MODELAGEM PROBABILÍSTICA DE EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NO DISTRITO DE CHÓKWÈ.

Filipe da Cruz Uane [1] ; Mário Tauzene Afonso Matangue [2] , Leonardo Pedro Duma [3]*

Palavras-Chave – Frequência hidrológica. distribuição Log-normal. teste de Kolmogorov Smirnov.

INTRODUÇÃO

Moçambique é um dos países africanos em que a distribuição da precipitação ainda não foi bem estudada, motivo pelo qual tem sido abalado por eventos extremos em quase todos os anos, na forma de secas prolongadas ou enchentes durante o verão, causando assim consequências negativas para economia e para a sociedade, tais como, o desalojamento de famílias devido às enchentes, perda de pastagens e até mesmo de vidas humanas (Macie, 2016).

O distrito de Chókwè é uma das regiões do sul de Moçambique que é severamente afetada por eventos extremos de precipitação e modelos estatísticos embasados em processos estocásticos não existem e se existem então são pouco divulgados no seio dos órgãos de gestão de cheias, razão pela qual tem sido difícil lidar com riscos de natureza hidrológica. A prevalência desses eventos extremos, dá conta das incertezas e essas não permitem conceber previsões competentes pois durante a concepção presume-se que os processos naturais relacionados aos eventos extremos são governados por leis matemáticas e é partindo dessa premissa que o presente estudo tem como objetivo central, modelar probabilisticamente o comportamento das séries históricas de precipitação máxima diária de modo a estabelecer maior autonomia na gestão e monitoramento dos recursos hídricos.

A análise estatística das variáveis aleatórias meteorológicas observadas ao longo do tempo, visando compreender os fenômenos atmosféricos, determinando seus padrões de ocorrência e propiciando uma adequada previsibilidade do comportamento é uma ferramenta crucial no planejamento e na gestão dos recursos hídricos (Assis *et al*., 2013). Em hidrologia estatística, as Funções Densidade de Probabilidade (FDP) surgem como mecanismos estatísticos essenciais para modelar e interpretar o comportamento das variáveis (Ferreira *et a*l., *2023*).

No contexto das mudanças climáticas, em que o padrão de chuvas é severamente afetado no distrito de Chókwè, o estudo das precipitações máximas é de grande interesse nos trabalhos de hidrologia, por sua extrema aplicação na estimativa das vazões de projeto para dimensionamento de obras hidráulicas. Assim, a alteração do padrão de chuvas, requer técnicas de modelagem robustas para a análise e previsão do comportamento hidrológico de tal forma que as estruturas hidráulicas deverão ser dimensionadas para acomodar os caudais decorrentes dessas precipitações de modo a minimizar o risco de desastres naturais e ou colapsos estruturais.

METODOLOGIA

Localização da região de estudo e fonte de dados

O distrito de Chókwè está localizado na Província de Gaza, a 24˚05’ e 24˚48’ latitude sul e 32˚33’ e 33˚35’ longitude oeste, na região sul de Moçambique. e possui uma superfície de 2600 km^2, no curso médio do rio Limpopo (Chicombo *et al*, 2024). A série histórica de chuva foi adquirida junto à Delegação Provincial do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM)-Departamento de Observação

[1]*) Curso de Mudanças Climáticas, Instituto Superior Politécnico de Gaza (ISPG) , e-mail: filipedacruzuane@gmail.com , contacto: +258843628049
2) Docente de Pós-graduação em Mudanças Climáticas, ISPG, e-mail: mathauz@yahoo.com.br, contacto: +258848615142
3) Instituto Nacional de Meteorologia-Delegação Provincial de Gaza, e-mail: leopeduma@gmail.com, contacto: +258878265048

e Rede para um horizonte temporal de 30 anos contados de 1991-2020. O INAM é uma Instituição do Estado Moçambicano, responsável pelo gerenciamento e divulgação de informações meteorológicas ao nível Nacional. A Delegação Provincial situa-se entre as coordenadas 25° 2'18.64" de Latitude Sul e 33°44'30.17" de Longitude Este, a aproximadamente 500 metros da Estrada Nacional Número Um (EN1), em Nhampondzone no Distrito de Chongoene, Província de Gaza.

Variação espácio-temporal da chuva e teste de hipóteses estatísticas

Os mapas da distribuição espacial da chuva foram produzidos por meio da interpolação IDW. Para variabilidade temporal, recorreu-se ao teste de *t de Student* para comparar a média amostral da média de interesse (2005) e estabeleceu-se o Intervalo de confiança conforme a metodologia descrita em Fávero *et al* 2017. Tendo-se a série de dados mensais das estações vizinhas, a série de chuva diária, foi convertida em acumulados mensais para permitir o preenchimento de falhas usando o método de regressão linear simples conforme descrito em Mello *et al* (2017). A significância dos parâmetros da regressão, foi testada com base no teste *t bicaudal* para correlações.

Análise de frequência hidrológica

Uma das ferramentas que possibilita conhecer o comportamento da precipitação em uma dada frequência de ocorrência é a análise da frequência hidrológica que consiste em analisar estatisticamente os dados coletados nos postos climatológicos (Damé, *et al* 1996). Para tal efeito, recorreu-se aos dados de precipitação diária de Chókwè e dessa base, foram extraídos os eventos de chuva máxima diária anual, totalizando um total de trinta (30) observações. O sumário das estatísticas descritivas da série de máximas foi obtido considerando métricas adoptadas por Naghettini *et al* 2007, a citar: média, moda, mediana, amplitude, variância e desvio padrão amostral, quartis, decis, percentis, erro padrão, coeficiente de variação, coeficientes de assimetria e da curtose.

