

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO PARA GESTÃO DE RISCOS A DESASTRES NATURAIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ

*Bianca Maria Lima Cruz Pereira¹; Rafaela Faciola Coelho de Souza²; Ayrton Martim Oliveira
Dias Melo³ & Juciela Cristina dos Santos⁴*

Abstract: The Metropolitan Region of Maceió (RMM), marked by socio-environmental vulnerabilities, frequently experiences natural disasters triggered by intense rainfall. This study analyzes the relationship between rainfall patterns and disaster occurrences from 1994 to 2023, using daily data from 25 rain gauges and records from the Digital Atlas of Disasters in Brazil. Results indicate strong rainfall seasonality, with peaks between May and July coinciding with the highest number of disaster events. The analysis shows that five-day accumulated rainfall is more relevant for disaster occurrence than isolated daily rainfall, highlighting the role of soil saturation. Municipalities such as Murici and Rio Largo recorded events under moderate rainfall, reflecting greater physical and urban vulnerability. Soils with low permeability, such as cohesive Latosols and Gleysols, combined with disordered urban expansion and unfavorable topography, intensify the impacts. The study concludes that integrating climatic, pedological, and land-use data is essential for urban planning and risk mitigation in the RMM. Monitoring rainfall thresholds is crucial to prevent future disasters.

Resumo: A Região Metropolitana de Maceió (RMM), marcada por vulnerabilidades socioambientais, enfrenta recorrentes desastres naturais associados a chuvas intensas. Este estudo analisa a relação entre o regime pluviométrico e a ocorrência desses eventos entre 1994 e 2023, considerando dados diários de 25 estações pluviométricas e registros do Atlas Digital de Desastres no Brasil. Os resultados indicam forte sazonalidade nas precipitações, com picos entre maio e julho, coincidindo com o maior número de desastres. A análise revelou que o acúmulo de chuva em cinco dias é um fator mais relevante para a ocorrência de desastres do que a chuva diária isolada, evidenciando o papel da saturação do solo. Municípios como Murici e Rio Largo apresentaram eventos mesmo com volumes moderados, refletindo maior vulnerabilidade física e urbana. Solos com baixa permeabilidade, como Latossolos coesos e Gleissolos, combinados à urbanização desordenada e topografia desfavorável, intensificam os impactos. Conclui-se que a integração entre dados climáticos, pedológicos e de uso do solo é fundamental para o planejamento urbano e a mitigação de riscos na RMM, sendo essencial o monitoramento de limiares pluviométricos para prevenir novos desastres.

Palavras-Chave – Gestão de riscos; Análise pluviométrica; Eventos Extremos.

¹⁾ Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, bianca.pereira@ceca.ufal.br

²⁾ Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, rafaela.ferreira@ceca.ufal.br

³⁾ Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia/UFAL, ayrton.melo@ctec.ufal.br

⁴⁾ Laboratório de Regularização Fundiária, Campus de Engenharia e Ciências Agrárias/UFAL, juciela.santos@ceca.ufal.br

INTRODUÇÃO

Compreender os padrões espaciais e temporais da precipitação auxilia o planejamento urbano, a gestão dos recursos hídricos e a mitigação de riscos associados a desastres naturais, especialmente em regiões costeiras tropicais com elevada vulnerabilidade socioambiental, como é o caso da Região Metropolitana de Maceió (RMM). Conforme Ribeiro et al. (2022) e Hummell et al. (2016), no Brasil, as regiões Norte e Nordeste concentram algumas das cidades mais vulneráveis, onde os fatores climáticos são destacados como um dos principais responsáveis pelo baixo nível de desenvolvimento e pela acentuada vulnerabilidade social.

Ademais, Huang et al. (2015) apresentam que a principal influência na ocorrência de deslizamentos está associada às altas intensidades de precipitação, independentemente de a precipitação anual estar ou não dentro da média esperada. Da mesma forma, os eventos extremos, de acordo com Rodrigues et al. (2020), são caracterizados por possuir, geralmente, uma raridade em acontecer, realizados através de variáveis meteorológicas como a precipitação, temperatura, entre outras. São esses eventos que podem se tornar responsáveis por sobrecarregar e comprometer a infraestrutura de uma cidade e prejudicar a população, através de inundações, secas, entre outras ações (Firmino, 2024). Para Tabari et al. (2019), a análise das tendências de precipitação extrema fornece informações que podem ser utilizadas para o planejamento dos recursos hídricos, a avaliação de riscos hidrológicos e o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas.

