emergência ou calamidade pública. A Figura 3 ilustra alguns dos impactos causados por esse evento na cidade de Rio Largo, Alagoas.

Figura 3 – Cidade de Rio Largo inundada (cheia de 2022)



Fonte: Defesa Civil Estadual (2022).

Em São José da Laje, a elevação súbita do rio Canhoto deixou mais de 150 famílias desalojadas, demandando ações emergenciais da Defesa Civil e apoio das forças armadas. Esse evento reforçou a necessidade de ações estruturantes e não estruturantes para enfrentamento dos riscos hidrológicos, incluindo planos de contingência atualizados, expansão da rede de monitoramento pluviométrico e hidrológico, e o fortalecimento da capacidade de resposta local.

Essa vulnerabilidade às enchentes decorre de uma combinação de fatores fisiográficos e antrópicos, como a declividade acentuada no alto curso, a rápida concentração do escoamento superficial e a ocupação urbana em áreas de planície de inundação, a impermeabilização do solo e o uso e ocupação desordenados do território.

Soma-se a isso a alta variabilidade espacial e temporal da precipitação, frequentemente associada a sistemas meteorológicos de mesoescala, como Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (COUTINHO e FISCH, 2007).

A recorrência desses episódios evidencia a condição crítica de vulnerabilidade, sobretudo em um contexto de mudanças climáticas que tende a intensificar a frequência e severidade de eventos extremos. Nesse sentido, o conhecimento histórico sobre as inundações desempenha papel essencial para o planejamento urbano, elaboração de mapas de risco e implantação de medidas de mitigação e adaptação.

2.2. CHUVAS EXTREMAS

A ocorrência de desastres naturais tem aumentado significativamente nas últimas décadas, gerando preocupação entre a sociedade, os gestores públicos e a comunidade científica em escala global (NUNES, 2015). Dentre esses eventos, as inundações é o tipo de desastre que mais provocada prejuízos e impactos de ordem social, econômica e ambiental. Essas ocorrências costumam ser desencadeadas por episódios de chuvas extremas e são potencializadas por características topográficas e pelo uso e cobertura do solo, seguida do aumento populacional, industrialização, desmatamento, incêndios urbanos e até mesmo assoreamento dos rios (SOUZA, 2016).

No contexto latino-americano, o Brasil é o país mais propenso à ocorrência de enchentes e inundações, resultando em prejuízos da ordem de bilhões de reais (WMO, 2019). Recentemente, diversos episódios desse tipo foram registrados no país, ocasionando perdas humanas e danos incalculáveis, como exemplificados pela tragédia ocorrida no estado do Rio Grande do Sul em 2024.

No que se refere ao Nordeste do Brasil, a região é frequentemente afetada por eventos recorrentes de chuvas intensas, que resultam em enchentes e inundações. O estado de Alagoas, em particular, é rotineiramente atingido por episódios de precipitações extremas que provocam inundações devastadoras. Dentre as áreas mais vulneráveis, destacam-se os municípios situados na bacia do rio Mundaú, frequentemente impactados por esses eventos, com registros de perdas materiais significativas e, de vidas humanas (OLIVEIRA, 2014).

A compreensão dos eventos climáticos extremos requer a análise dos sistemas meteorológicos de mesoescala, que atuam em intervalos intermediários de tempo e espaço, geralmente entre algumas horas e um dia, e cobrindo áreas que variam de dezenas a centenas de quilômetros. Esses sistemas são condicionados por diversos elementos,

incluindo a convecção atmosférica, as características da superfície terrestre e a influência do relevo, os quais exercem forte impacto na ocorrência e na intensidade de chuvas intensas (HALLAK, 2012).

Dentre os principais sistemas de mesoescala atuantes no Brasil, destaca-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), responsável por grande parte das chuvas na faixa equatorial do planeta. No contexto nacional, a ZCIT exerce influência significativa sobre o norte e parte do Nordeste do Brasil, especialmente durante os meses de verão. Trata-se de uma faixa de baixa pressão que se forma a partir da convergência dos ventos alísios dos hemisférios sul e norte, promovendo a ascensão do ar quente e úmido e, conseqüentemente, o desenvolvimento de nuvens profundas e precipitações intensas e persistentes (NOBRE; SHUKLA, 1996).

No território brasileiro, a ZCIT é particularmente atuante nas chuvas que ocorrem no litoral norte do Nordeste, abrangendo estados como Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. Entretanto, sua influência pode se estender a áreas mais ao sul da região, como Alagoas e Pernambuco, sobretudo em anos em que as anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) favorecem seu deslocamento meridional. Nesses casos, a ZCIT contribui para o aumento dos volumes pluviométricos também nas porções leste e agreste desses estados (FERREIRA et al., 2013).

Complementando a atuação da ZCIT, outro sistema de grande relevância para a climatologia do Nordeste brasileiro é o Distúrbio Ondulatório de Leste (DOL), também conhecido como ondas de leste. Esses distúrbios atmosféricos se propagam de leste para oeste no interior dos ventos alísios, geralmente a partir do continente africano em direção ao Atlântico tropical. Ao encontrarem condições atmosféricas favoráveis, como: elevada umidade, convergência de ventos e temperaturas elevadas na superfície oceânica, os DOL podem evoluir para sistemas convectivos organizados, provocando chuvas intensas e localizadas (HASTENRATH, 1991).

A ocorrência dos DOL é mais comum entre os meses de abril e agosto, sendo um dos principais mecanismos de geração de chuvas no leste nordestino, especialmente no Agreste e na Zona da Mata. Nessa faixa, estão inseridos estados como Alagoas e Pernambuco, onde episódios associados a DOL são historicamente responsáveis por acumulados expressivos de precipitação em períodos curtos, com potencial para desencadear enchentes, deslizamentos de terra e outros impactos socioambientais. Tais efeitos são frequentemente observados na bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL/PE), uma região historicamente vulnerável a eventos extremos de inundação (BARROS, et al., 2014).

Assim, tanto a ZCIT quanto os DOL são elementos-chave na dinâmica climática do Nordeste brasileiro, sendo fundamentais para a compreensão dos padrões de precipitação e a elaboração de estratégias de monitoramento e prevenção de desastres naturais na região.

2.3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.3.1. Métodos De Interpolação

Existem dois grupos principais de técnicas de interpolação espacial: os métodos determinísticos e os geoestatísticos. Os métodos determinísticos produzem superfícies com base exclusivamente nos valores medidos e em relações matemáticas predefinidas, considerando o grau de similaridade entre os pontos, como no método do Inverso da Distância Ponderada (IDW), ou promovendo suavização da superfície, como no método Spline. Por outro lado, os métodos geoestatísticos, como a Krigagem, incorporam as propriedades estatísticas da variabilidade espacial dos dados amostrados, utilizando modelos como o variograma para estimar a dependência espacial entre os pontos (STARKE, 2010).

Na sequência, serão apresentados os métodos de interpolação mais tradicionalmente empregados na estimativa de precipitação, com suas principais características, fundamentos teóricos, vantagens e limitações.

2.3.1.1. Método do Inverso da Distância (IDW)

O método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting) é uma técnica determinística amplamente utilizada para estimar valores em locais não amostrados, com base na premissa de que pontos mais próximos exercem maior influência sobre a estimativa do que pontos mais distantes (MIRANDA, 2005). No contexto da interpolação de precipitação, o IDW atribui pesos inversamente proporcionais à distância entre os pluviômetros e os locais de interesse, produzindo uma superfície contínua de chuva estimada (JIMENEZ, DOMEQ, 2008). Sua aplicação é relativamente simples e não exige ajustes estatísticos complexos, o que o torna uma escolha popular em estudos hidrológicos, no entanto, é recomendado para regiões com alta densidade de amostras (DEUS, et al. 2010).

Esse cálculo é realizado através a equação descrita por Mello et al. (2003) abaixo:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)}$$

Para a qual:

Z_p = atributo interpolado;

z_i = valor do atributo do i-ésimo ponto de amostragem;

d_i = distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado;

p = expoente utilizado; e

n = número de amostras.

2.3.1.2. Método Krigagem (KG)

Este método baseia-se em uma função contínua que descreve o comportamento espacial de uma variável em diferentes direções dentro de um espaço geográfico. Essa técnica permite estimar valores em locais não amostrados, considerando a variabilidade entre os pontos em função da distância que os separa, por meio da análise do semivariograma (GALLARDO, 2006).

O semivariograma é ferramenta que descreve como a similaridade entre os valores varia em função da distância entre os pontos. Com ele, é possível modelar o grau de dependência espacial. A determinação experimental do semivariograma para cada valor de h considera todos os pares de amostras $z(x)$ e $z(x+h)$, separadas pelo vetor distância h , a partir da equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Para a qual:

$\gamma(h)$ = semivariograma estimado;

$N(h)$ = número de pares de valores medidos; e

$z(x)$ e $z(x + h)$ = separados pelo vetor h .

2.3.1.3. Polígonos de Thiessen

O método de Thiessen é uma técnica determinística elaborada pelo meteorologista norte-americano Alfred H. Thiessen no início do século XX. Essa metodologia

fundamenta-se na construção de polígonos que delimitam áreas de influência de cada estação pluviométrica, sendo uma aplicação prática dos chamados diagramas de Voronoi.

Seu princípio está na suposição de que a precipitação medida em cada posto representa toda a região mais próxima a ele, desconsiderando variações topográficas ou climáticas. A delimitação dos polígonos é realizada com base na distância euclidiana entre os postos, considerando trajetos retilíneos no plano (SILVA; BACHA, 2011).

O procedimento de construção dos polígonos envolve três etapas principais: i) conectar as estações com segmentos de reta; ii) traçar as mediatrizes perpendiculares a cada segmento e iii) estender essas mediatrizes até que se encontrem com as de estações vizinhas, definindo assim os limites dos polígonos.

Cada polígono resultante representa a área de maior proximidade de determinada estação, e é utilizado no cálculo da precipitação média da bacia, ponderando os valores registrados de acordo com a área correspondente a cada posto (CARVALHO; SILVA, 2006).

A área de influência possui um peso perante a área total, expresso pela Equação 3:

$$W_i = \frac{A_i}{A} \quad (3)$$

onde:

W_i = fator de peso;

A_i = área de influência da estação; e

A = área total da bacia hidrográfica.

A precipitação média é expressa na Equação 4:

$$P_m = \sum A_i \frac{P_i}{A} \quad (4)$$

onde:

P_m = precipitação média na bacia (mm);

P_i = precipitação na estação (mm); e

A_i = área de influência da estação;

2.3.1.4. Spline

A Mínima curvatura ou Spline é um método de interpolação muito aceito e utilizado atualmente. Distinto de outros métodos de interpolações polinomiais, não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). Segundo Esri (2010), esse método é adequado para gerar superfícies que variam suavemente, como elevação, nível de água ou concentração de poluição.

Diferentemente de métodos como o IDW (Inverso da Distância), que produzem superfícies com transições abruptas, a interpolação por splines produz transições suaves entre os valores observados, gerando uma representação mais natural da variável espacial.

A interpolação spline cúbica é um método que utiliza polinômios de grau 3 para conectar pontos de dados de forma suave, garantindo a continuidade das primeiras e segundas derivadas da função. A equação geral para o um polinômio cúbico em um intervalo entre dois pontos X_i e X_{i+1} é dada por:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (5)$$

onde:

$S_i(x)$ é a spline no intervalo entre os X_i e X_{i+1} ,

a_i, b_i, c_i, d_i são os coeficientes a serem determinados,

X_i e X_{i+1} são os pontos conhecidos.

A spline cúbica busca satisfazer as seguintes condições para determinar os coeficientes:

1. A função passa pelos pontos conhecidos: $S_i(x) = z_i$,
2. Continuidade das primeiras e segundas derivadas: As derivadas de $S(x)$ são contínuas entre os pontos adjacentes.

Essas condições resultam em um sistema linear que pode ser resolvido para calcular os coeficientes a_i, b_i, c_i, d_i da spline.

A suavidade entre os pontos é garantida pela continuidade das derivadas de ordem superior, o que torna o método adequado para dados que exigem transições suaves, como séries temporais ou dados de precipitação.

2.3.2. Técnicas de Validação

A validação é uma etapa crucial no desenvolvimento e aplicação de métodos de previsão ou técnicas de interpolação utilizadas para estimar dados meteorológicos. Ela garante que as estimativas obtidas para locais não amostrados sejam precisas e confiáveis, assegurando a robustez dos resultados. Existem diversas técnicas disponíveis para avaliar o desempenho dos métodos de interpolação, e a escolha da abordagem mais adequada depende das características específicas do conjunto de dados utilizado.

Entre as técnicas de validação mais amplamente utilizadas na literatura para comparar as simulações com os valores observados, destacam-se a Validação Cruzada (LOOCV), a Divisão Treinamento/Teste e o Bootstrap (REFAEILZADEH, et al. 2018). Cada uma delas possui características específicas que influenciam sua aplicabilidade em diferentes contextos.

Esta seção abordará exclusivamente a validação cruzada, que é a técnica mais adequada para os objetivos do estudo, permitindo uma avaliação robusta do desempenho dos métodos de interpolação selecionados.

A validação cruzada do tipo leave-one-out (LOOCV) consiste em remover, de forma iterativa, uma estação pluviométrica do conjunto de dados e estimar o valor da precipitação nesse ponto com base apenas nas demais estações. Em seguida, o valor interpolado é comparado com o valor observado na estação omitida (VIOLA et al., 2010). Esse procedimento é repetido para todas as estações disponíveis, garantindo que cada ponto seja testado uma única vez como elemento de validação. Com os resultados obtidos, é possível calcular métricas para avaliar o desempenho dos métodos de interpolação.

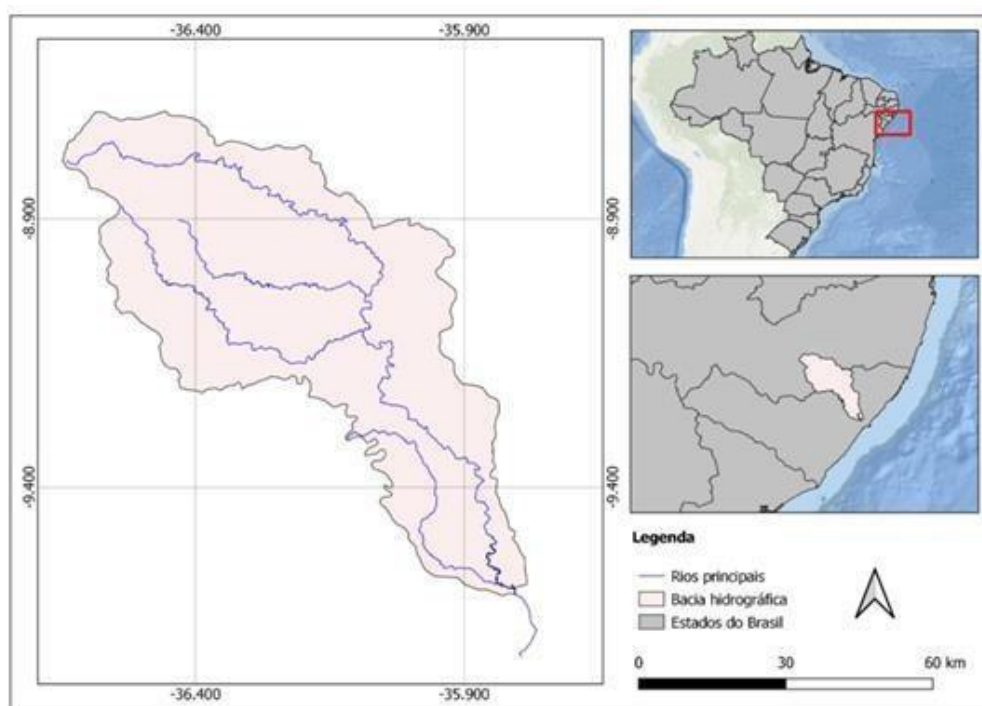
A validação cruzada é uma ferramenta essencial para verificar a capacidade de generalização dos métodos adotados, pois reduz o risco de sobreajuste ao modelo e oferece uma estimativa mais robusta do erro, especialmente em estudos com número limitado de pontos de medição, como é comum em bacias hidrográficas.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Mundaú está localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas (Figura 4). Essa bacia está situada aproximadamente entre as coordenadas geográficas 9° de latitude sul e 35° de longitude oeste, abrangendo uma área de cerca de 4.126 km², distribuída ao longo de 30 municípios desses dois estados. O seu rio principal é o Mundaú, que tem um curso d'água perene, com extensão aproximada de 141 km e apresenta uma vazão média de 28,96 m³/s, com valores extremos variando entre 7,47 m³/s (mínima) e 71,67 m³/s (máxima), (FARIAS, 2011). As principais características físicas da bacia encontram-se detalhadas na Tabela 1.