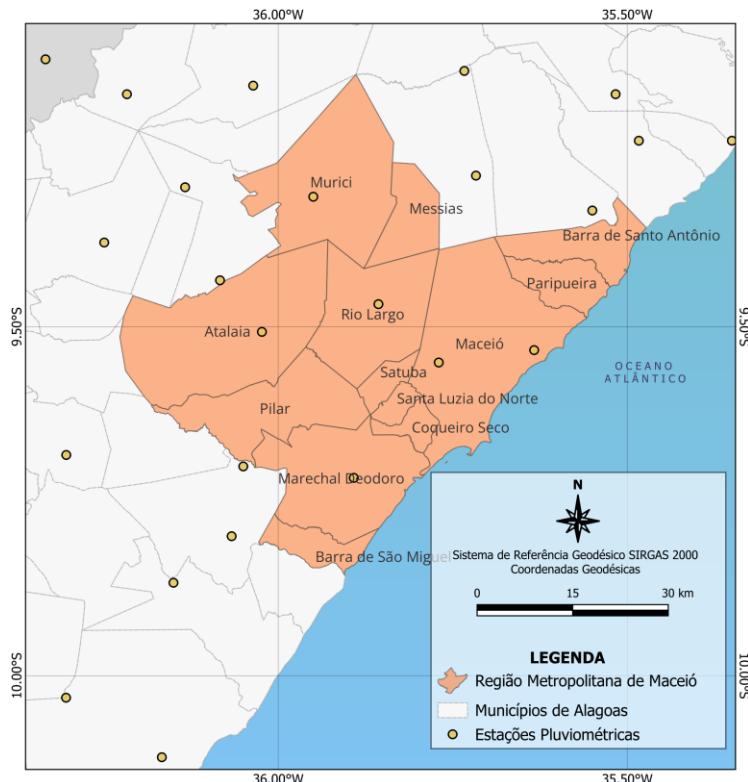
A Região Metropolitana de Maceió (RMM) enfrenta desafios relacionados à sua vulnerabilidade físico-ambiental, especialmente diante da incidência de chuvas intensas. O regime pluviométrico da região, concentrado entre abril e agosto, favorece a ocorrência de inundações e deslizamentos, impactando áreas densamente ocupadas e ambientalmente frágeis (Melchior et. al, 2022). O crescimento urbano atrelado a ausência de infraestrutura adequada amplia o risco desses fenômenos naturais, expondo a população a perdas materiais e sociais. Sem um planejamento urbano integrado, o avanço sobre regiões de alta declividade e baixa drenagem agrava os impactos das precipitações extremas, tornando necessária a intervenção pública para executar projetos que mitigam esses riscos (Feitosa e Gauw, 2018).

Nesse contexto, este trabalho analisa a ocorrência dos eventos de desastres naturais na RMM, comparada ao regime médio da chuva local, permitindo uma avaliação da relação entre a ocorrência de chuvas e a frequência desses eventos. Foram utilizados dados históricos de precipitação e registros de desastres específicos da região para investigar as relações causais entre eventos extremos de chuva (como chuvas intensas e prolongadas) e a ocorrência de desastres como movimentos de massa, exurredas, inundações e processos erosivos.

ÁREA DE ESTUDO

A RMM localiza-se na porção central do litoral alagoano, formada pelos municípios de Atalaia, Barra de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Messias, Murici, Paripueira, Pilar, Rio Largo, Santa Luzia do Norte e Satuba (Figura 01).

Figura 01 – Mapa de Localização



Alagoas tem um relevo plano, com planícies no litoral, depressões e alguns planaltos no interior. O clima é tropical úmido, especialmente no litoral e Agreste. No Sertão, o clima é semiárido, com calor o ano todo, baixa umidade e chuvas raras. No geral, o estado não apresenta grandes mudanças de temperatura ao longo do ano, variando, no litoral, entre 23°C e 28°C, e no sertão, entre 17°C e 33°C (Barros et al., 2012).