Figura 4 – Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Mundaú



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 1 – Características físicas da bacia hidrográfica do rio Mundaú

Características	Unidade	Valores
ÁREA (A)	km ²	4.126
PERÍMETRO (P)	m	350
FATOR DE FORMA (KF)	-	0,14
EXT. MEDIA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (I)	Km	6,08
DENSIDADE DE DRENAGEM	Km/km	0,26

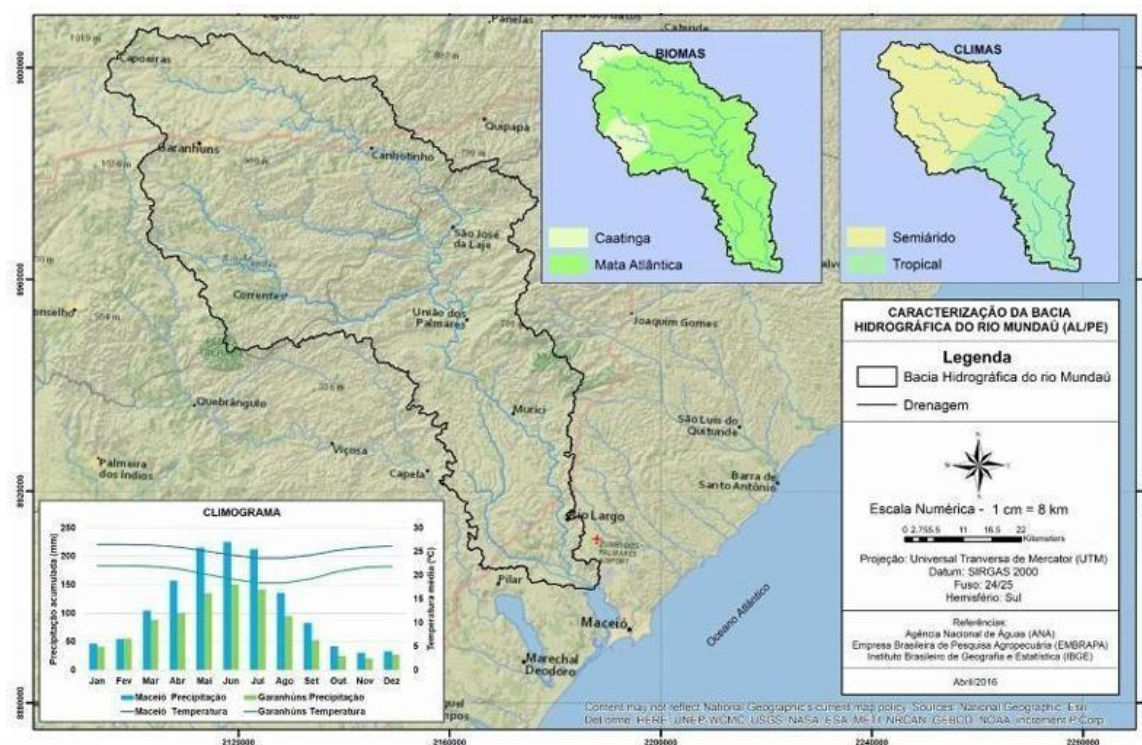
Fonte: Farias (2011).

3.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA RIO MUNDAÚ

A porção superior da bacia do Mundaú está inserida no bioma Caatinga, caracterizado por clima semiárido e incluído na região conhecida como Polígono das Secas. Já a parte inferior da bacia pertence ao bioma Mata Atlântica, que se estende até a foz do rio e apresenta clima tropical (Figura 5). A bacia encontra-se sob a influência de diversos sistemas atmosféricos, que variam desde mecanismos de média escala até sistemas sinóticos, os quais contribuem tanto para eventos de estiagem quanto para episódios de cheias intensas (COSTA, 2014).

O regime pluviométrico da bacia apresenta duas estações bem definidas, conforme evidenciado na Figura 5: uma estação seca, que ocorre entre os meses de setembro e fevereiro, e uma estação chuvosa, entre março e agosto, período que concentra aproximadamente 70% da precipitação anual. Destaca-se ainda que cerca de 50% do volume total anual de chuvas é registrado entre os meses de maio e julho (COSTA et al., 2016).

Figura 5 – Caracterização a bacia hidrográfica do rio Mundaú



Fonte: Alves (2016).

Com base em Fragoso Júnior (2010), os aspectos econômicos do trecho alagoano da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú envolvem uma diversidade de atividades produtivas. Entre as principais, destacam-se a agroindústria canavieira, com foco na produção de açúcar, álcool e bioeletricidade; a pecuária semi-intensiva; a pesca; a agricultura; a indústria; e o turismo. Segundo o autor, das 24 maiores usinas de açúcar presentes em Alagoas, 13 estão localizadas nessa região, sendo que 10 delas contam com destilarias.

Ainda conforme o estudo, a pecuária da bacia é baseada na criação de gado leiteiro e de corte, enquanto a agricultura inclui o cultivo de algodão, feijão, banana, milho e pastagens. Muitas dessas práticas são desenvolvidas em caráter de subsistência, sem o uso de técnicas de irrigação, o que torna os pequenos produtores vulneráveis às variações climáticas. Já o turismo, por sua vez, é apontado como uma atividade em crescimento, favorecida pelos recursos naturais e atrativos culturais da região.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. SELEÇÃO DOS EVENTOS E AQUISIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

Para a realização deste estudo, foram selecionados quatro eventos de cheia que ocorreram na bacia do rio Mundaú. A escolha desses eventos foi baseada na sua representatividade hidrológica e na disponibilidade de dados pluviométrico. Na Tabela 2 pode-se verificar o detalhamento das informações desses eventos.

Tabela 2 – Eventos hidrometeorológicos selecionados para o estudo

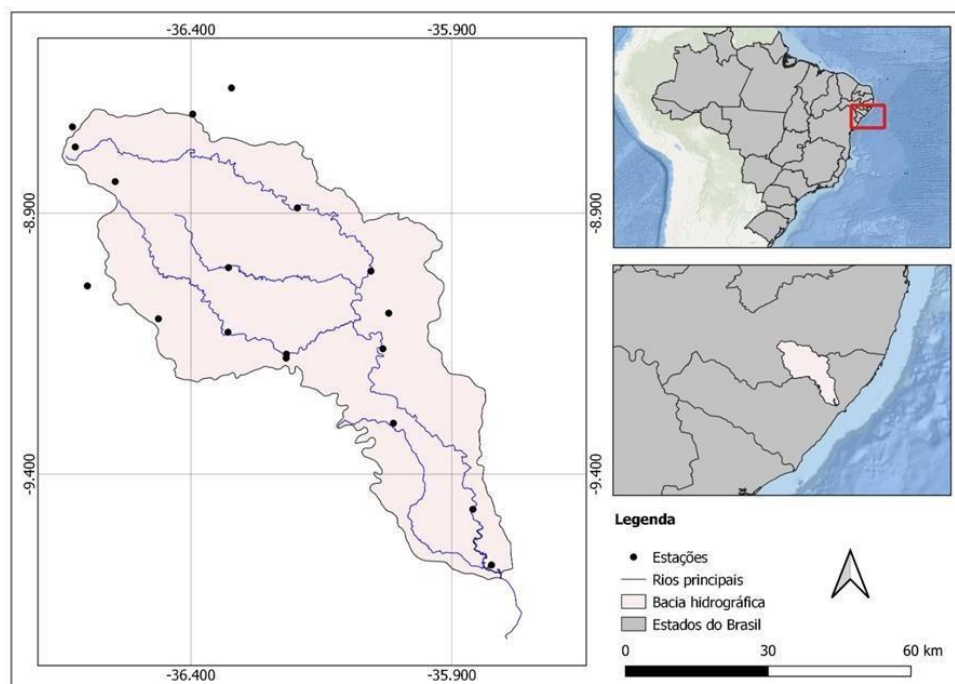
Evento	Data início	Data fim	Tempo (h)	Chuva acumulada (mm)	Vazão Max (m ³ /s)
1	29/06/2015	11/07/2015	312	242,3	355,7
2	18/05/2017	30/05/2017	312	920,7	697,0
3	28/06/2022	02/07/2022	116	448,6	1187,33

Fonte: elaborada pela autora.

Os dados de precipitação foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e junto ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). No total, foram utilizadas informações provenientes de 23 estações pluviométricas, distribuídas na bacia e em seu entorno, assegurando uma cobertura espacial adequada para a aplicação dos métodos de interpolação. A Figura 6 e Tabela 3 detalham a localização e informações adicionais dos postos pluviométricos e dados utilizados.

As estações pluviométricas utilizadas neste estudo registram precipitação com resolução temporal de 15 minutos. Após a obtenção dos dados, foi realizada uma verificação preliminar para identificação de falhas e inconsistências. Nos casos em que foram observadas lacunas pontuais, o preenchimento foi feito utilizando a média aritmética simples das estações vizinhas, selecionadas com base na proximidade espacial e no comportamento pluviométrico semelhante. Na sequência, os dados foram agrupados em acumulados por evento, a fim de facilitar a comparação entre os métodos de interpolação aplicados e representar de forma integrada a distribuição espacial da chuva associada a cada evento extremo.