O clima da Região Metropolitana de Maceió é classificado como tropical úmido, com temperaturas elevadas durante todo o ano e alta umidade. A pluviosidade é concentrada nos meses de outono e inverno (especialmente de abril a agosto), período em que ocorrem as maiores precipitações. Os índices pluviométricos anuais na região podem superar os 2.000 mm, o que, combinado com a geomorfologia local, contribui para a ocorrência de inundações e deslizamentos de terra (MMA, 2017).

A RMM está inserida em um contexto geológico na área de transição entre o planalto costeiro e a planície litorânea. Predominam formações sedimentares terciárias e quaternárias. A geomorfologia da região é marcada pela presença de tabuleiros costeiros, com altitudes que variam de 20 a 100 metros, e planícies fluviais e costeiras. O relevo apresenta-se suavemente ondulado nos tabuleiros, com declives mais acentuados nas encostas que margeiam os vales dos rios e a linha costeira (CPRM, 2003).

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e padronização dos dados de precipitação média mensal

A seleção das estações pluviométricas se deu pela filtragem das estações da Agência Nacional de Águas – ANA que se localizavam a uma distância de até 20 km da área de estudo, utilizando o complemento *ANA Data Acquisition* (versão 1.0) do software QGIS (versão 3.40.7). A ferramenta

oferece a opção de selecionar as estações de interesse diretamente na interface do QGIS e também gera dois relatórios, um com nível de consistência dos dados e outro com disponibilidade dos dados.

De posse desses relatórios, foram filtradas somente as estações que continham séries históricas com mais de 20 anos de dados registrados. Também foram eliminadas estações próximas entre si, quando verificado que uma delas fora desativada e substituída pela outra. Das 114 estações encontradas, 25 cumpriam os requisitos estabelecidos e, como resultado, foram selecionadas para a análise.

Obtenção das séries históricas das estações pluviométricas no HidroWeb

Após a seleção das estações pluviométricas, os dados de chuvas para o período de análise foram coletados no portal HidroWeb, que integra o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Esta plataforma digital oferece um vasto banco de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Os dados pluviométricos analisados foram em escala diária, e não de minutos ou horas, devido à ausência de informação quanto ao horário de ocorrência do evento. Além disso, tais dados estavam disponíveis somente num intervalo temporal considerado pequeno para o escopo deste trabalho.

Cálculo das estatísticas de precipitação

Os dados provenientes do HidroWeb foram processados no *software* Super Manejo de Dados (versão 2.1). Esta etapa permitiu determinar a precipitação máxima diária para diversos períodos de retorno e a precipitação média mensal. A precipitação média anual, por sua vez, foi estimada por meio da soma das precipitações médias mensais.

Duas estatísticas foram extraídas do *software* para cumprir os objetivos deste estudo: a precipitação média mensal e a precipitação diária máxima correspondente a um tempo de retorno de 10 anos. A análise aderiu a critérios específicos, incluindo excluir conjuntos de dados que contivessem mais de três falhas diárias por mês ou dez por ano.

Precipitação média mensal para cada município

A estimativa da precipitação média pode ser realizada pelo Método de Thiessen (1911), a partir da Equação 01. Este método calcula a contribuição de cada estação com base em sua área de influência, sendo aplicável para a média de precipitação em bacias ou áreas administrativas, como é o caso dos municípios estudados. Os limites dos polígonos são mediatriizes equidistantes entre estações adjacentes, garantindo que cada ponto dentro de um polígono esteja mais próximo da estação àquela associada do que de qualquer outra.

$$\underline{p} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

Onde:

\underline{p} : precipitação anual média da sub-bacia (mm/ano);

p_i : precipitação anual média abrangendo toda a área do polígono (mm/ano);

A_i : área do polígono gerado (km^2).

Obtenção de dados de eventos de desastres

Os dados sobre desastres de cunho hidrológicos ocorridos na área de estudo foram obtidos a partir do Atlas Digital de Desastres no Brasil (BRASIL, 2025), organizados por município, data e tipologia. Cada evento registrado foi vinculado à estação pluviométrica mais próxima, dada a

inexistência da posição espacial exata de cada um. A análise abrangeu ocorrências entre 1994 e 2023 nos municípios de Atalaia, Maceió, Messias, Murici e Rio Largo, envolvendo os fenômenos: enchentes, alagamentos, inundações, erosão e movimentos de massa.

Impacto da duração da chuva na ocorrência de eventos de desastres

Diante da alta correlação verificada entre a chuva e desastres, analisou-se o comportamento de ambas as variáveis em conjunto, através de gráficos de dispersão elaborados no *software RStudio* (versão 2025.05). A metodologia para tal análise foi realizada com base no trabalho de De Lima Santos et al. (2019).

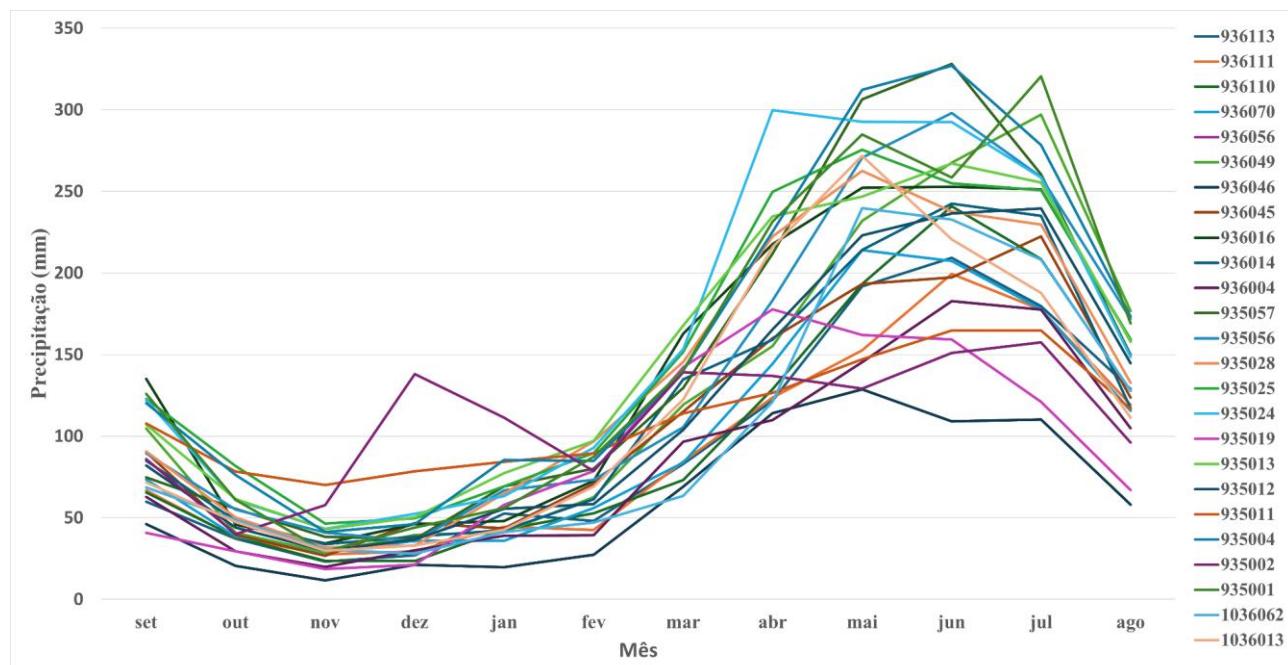
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Precipitação média mensal para análise da sazonalidade

A análise da precipitação média mensal de longo prazo revela um padrão sazonal homogêneo (Figura 02), caracterizado por um período chuvoso bem definido concentrado entre abril e agosto, com pico de precipitação geralmente em maio e junho, e um período seco acentuado entre setembro (considerado como início do ano hidrológico) e fevereiro, com os menores índices pluviométricos registrados em novembro e dezembro. Este padrão é condizente com o clima tropical úmido de outono-inverno, como o de Maceió e da Zona da Mata de Alagoas, onde as chuvas são mais intensas durante a estação mais fria do ano.

Nota-se que a estação 935002 apresentou uma média pluviométrica superior às demais no mês de dezembro. Esse comportamento incomum resultou das chuvas intensas registradas entre 1956 e 1963, que, dentro do período analisado (1953 a 1975), elevaram significativamente a média mensal, tornando-a discrepante em relação às demais estações avaliadas.