Figura 6 – Distribuição espacial das estações pluviométricas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 3 – Informações técnicas das estações pluviométricas

UF	Município	Código	Fonte	Latitude	Longitude
AL	Atalaia	9870000	ANA	-9.5067	-36.0228
	Rio Largo	39770000	ANA/CPRM	-9.4672	-35.8597
	Santana do Mundaú	270810501A	CEMADEN	-9.17	-36.217
	Santana do Mundaú	39700000	CEMADEN	-9.1678	-36.2175
	São José da Laje	39720000	CEMADEN	-9.0041	-36.05111
	Satuba	270890701A	CEMADEN	-9.574	-35.824
	União dos Palmares	270930101A	CEMADEN	-9.161	-36.032
	União dos Palmares	39740000	ANA/CPRM	-9.1544	-36.7025
PE	Brejão	39800000	ANA	-9.03944	-36.59833
	Cachoeirinha	39530000	ANA/CPRM	-8.2902	-36.13592
	Caetés	260320701A	CEMADEN	-8.7733	-36.62167
	Caetés	260320701C	CEMADEN	-8.71847	-36.733805
	Calçado	260330601A	CEMADEN	-8.7375	-36.33778
	Canhotinho	39575000	ANA/CPRM	-8.8825	-36.2186
	Capoeiras	260380101A	CEMADEN	-8.7348	-36.627

	Correntes	260470001A	CEMADEN	-9.1280	-36.329
	Garanhuns	260600201C	CEMADEN	-8.8397	-36.54517
	Jupi	260830501A	CEMADEN	-8.7103	-36.3965
	Jurema	260840401A	CEMADEN	-8.7201	-36.143
	Lagoa do Ouro	260860201A	CEMADEN	-9.12055	-36.46239
	Lajedo	260880001A	CEMADEN	-8.6602	-36.326423
	Palmeirina	39715000	ANA/CPRM	-9.0019	-36.3264

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2. GERAÇÃO E INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA

Após a construção do banco de dados, foi elaborada uma tabela contendo, as estações meteorológicas disponíveis para cada evento de chuva extrema, suas respectivas coordenadas geográficas (longitude e latitude) e os totais acumulados de chuva. A interpolação dos dados de chuva na bacia hidrográfica foi realizada pelo método IDW e KRG. O método IDW conduzido pelo software QGIS 3.10. Já o método KRG foi realizado utilizando uma rotina computacional em Python – Google Colab. Durante o processo de interpolação, cada evento de chuva (Evento 1 – 2015; Evento 2 – 2017; Evento 3 – 2022) foram conduzidos individualmente (as estações utilizadas para cada evento e suas respectivas informações estão detalhadas no Apêndice A). Para fins de validação cruzada, adotou-se o procedimento de retirada sistemática de uma estação por vez (leave-one-out), utilizando as demais para gerar a superfície interpolada. Esse método possibilitou a obtenção de valores estimados de chuva nos pontos removidos, permitindo a análise quantitativa do desempenho da interpolação.

4.3. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho dos métodos de interpolação testados neste estudo, foram utilizadas as seguintes estatísticas: Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Índice de Concordância (d) e Índice de Confiança (c).

O MAE representa a média dos valores absolutos das diferenças entre os dados observados e os estimados. Por não considerar a direção do erro (super ou subestimação), o MAE fornece uma medida direta da magnitude média do erro, sendo expresso na mesma unidade da variável analisada (por exemplo, milímetros de precipitação). Valores mais baixos de MAE indicam melhor desempenho do método.

A RMSE, por sua vez, dá maior peso a erros maiores, pois considera o quadrado dos resíduos antes de calcular a média. Essa métrica é particularmente sensível a outliers e é útil para avaliar a precisão dos métodos em casos de grande variabilidade espacial. Para fins comparativos e de classificação qualitativa do desempenho dos métodos de interpolação, utilizou-se o RMSE normalizado pela média dos valores observados, conforme recomendado por Moriasi et al. (2007). Esse procedimento permite avaliar o erro de forma relativa ao volume observado, facilitando a interpretação dos resultados.

Já o (r) mede o grau de correlação entre os valores observados e os valores estimados. Seu valor varia de 0 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam forte relação linear entre os conjuntos de dados, ou seja, o modelo explica bem a variação observada na variável analisada.

O índice de concordância (d) foi proposto por Willmott (1981) e é usado para medir o quão bem os valores simulados/estimados concordam com os valores observados. Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita.

Já o índice de confiança (c) foi proposto por Camargo e Sentelhas (1997) como uma medida combinada para avaliar o desempenho de métodos de estimativa. Este índice é calculado a partir do produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) de Willmott (1981). Os valores de (c) variam entre 0 e 1, sendo que valores próximos a 1 indicam alta confiabilidade do método, caracterizada pela forte associação linear e pequena dispersão dos dados em torno da linha de 1:1. Valores mais baixos de (c) sugerem menor desempenho, podendo ser consequência de baixa correlação, baixa concordância, ou ambos.

As equações das métricas utilizadas estão descritas abaixo:

Erro Médio Absoluto (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O - E| \quad (4)$$

Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) normalizado:

$$RMSE_{rel} = \frac{RMSE}{\bar{O}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}}{\bar{O}} \quad (5)$$

Coeficiente de correlação de Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (6)$$

Índice de concordância (d)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

Índice de desempenho (c)

$$c = rd \quad (8)$$

Para as quais, O_i o valor observado, E_i o valor estimado pelo método de interpolação, e n o número total de observações, onde $\bar{O}$ é a média dos valores observados e $\bar{E}$ é a média dos valores estimados.

As faixas de classificação qualitativa utilizadas neste trabalho, com base no índice de confiança, seguem os critérios de Camargo e Sentelhas (1997). Os intervalos de classificação adotados para as métricas estão consolidados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação qualitativa do índice de Confiança C

Métrica	Valor	Classificação Qualitativa
C	> 0,85	Ótimo
	0,76 - 0,85	Muito bom
	0,66 - 0,75	Bom
	0,61 - 0,65	Mediano
	0,51 - 0,60	Sofrível
	0,41 - 0,50	Mau
	< 0,40	Péssimo

Fonte: elaborada pela autora a partir de Camargo e Sentelhas (1997).

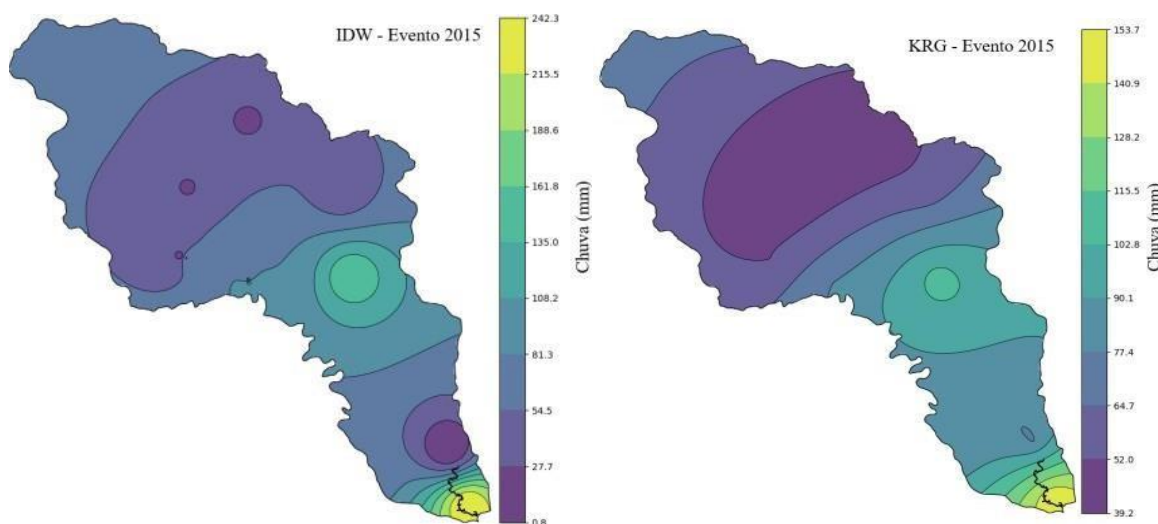
5. RESULTADOS

Para fins comparativos, as Figuras 7 a 9 ilustram as interpolações realizadas utilizando os métodos IDW e KRG para a precipitação acumulada por evento (2015, 2017 e 2022) na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

Vale ressaltar que, nesta apresentação, foram utilizados todos os dados das estações disponíveis para cada evento. Ou seja, esta é a interpolação base, que serve como referência para comparação com as demais iterações (rodadas para validação) realizadas durante o estudo.

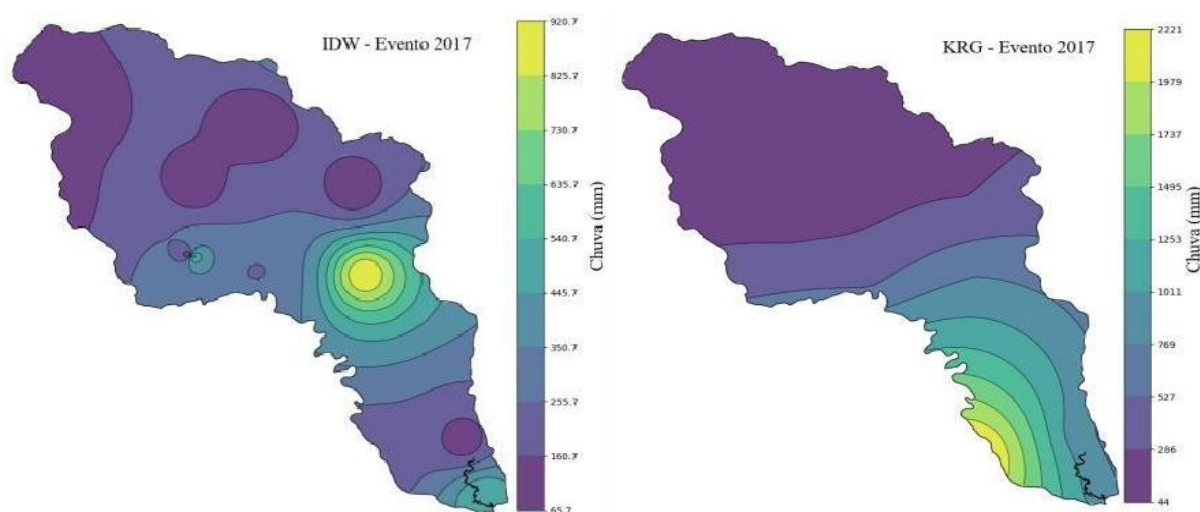
A partir dos mapas de chuva interpolada, observa-se que o método IDW gera variações abruptas de precipitação, destacando valores extremos próximos às estações, como no núcleo de chuva intensa de 2017. Já o método KRG produz uma distribuição mais suave e coerente espacialmente, por considerar a dependência entre os pontos. Apesar das diferenças visuais, ambos os métodos indicam padrões semelhantes de áreas com mais e menos chuva.