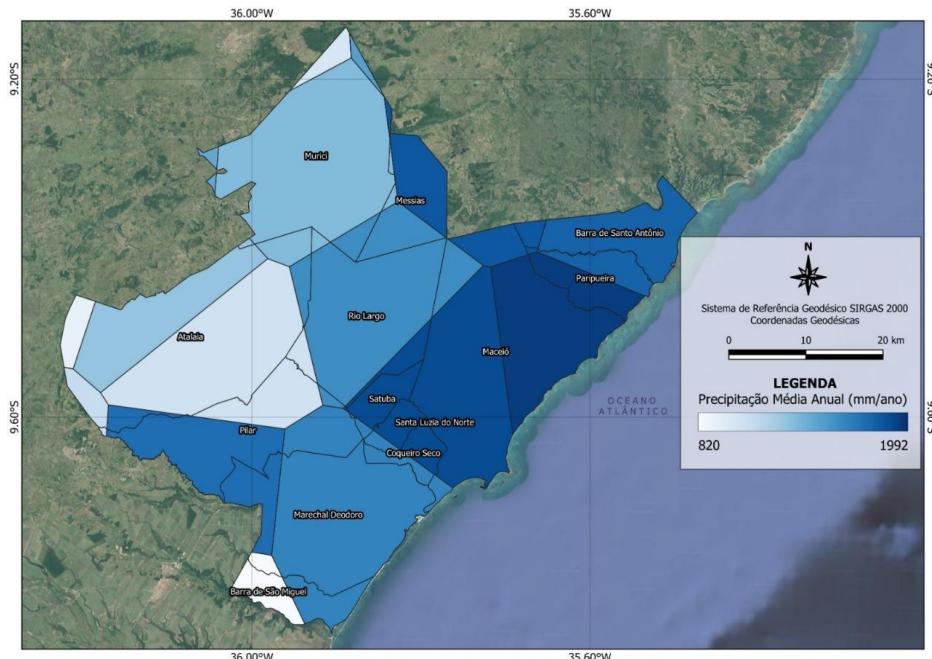
Figura 02 – Gráfico de Precipitação Mensal Média



Precipitação média anual dos municípios

A variabilidade da precipitação média anual foi analisada por meio do método de Thiessen (1911) para cada município da área de estudo (Figura 03). Ao analisar a precipitação anual média, é possível identificar áreas de carga pluviométrica elevada, que são mais sujeitas à degradação do solo. Observa-se que a região litorânea revelou maiores volumes de precipitação, enquanto para o interior do estado, a precipitação mostrou menores índices. Este fato se justifica devido ao clima tropical úmido da região, onde a chuva tem influência da umidade oceânica.

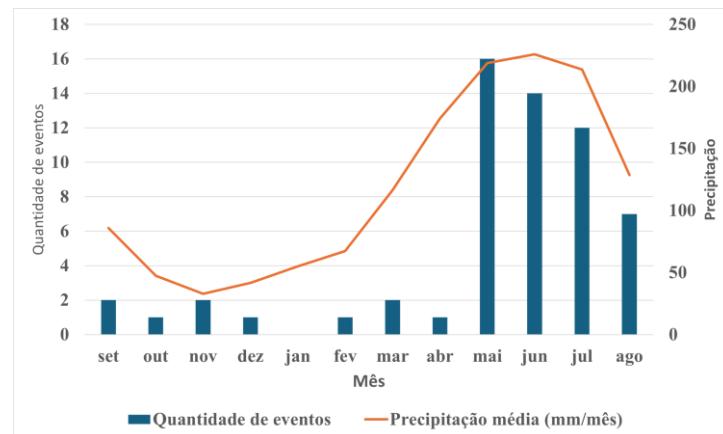
Figura 03 – Mapa dos polígonos de Thiessen (1911) classificados por município.



Relação entre precipitação e ocorrência de desastres

A Figura 04 apresenta a relação dos eventos ocorridos por mês com a precipitação média mensal na RMM. A precipitação média mensal representada pela linha laranja, indica que a RMM possui uma estação chuvosa bem definida. Os meses de maio, junho e julho registram os maiores volumes de chuva, com picos de precipitação média de 220,9 mm em maio, 225,7 mm em junho e 212,7 mm em julho. Após esse período, a precipitação diminui significativamente de setembro a fevereiro, caracterizando o período mais seco.

Figura 04 – Relação entre ocorrência de desastres e precipitação mensais



O número de eventos de desastres representado por barras, mostram que os meses de maio, junho e julho são os que apresentam o maior número de ocorrências, coincidindo diretamente com os picos de precipitação. Ou seja, os meses com maior volume de chuva coincidem com os meses de maior número de eventos, mostrando um padrão sazonal para a ocorrência desses eventos. Observa-se que no mês de maio, o número de sinistros atingiu 16 eventos, e em junho, 14 eventos. O mês de julho também apresenta um número elevado de sinistros com 12 eventos, apesar de uma leve redução na precipitação média em comparação a junho. No mês de agosto, a precipitação média ainda se apresenta considerável com índice de 127,83 mm de chuva, registrando 7 eventos.

Essa análise sugere uma correlação direta e forte entre o volume de chuva e a ocorrência de desastres na RMM. Os períodos de intensa precipitação média resultam em um número proporcionalmente maior de eventos de desastres, o que é comum em regiões tropicais úmidas com topografia suscetível, onde chuvas volumosas podem desencadear inundações e deslizamentos de terra. A concentração de desastres na estação chuvosa ressalta a necessidade de monitoramento pluviométrico contínuo.

Paralelamente, verificou-se a frequência de desastres por mês do ano para cada município analisado. Enquanto que para Atalaia, Maceió e Murici o pico de ocorrências foi no mês de junho, o pico para Rio Largo foi no mês de maio, ainda que o pico de pluviosidade do município ocorra em junho. Maceió foi o município com maior número de ocorrências (16), corroborando com sua posição na análise de precipitação média anual da figura 3.

Com base nos gráficos da Figura 05, que detalham a chuva acumulada em 5 dias na RMM, entre 2004 e 2024, é possível estabelecer uma análise da relação entre os volumes pluviométricos e a ocorrência de eventos de desastres. Adotou-se o acúmulo em 5 dias com base no trabalho de De Lima Santos (2019), que verificou que este período foi o que apresentou melhor separação entre ocorrências de chuva com e sem desastres.

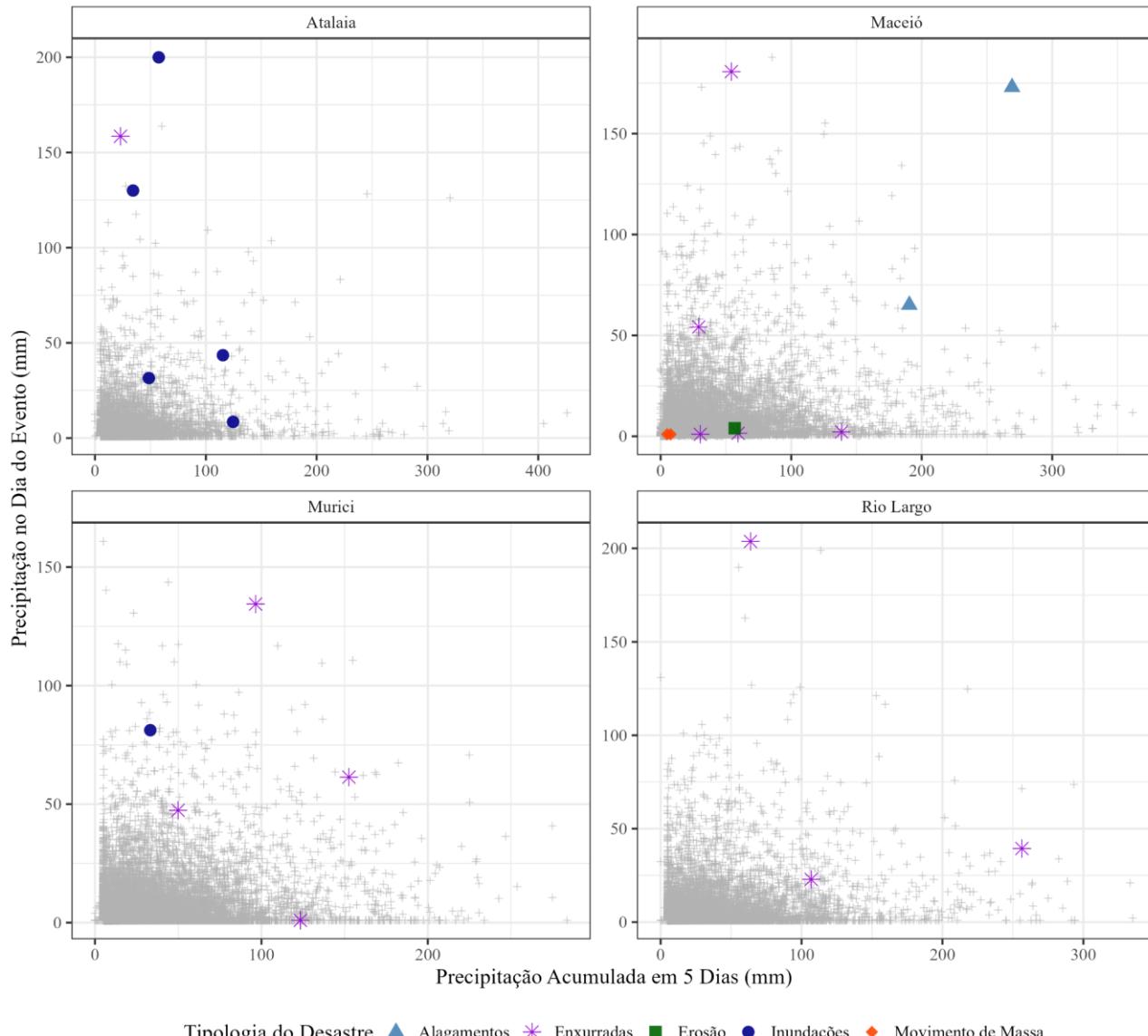
Pode-se notar que a precipitação diária isolada para estes municípios, na maioria das vezes, não é o fator determinante para a ocorrência de desastres, que estão mais fortemente associados ao acúmulo de água no solo por chuvas antecedentes. enquanto Atalaia e Maceió demandaram maiores volumes de chuva diária para a deflagração de eventos, Murici e Rio Largo registraram desastres sob condições de chuva diária menos intensa, o que sugere uma maior vulnerabilidade físico-ambiental à saturação do solo e à capacidade de drenagem nesses locais.