Figura 7 – Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG no Evento 1 (2015)



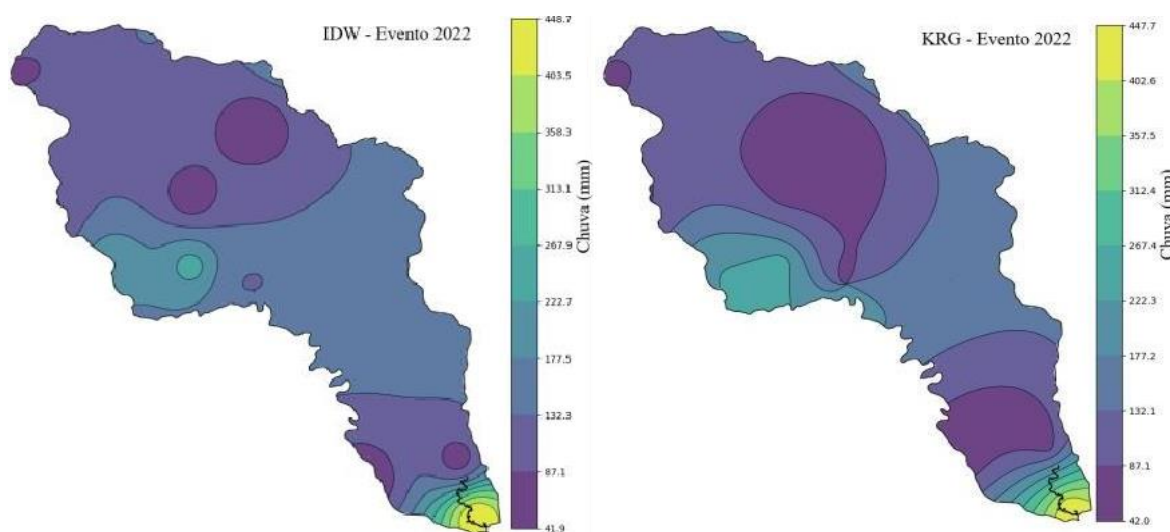
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 8 – Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG no Evento 2 (2017)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 9 – Comparação da precipitação interpolada pelo método IDW e KRG no Evento 3 (2022)



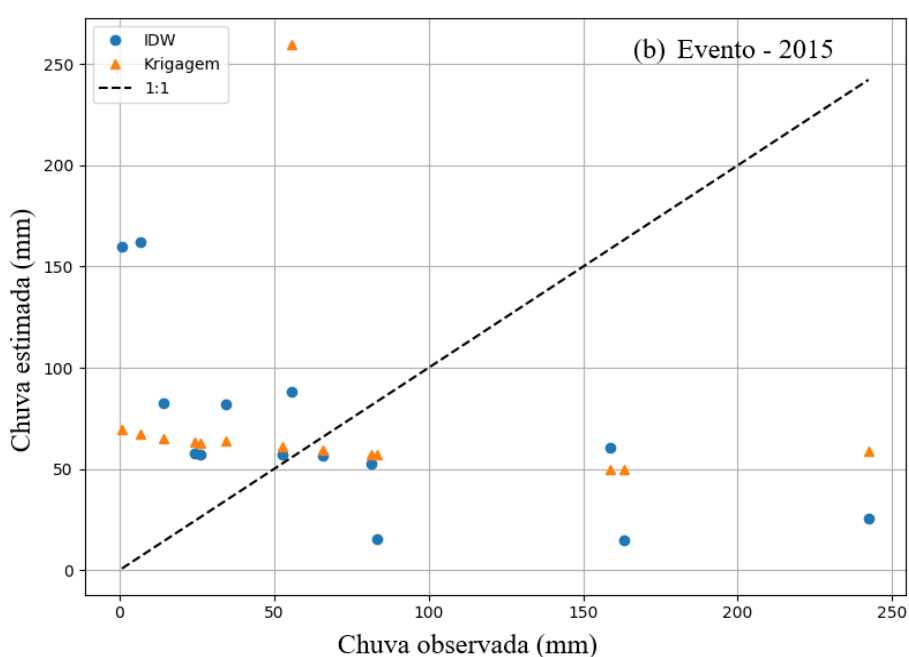
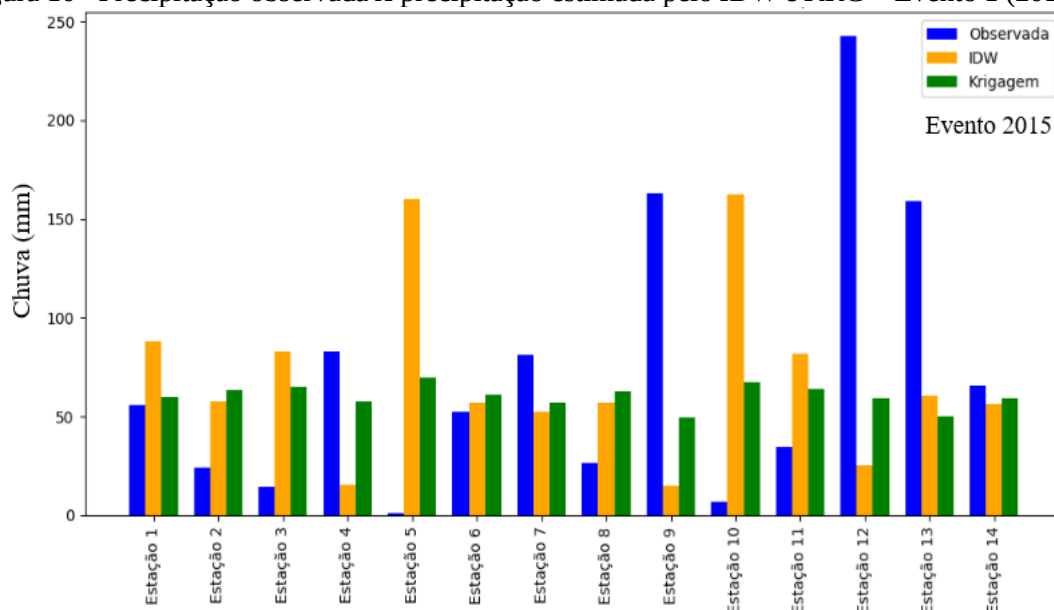
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 10 apresenta os resultados da validação para o evento de 2015. No painel (a), observa-se a comparação entre os valores observados nas estações e aqueles estimados pelos métodos de interpolação IDW e KRG. Nota-se que ambos os métodos tendem a suavizar os valores extremos, subestimando picos de chuva registrados em algumas estações (como E8, E11 e E13), sendo esse efeito mais pronunciado no método IDW.

O painel (b) exibe a relação entre os valores de precipitação observada e os valores estimados pelos métodos, com a linha tracejada representando a linha 1:1 (estimativa

ideal). Observa-se que, em geral, tanto o IDW quanto a Krigagem apresentam dispersão significativa em relação à linha ideal, com tendência à subestimativa nos maiores acumulados. No entanto, a KRG apresenta desempenho ligeiramente superior, com menor dispersão e maior proximidade dos pontos em relação à linha 1:1, indicando maior capacidade de reprodução espacial da variabilidade da chuva.

Figura 10 - Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG – Evento 1 (2015)

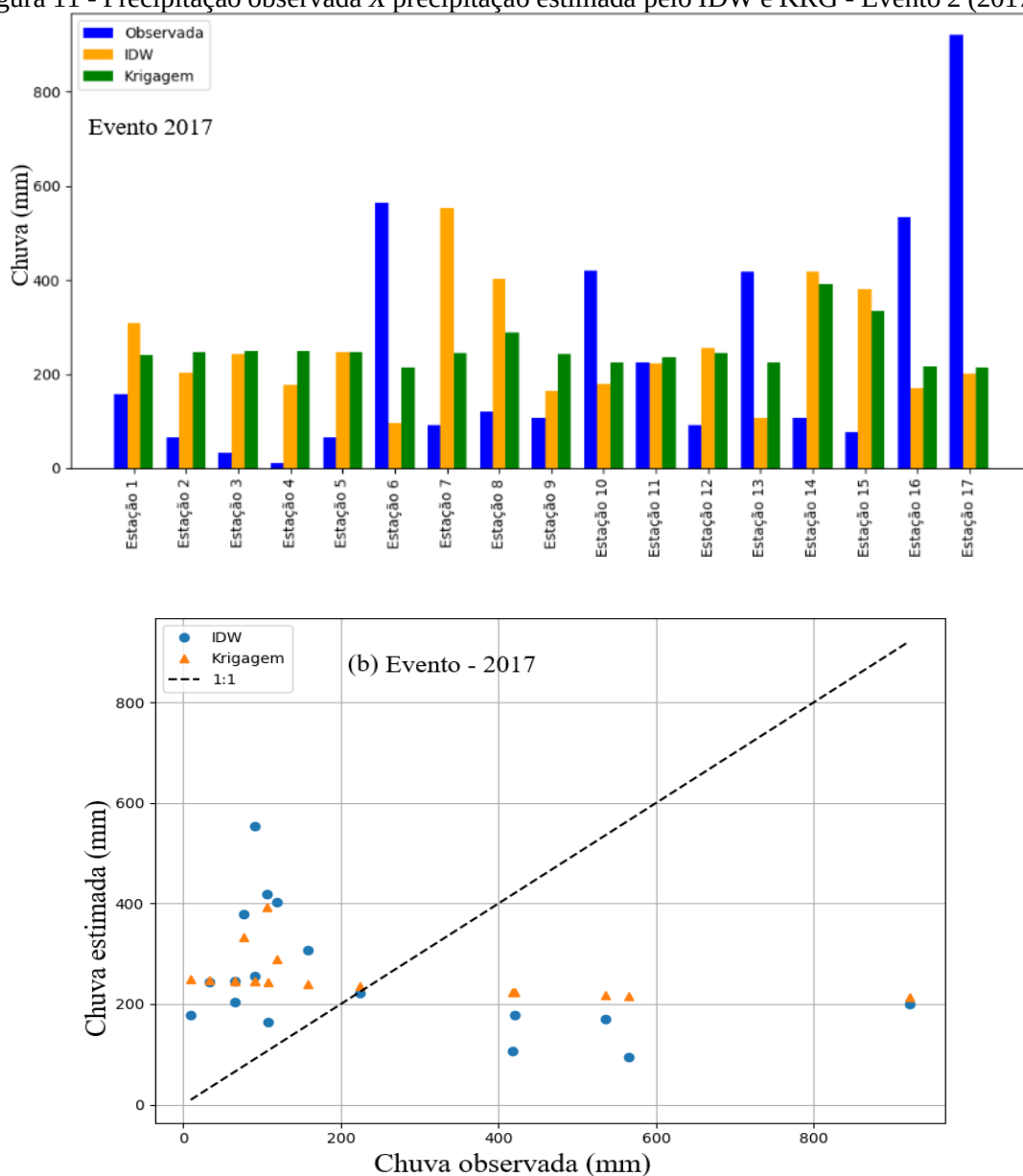


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 11 apresenta os resultados do Evento 2, ocorrido em 2017. No painel (a), observa-se que, assim como no evento anterior, que ambos os métodos tendem a suavizar os extremos, com destaque para a significativa subestimação dos maiores acumulados observados, especialmente nas estações E6, E14 e E17. A Krigagem apresenta valores um pouco mais próximos da série observada em comparação ao IDW, mas ainda assim não consegue reproduzir adequadamente os picos.

O painel (b) evidencia o desvio das estimativas, sobretudo para os valores mais elevados de precipitação. O IDW, mais uma vez, tende a subestimar fortemente os maiores acumulados, enquanto a KRG apresenta um desempenho levemente superior, embora ainda aquém do ideal. Esses resultados indicam a limitação dos métodos em captar adequadamente a variabilidade espacial da precipitação extrema neste evento específico.

Figura 11 - Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG - Evento 2 (2017)

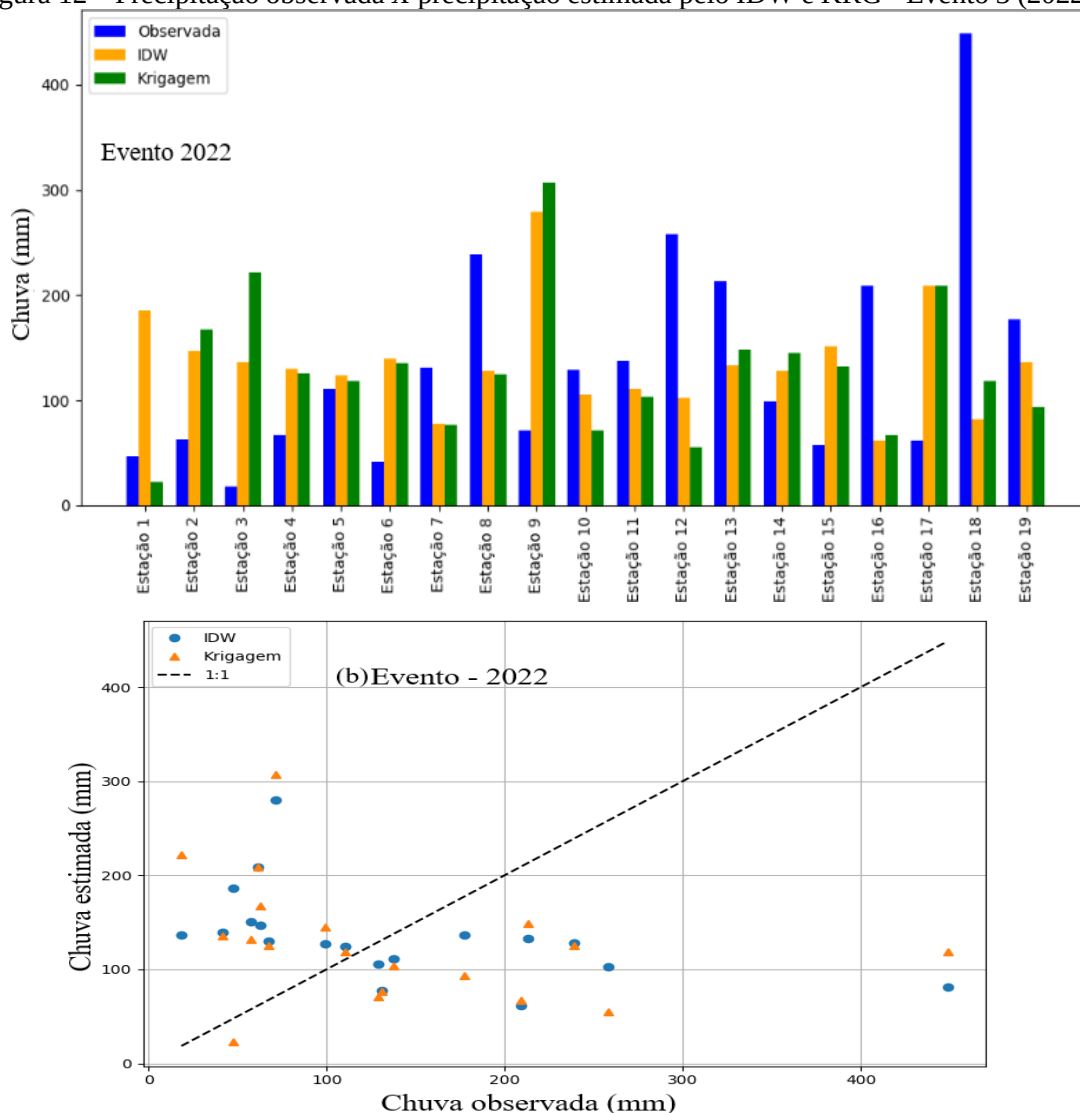


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao analisar os resultados das interpolações realizadas para o Evento 3 (Figura 12), observa-se, mais uma vez, que os dois métodos voltam a apresentar uma tendência à suavização dos dados, especialmente nos valores extremos. A KRG, no entanto, mostra-se levemente mais sensível à variação espacial da precipitação, conseguindo capturar melhor alguns picos, como nas estações E13 e E18, em comparação ao IDW.

No painel (b), a relação entre os valores observados e estimados evidencia uma melhora geral em relação aos eventos anteriores, com menor dispersão e maior alinhamento dos pontos próximos à linha 1:1. Apesar disso, ainda se verifica subestimação para os maiores valores de precipitação observada, com maior destaque para o método IDW. A KRG apresenta distribuição de pontos mais próxima da linha ideal, sugerindo maior acurácia para este evento. Esses resultados reforçam a superioridade relativa da KRG, especialmente em eventos com maior complexidade espacial.

Figura 12 – Precipitação observada X precipitação estimada pelo IDW e KRG - Evento 3 (2022)



A Tabela 5 apresenta o resumo dos índices estatísticos calculados para analisar o desempenho dos interpoladores utilizados para a espacialização da chuva acumulada por eventos ocorridos na bacia hidrográfica do rio Mundaú.

No evento de 2015, a KRG apresentou um desempenho ligeiramente superior ao IDW, com menor MAE (68,62 mm frente a 78,68 mm) e menor RMSE (1,26 mm frente a 1,41 mm). O valor do coeficiente de correlação (r) foi negativo para ambos os métodos, indicando uma correlação inversa entre os valores observados e estimados, sendo menos acentuado na KRG (-0,15) do que no IDW (-0,65). Ainda assim, os valores do índice de concordância (d), 0,05 para IDW e 0,07 para KRG, e de desempenho (c), ambos próximos de zero ou negativos, indicam que nenhum dos métodos apresentou boa capacidade de representar adequadamente os dados observados, sendo o desempenho classificado como "Péssimo".