A análise da relação entre precipitação acumulada em cinco dias e a precipitação no dia do evento, associada à tipologia dos desastres naturais, revela comportamentos distintos entre os municípios da RMM, influenciados pelas características geomorfológicas e pedológicas locais. Os gráficos apresentados na Figura 05 evidenciam padrões que, combinados com a ocupação urbana e a capacidade de resposta dos solos à infiltração, auxiliam na compreensão da ocorrência de eventos como enxurradas, inundações, alagamentos e movimentos de massa.

Em Maceió, observa-se uma ampla diversidade de desastres, incluindo alagamentos, enxurradas, inundações, erosão e movimentos de massa, os quais ocorreram mesmo com precipitações acumuladas moderadas, entre 50 e 100 mm em cinco dias. Um dos eventos mais extremos ultrapassou 300 mm acumulados, com aproximadamente 180 mm no dia do evento. No município de Atalaia, predominam os eventos de inundação, geralmente associados a chuvas acumuladas entre 50 e 150 mm em cinco dias, com picos diárias superiores a 200 mm. A região situa-se em zona de transição entre planícies litorâneas e colinas suaves, com presença de Gleissolos (solos

hidromórficos) em áreas de baixada, frequentemente mal drenados, e Latossolos nas partes mais elevadas (IBGE, 2023; EMBRAPA, 2018). A topografia plana e a baixa capacidade de escoamento natural da água justificam a tendência à formação de lâminas de inundação em áreas urbanizadas e de várzeas.

Figura 05 – Gráfico da relação entre volume de chuva acumulada e ocorrência de eventos de desastres



Tipologia do Desastre ▲ Alagamentos * Enxurradas ■ Erosão ● Inundações ◆ Movimento de Massa

Em Murici, os eventos registrados concentram-se em enxurradas e inundações, geralmente ocorrendo com precipitações acumuladas de 50 a 150 mm em cinco dias. Por fim, em Rio Largo, há registros de enxurradas mesmo com volumes de chuva acumulada inferiores a 100 mm em cinco dias. Um evento extremo apresentou precipitação superior a 200 mm no dia do desastre. O município compartilha características pedológicas semelhantes às de Maceió, com Latossolos Amarelos coesos (IBGE, 2023), sendo solos que acumulam água nas camadas superficiais devido à dificuldade de infiltração nos horizontes inferiores. A expansão urbana em áreas de encosta e a impermeabilização

crescente contribuem para o aumento do escoamento superficial e para o desencadeamento de enxurradas em curtos intervalos de tempo.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa analisou a relação entre o regime pluviométrico e a ocorrência de escorregamentos na Região Metropolitana de Maceió. A análise temporal identificou forte sazonalidade, com a maioria dos eventos concentrados entre maio e julho, coincidindo com os maiores volumes médios de chuva. No aspecto espacial, os polígonos de Thiessen para precipitação média anual mostraram maior intensidade nas áreas costeiras e centro-leste, mas sem correlação significativa com o relevo local.