Para o evento de 2017, a KRG novamente apresentou MAE e RMSE inferiores aos do IDW, sugerindo erro médio absoluto menor. Entretanto, o coeficiente de correlação r permaneceu negativo em ambos os métodos (-0,45 para IDW e -0,47 para KRG), indicando novamente a ausência de tendência linear positiva entre observado e estimado. O índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c) apresentaram valores extremamente baixos, reforçando a classificação de desempenho ruim.

No evento de 2022, os dois métodos apresentaram desempenhos similares em termos de MAE (105,19 mm para IDW e 109,49 mm para KRG). No entanto, o IDW apresentou pior correlação ($r = -0,52$) em comparação à KRG ($r = -0,32$). Notavelmente, a KRG obteve o maior valor de índice de concordância entre todos os eventos analisados ($d = 0,13$), embora ainda insuficiente para uma boa performance, com " c " novamente negativo.

Tabela 5 – Resumo das métricas estatísticas para análise de desempenho dos métodos IDW e KRG para as chuvas acumuladas por eventos

Evento	Interpolador	MAE	RMSE	r	d	c	Desempenho
2015	IDW	78.68	1.41	-0.65	0.05	-0.03	Péssimo
	KRG	68.62	1.26	-0.15	0.07	-0.01	Péssimo
2017	IDW	266.92	1.34	-0.45	0.06	-0.03	Péssimo
	KRG	225.32	1.13	-0.47	0.01	0.01	Péssimo
2022	IDW	105.19	0.98	-0.52	0.02	-0.01	Péssimo
	KRG	109.49	1	-0.32	0.13	-0.04	Péssimo

Fonte: elaborada pela autora.

A partir dos resultados obtidos, de maneira geral, fica evidente que os métodos de interpolação espacial analisados não foram capazes de estimar satisfatoriamente os valores de precipitação nos eventos selecionados, conforme indicado pelos baixos valores dos coeficientes r , d e c . Esse desempenho insatisfatório pode estar relacionado a diversos fatores, como a elevada variabilidade espacial da precipitação, a escassez ou distribuição irregular das estações pluviométricas, além das limitações inerentes aos próprios métodos de interpolação, especialmente quando aplicados a eventos extremos. Dessa forma, tanto o método de IDW quanto a KRG Ordinária, nas condições avaliadas, apresentaram desempenho limitado na representação da distribuição espacial da chuva.

Resultados semelhantes foram observados por Lucas et al. (2013) ao aplicarem métodos de interpolação espacial para estimar a precipitação no município de Belo Horizonte. O estudo identificou um desempenho insatisfatório desses métodos, reforçando que, apesar das diferenças conceituais entre o IDW e a Krigagem, ambos podem apresentar limitações semelhantes. Tais limitações são especialmente evidentes em áreas com cobertura esparsa de dados ou distribuição espacial irregular das estações pluviométricas, fatores que comprometem significativamente a acurácia na estimativa da precipitação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que ambos os interpoladores, IDW e Krigagem Ordinária, apresentaram desempenho estatístico insatisfatório na estimativa da precipitação. No entanto, a KRG mostrou-se ligeiramente superior ao IDW nos eventos de 2015 e 2017. Para o evento de 2022, os dados indicam que, embora se verifiquem pequenas variações entre os interpoladores, ambos os métodos demonstram uma capacidade preditiva inadequada.

A baixa performance pode ser atribuída a diversos fatores, como a complexa distribuição espacial das chuvas convectivas, a escassez e má distribuição das estações pluviométricas, ao fato de a aplicação ter sido a chuva acumulada por evento, e as limitações intrínsecas dos métodos, especialmente em eventos extremos. Além disso, a maior parte das estimativas geradas apresentou subestimações ou superestimações acentuadas, prejudicando a confiabilidade dos mapas de isoietas gerados.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas na interpolação de dados acumulados por evento, recomenda-se que estudos futuros considerem a aplicação dos métodos de interpolação espacial utilizando séries de precipitação em resoluções menores, como dados horários ou diários.

Essa abordagem permite preservar a variabilidade temporal da chuva, oferecendo uma representação mais fiel das flutuações espaciais e possibilitando que os interpoladores, como o IDW e a KRG Ordinária, captem com maior precisão os padrões de distribuição da precipitação. Além disso, trabalhar com intervalos menores pode minimizar distorções decorrentes de acumulações exageradas em pontos isolados, reduzindo o risco de superestimativas ou subestimativas extremas e, assim, melhorando o desempenho estatístico dos métodos.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. L. Efeito de teleconexões climáticas na variabilidade espaço-temporal dos índices de disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica sob transição climática (tropical/semiárido). 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

BARROS, A. H. M.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Climatologia dos distúrbios ondulatórios de leste (DOL) sobre o oceano Atlântico Tropical e o leste do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. 4, p. 499–512, 2014.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Hidrologia. 2006. Disponível em: <<https://bit.ly/2ul7WB1>>. Acesso em: abr. 2025.

CEPED – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: Volume Alagoas. Florianópolis: UFSC, 2011.

COSTA, D. D. Previsão hidrológica de longo prazo baseada em componentes climáticas em bacias hidrográficas semiáridas/tropicais. 2014. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

COSTA, D. D. et al. Understanding drought dynamics during dry season in Eastern Northeast Brazil. *Frontiers in Earth Science*, v. 4, n. June, 2016.

COSTA, F. A.; LEITE, A. C. C.; CARVALHO, R. M. C. Eventos extremos na bacia do Mundaú: um estudo referente aos danos socioambientais na enchente de 2010 e o alerta em 2017. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2019. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2332>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

COUTINHO, E. D. C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (dols) na região do centro de lançamento de alcântara-ma. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, n. 2, p. 193–203, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200005>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DEUS, B. V. et al. Interpolação pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife. Anais... Recife: UFPE, 2010. p. 1–7.

FARIAS, V. N. C. Simulação da produção de sedimentos para bacia hidrográfica do rio Mundaú através do modelo SedNet. 2020. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

FARIAS, V. N. C. et al. Modelagem hidrológica de enchentes repentinas a partir de estimativas de chuva por radar meteorológico. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS

FERREIRA, N. J.; MELLO, R. W.; LYRA, A. A. Sistemas meteorológicos causadores de precipitações intensas no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 265–285, 2013.

FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. B. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. [S.l.: s.n.], [2010]. 20 p.

GALLARDO, A. Geostadística. *Ecosistemas, Móstoles*, v. 15, n. 3, p. 1–11, 2006.

HASTENRATH, Stefan. *Climate Dynamics of the Tropics*. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

HÍDRICOS DO NORDESTE (XVII SRHNE), 2024, João Pessoa. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2024. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16963>>. Acesso em: 11 abr. 2025.

JIMENEZ, K. Q.; DOMEQ, F. M. Estimação de chuva usando métodos de interpolação. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 16 p.

LOPES, J. L. S.; DOMINGOS, L. L. População em perigo: rios urbanos e áreas vulneráveis a inundações – o caso do município de União dos Palmares, Alagoas, Brasil. *Percursos, Florianópolis*, v. 21, n. 46, 2020. Disponível em: <<https://portal.amelica.org/ameli/journal/815/8154526006/html/>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MIRANDA, J. I. Fundamentos de sistemas de informações geográficas. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2005. 425 p.

NOBRE, Carlos A.; SHUKLA, Jagadish. Variations of Sea Surface Temperature and Rainfall in Tropical Brazil. *Journal of Climate*, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996

NUNES, L. H. Urbanização e desastres naturais. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

OLIVEIRA, D. L., SOUZA, V. C. B., FRAGOSO JR., C. R. Análise hidrológica da cheia excepcional ocorrida em junho de 2010 nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 279–293, jul./set. 2014.

REFAEILZADEH, P.; TANG, L.; LIU, H. Cross-validation. In: LIU, L.; ÖZSU, M. T. (ed.). *Encyclopedia of database systems*. New York: Springer, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8265-9_565. Acesso em: 18 de abr. 2025.

SGB – Serviço Geológico do Brasil. Relatório anual do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do rio Mundaú – 2022. Brasília: SGB/CPRM, 2023. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/23296>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SILVA, M. S. A. da et al. Análise das inundações históricas em Alagoas e estratégias de mitigação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 4, p. 1015–1029, 2014.

SILVA, R. R.; BACHA, C. J. C. Polígonos de Voronoi como alternativa aos problemas das áreas mínimas comparáveis: uma análise das mudanças populacionais na Região Norte do Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Populacionais*, São Paulo, 2011.

SOUSA FILHO, V. R. de et al. Dinâmica dos focos de calor nas mesorregiões climáticas do Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, p. 1–15, 2022.