O principal avanço deste estudo está na análise individual e comparativa dos dados de precipitação associados a desastres na Região Metropolitana de Maceió. Os gráficos de limiares de precipitação oferecem uma ferramenta para entender a complexidade dos riscos hidrológicos na RMM mostrando que a combinação de precipitação diária intensa e volumes de chuva acumulados ao longo de vários dias é o principal gatilho para desastres, e que a saturação do solo é um fator que corrobora de forma direta. A monitorização desses limiares é essencial para a prevenção e mitigação de futuros eventos.

Dessa forma, os dados desta pesquisa evidenciam que a resposta hidrológica dos municípios da RMM aos eventos de chuva está fortemente condicionada ao tipo de solo predominante, ao uso e ocupação do solo e ao grau de impermeabilização. Solos com baixa permeabilidade em profundidade, como os Latossolos coesos, quando combinados à urbanização desordenada e à topografia desfavorável, contribuem para a ocorrência de desastres mesmo sob volumes pluviométricos considerados moderados. A integração de informações climáticas, pedológicas e urbanas é essencial para a gestão de riscos e prevenção de desastres naturais.

REFERÊNCIAS

- BARROS, Alexandre Hugo Cezar et al. Climatologia do Estado de Alagoas. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2011).
- BORTOLINI, Willian; SILVEIRA, Claudinei Taborda da; SIAME, Lionel. Comparação entre redes de drenagem extraídas de modelos digitais de elevação global com direção de fluxo simples e múltiplo. RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise, v. 62, n. 1, p. 90-110, abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil; Universidade Federal de Santa Catarina – CEPED/UFSC. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Versão digital. Brasília: MDR / Sedec / UFSC, 2023 (lançado em 3 abr. 2023; atualizado em 20 maio 2025). Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/downloads.xhtml>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- DE LIMA SANTOS, David et al. Limiar de precipitação com potencial de gerar deslizamentos nos complexos de risco em uma zona urbana. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 16, n. 2019, 2019.
- FEITOSA, Cid Olival; GAUW, Bruna Rocha Tenório de. Reflexões sobre a Região Metropolitana de Maceió. Revista Economia Política do Desenvolvimento, Maceió, v. 5, n. 8, p. 131-147, dez. 2018.
- FIRMINO, Marcus Vinicius da Silva Leonardo et al. Climatologia dos eventos extremos de precipitação em Maceió, Alagoas. 2024.

HUANG, J.; JU, N. P.; LIAO, Y. J.; LIU, D. D. Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, p. 2715-2723, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-15-2715-2015>.

HUMMELL, Beatriz Maria de Loyola; CUTTER, Susan L.; EMRICH, Christopher T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 7, p. 111-122, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0090-9>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pedologia: levantamento pedológico: vetores: escala 250 mil. Brasília: IBGE, 2023c. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/. Acesso em: 16 jun. 2025.

NASCIMENTO, Melchior Carlos do; LOMBARDO, Magda Adelaide; GUIMARÃES JÚNIOR, Sinval Autran Mendes; ANDRADE, Esdras de Lima. Análise da vulnerabilidade físico-ambiental causada pelas chuvas intensas na região metropolitana de Maceió. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 19, n. 67, p. 268-288, set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG196718>.

RIBEIRO, Marcos Samuel Matias et al. Aspectos meteorológicos, sociais, sanitários e desastres naturais na região nordeste do Brasil. *Mercator* (Fortaleza), v. 21, p. e21009, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21009>.

TABARI, H. Statistical Analysis and Stochastic Modelling of Hydrological Extremes. *Water*, v. 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11091861>.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, v. 39, n. 7, p. 1082-1089, 1911.