STARKE, G. Comparação de métodos de interpolação espacial para a precipitação máxima diária de diferentes períodos de retorno em uma área do Centro-Oeste brasileiro, no Distrito Federal e Estado de Goiás. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos) – Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.R. de; PINTO, D.B.F.; MELLO, J.M. de; ÁVILA, L.F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

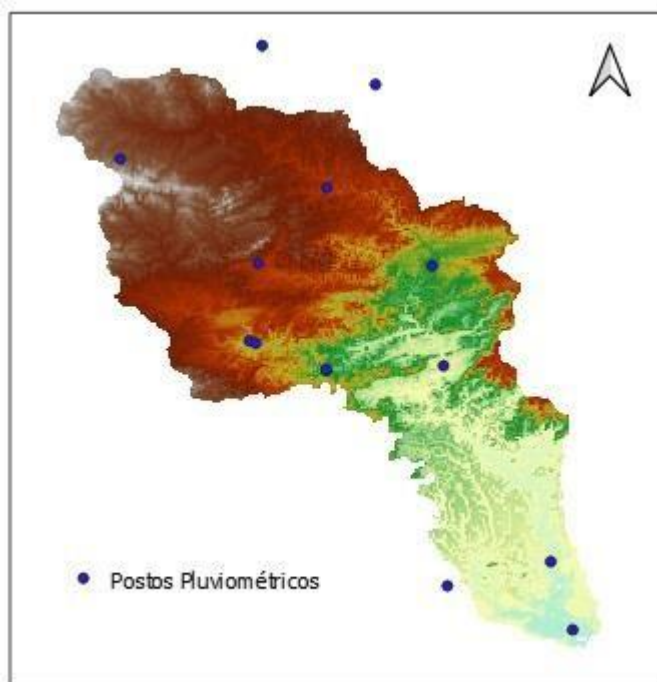
WALTER, B. M.; MILAN, P. Cenário de tsunami no Nordeste. *Gazeta do Povo*, 21 jun. 2010. Il. color. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/cenario-de-tsunamino-nordeste-1dvohyhgmbfjl91c0l0kgxu6/>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

World Meteorological Organization (WMO). (2020). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*. Geneva: WMO. Disponível em: https://wgms.ch/downloads/2019_WMO.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.

APÊNDICE A

Distribuição espacial das estações pluviométricas para o Evento 1 (2015).



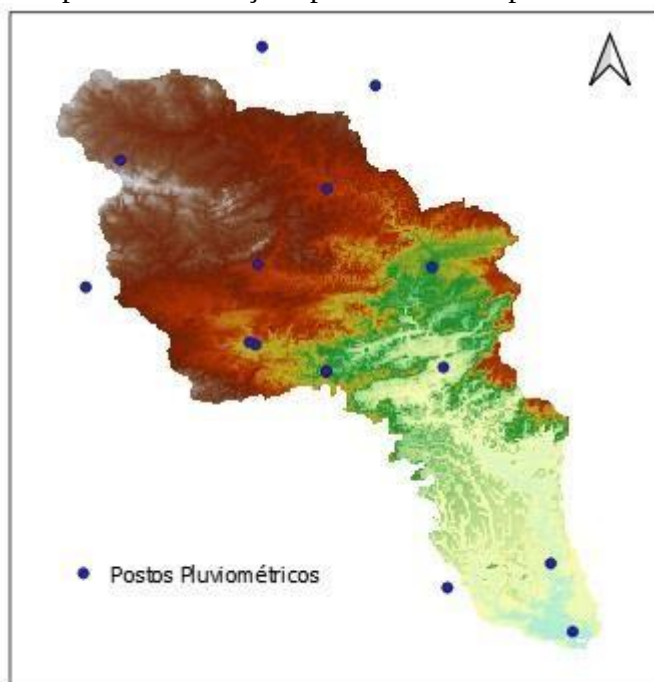
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Estações pluviométricas e dados utilizados no Evento 1 (2015)

ID	Nome	Código	LAT	LON	Chuva Média
Estação 1	Atalaia	39870000	-9.302	-35.859	55,54
Estação 2	Canhotinho	39575000	-8.89	-36.196	24,2
Estação 3	Correntes II	39689000	-9.124	-36.339	14,11328571
Estação 4	Correntes	260470001A	-9.128	-36.329	83,3
Estação 5	Rio Largo	39770000	-9.467	-35.859	0,8
Estação 6	Garanhuns	260600201C	-8.839	-36.545	65,6
Estação 7	Jurema	260840401A	-8.720	-36.143	52,58443632
Estação 8	Lajedo	260880001A	-8.660	-36.322	81,34012196
Estação 9	Palmeirina	39715000	-9.004	-36.328	26,15
Estação 10	Santana do Mundaú	270810501A	-9.170	-36.217	163,05
Estação 11	Santana do Mundaú	39700000	-9,1678	-36,2175	6,769
Estação 12	São José da Laje	39720000	-9.011	-36.055	34,55
Estação 13	Satuba	270890701A	-9.574	-35.824	242,31
Estação 14	União dos Palmares	270930101A	-9.091	-36.032	158,86

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Distribuição espacial das estações pluviométricas para o Evento 2 (2017).



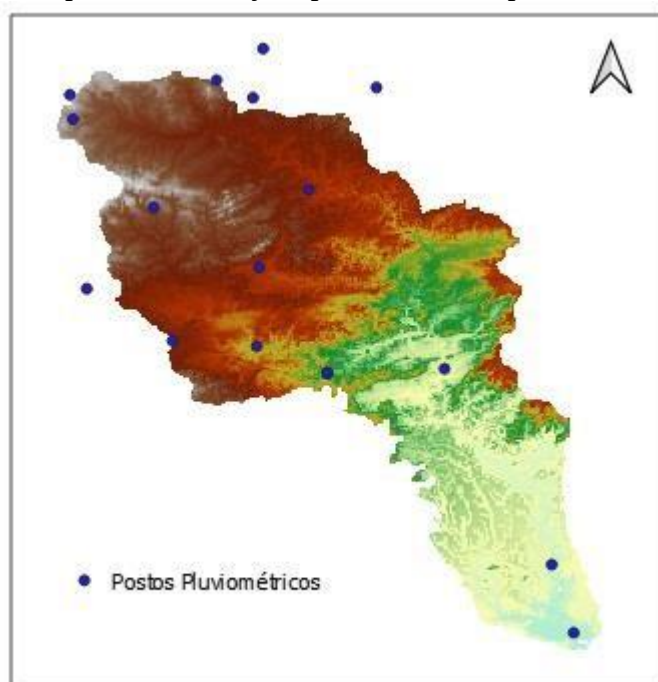
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Estações pluviométricas e dados utilizados no Evento 2 (2017)

ID	Nome	Código	LAT	LON	Chuva Média
Estação 1	Atalaia	39870000	-9,3024	-36,0122	158,38
Estação 2	Brejão	39800000	-9,03944	-36,59833	64,95
Estação 3	Cachoerinha	39530000	-8,29020	-36,13590	33,25
Estação 4	Caetés	260320701C	-8,43070	-36,4402	9,6
Estação 5	Canhotinho	39575000	-8,89	-36,196	65,65
Estação 6	Correntes	260470001A	-9,12800	-36,32900	564,68
Estação 7	Correntes II	39689000	-9,13	-36,33	90,95
Estação 8	Faz Boa Fortuna	39770000	-9,2802	-35,5135	119,3
Estação 9	Garanhus	260600201C	-8,83976	-36,54517	108
Estação 10	Jurema	260840401A	-8,72	-36,143	420,2
Estação 11	Lajedo	260880001A	-8,66027	-36,32232	224,4
Estação 12	Palmeirina	39715000	-9,004	-36,328	91,35
Estação 13	Sant do Mundau	270810501A	-9,17000	-36,21700	417,97
Estação 14	Sant do Mundau	39700000	-9,1678	-36,2175	106,1
Estação 15	S. Jose da Laje	39720000	-9,011	-36,055	77,3
Estação 16	Satuba	270890701A	-9,57400	-35,82400	534,86
Estação 17	União dos Palmares	270930101A	-9,16100	-36,03200	920,7

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Distribuição espacial das estações pluviométricas para o Evento 3 (2022).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Estações pluviométricas e dados utilizados no Evento 3 (2022)

ID	Nome	Código	LAT	LON	Chuva Média
Estação 1	Atalaia	39870000	-9,3024	-36,0122	47,3
Estação 2	Brejão	39800000	-9,03944	-36,59833	62,6
Estação 3	Cachoerinha	39530000	-8,29020	-36,13590	18,5
Estação 4	Caetés	260320701A	-8,77333	-36,62167	67,235
Estação 5	Calçado	260330601A	-8,73750	-36,337788	110,56
Estação 6	Canhotinho	39575000	-8,89	-36,196	41,9
Estação 7	Capoeriras	260380101A	-8,73480	-36,62700	131,12
Estação 8	Correntes	260470001A	-9,12800	-36,32900	239
Estação 9	Faz. Boa Fortuna	39770000	-9,2802	-35,5135	71,5
Estação 10	Garanhuns	260600201C	-8,83976	-36,54517	128,8
Estação 11	Jupi	260830501A	-8,71030	-36,39560	137,93
Estação 12	Jurema	260840401A	-8,72	-36,143	258
Estação 13	Lagoa do Ouro	260860201A	-9,12055	-36,46239	213,13
Estação 14	Lajedo	260880001A	-8,66027	-36,32232	99
Estação 15	Palmeirina	39715000	-9,004	-36,328	57,55
Estação 16	Santa Mundau	270810501A	-9,17000	-36,21700	208,99
Estação 17	Santana Mundaú	39700000	-9,1678	-36,2175	61,25
Estação 18	Satuba	270890701A	-9,57400	-35,82400	177,43
Estação 19	União dos Palmares	270930101A	-9,16100	-36,03200	448,66

Fonte: Elaborado pela autora (2025).