Posições de Plotagem de frequências empíricas

Importa, salientar que as frequências empíricas acumuladas (de não execedência), estão directamente relacionadas a posições de plotagem descritas em Cunnane (1978). Assim, conforme os valores de α , usou a equação de Weibull para definir a posição de plotagem.

Teste de aderência e estimativa dos parâmetros

Realizado com base no teste de *Kolmogorov Smirnov* (KS) comparando o desempenho estatístico de três (03) distribuições teóricas de probabilidade: Distribuição Normal, Log-normal e Gumbel máximo (conforme modelos correspondentes em Guimarães, 2011 e Souza *et al* 2016). Para cada distribuição testada, obteve-se uma equação para estimativa da chuva relacionada aos diferentes períodos de retorno, calculou-se as frequências teóricas usando funções pré-definidas no Excel e empíricas pelo método de Weibull. Por fim, obteve-se a diferença máxima absoluta (Dmáx) entre as duas frequências com a premissa de que dados com Dmáx maior que Dcrítico, não seguem a distribuição testada. Os parâmetros foram estimados usando o método dos momentos.

Desempenho estatístico dos modelos

Para análise comparativa de desempenho estatístico dos modelos de probabilidade, recorreu-se a métricas indicadas por Legates (1999), como é o caso do Coeficiente de determinação, Erro médio, Erro médio absoluto, Raiz do erro médio quadrático e Erro médio Percentual.

RESULTADOS

O teste de correlação múlipla para todas as séries testadas foi forte positiva, sendo o par Chókwè e Chibuto o de maior correlação (0.795). Na sequência, o valor da probabilidade (1.9e-7) associado ao valor da estatística t (23.4) foi muito menor que o nível de significância de 5%, pelo que há evidências para rejeitar a hipótese nula e aceitar a alternativa de que as correlações são estatisticamente significantes. Calculado o t critico (1.97) pelo teste bicaudal a 5% de significância, observa-se que a estatística t (23.438) caiu coincidentemente na região critica, ou seja, na região de

rejeição da hipótese nula. Com base nos coeficientes da regressão, torna-se possível realizar algumas previsões de chuva para o caso de Chókwè e Chibuto com o modelo: $y = 0.89x + 2.96$.

Tendo como referência os dados do INE (2013) e em observância ao pluviograma mensal de longo prazo, é notável uma sazonalidade da precipitação e tempertura, com periodos úmidos (Novembro a Março) e secos (Junho a Setembro) bem definidos. Observou-se ainda que os períodos mais chuvosos coincidem com as temperaturas mais altas, caracterizando um regime climático típico de regiões tropicais com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Ao longo dos trinta anos de observação, a temperatura média mensal foi de 24ºC, com máximas e mínimas compreendidas entre 30 e 17 ºC respectivamente. A média mensal de chuva de longo prazo, esteve em torno de 53 mm e a média acumulada anual em torno dos 637.51 mm.

De acordo com a média climatológica de 2005, descrita no relatorio de MAE (2005), as precipitacões acumuladas anuais em Chókwè variam de 500 a 800 mm e a média da amostra em análise foi de 637.51 mm. Embora este rsultado esteja dentro do intervalo histórico visualmente, importa avaliar a significância estatistica dos parâmetros. O teste mostrou que o valor da estatistica t (t calculado) está fora da região critica (t critico) pelo que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese alternativa, ou seja, a média climatológica de 2025 não se difere da média amostral.

A média amostral da precipitação acumulada (637,51 mm) não diferiu significativamente da média histórica de 650 mm (teste *t de Student*, $t = -0{,}265$, $p > 0{,}01$), sendo que o intervalo de confiança de 99% $[508;\ 767]$mm cobre totalmente a média histórica de 2005, indicando ausência de evidência estatística para rejeição da hipótese de nulidade ao nível de 1% de significância.

As chuvas mais frequentes da série de máximas, rondam no intervalo de 23 a 108 mm e as menos frequentes estão no intervalo de 235 a 280 mm. O prolongamento da cauda segue para à direita tal como revelaram os valores da curtose e denota-se igualmente caracteristicas de uma distribuição assimetrica positiva, tipica de distribuicão de valores extremos.

O teste de *Kolmogorov–Smirnov* resultou em desvios máximos de 0.1977, 0.0929, 0.1336 correspondentes a Normal, Log-Normal e Gumbel de máximos, indicando que a hipótese nula não pode ser rejeitada nos níveis de significância convencionais. Assim, os dados de precipitação podem ser considerados compatíveis com todas as distribuições de probabilidade testadas, excepto com a normal a 20 e 15% de significância.

O coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0{,}9133$) demonstrou que o ajuste da Log. Normal explica melhor a variabilidade dos dados observados. O erro quadrático médio ($RMSE = 17{,}10$) apresenta magnitude relativamente baixa, enquanto o erro percentual médio ($MAPE = 7{,}58\%$) confirma que as estimativas possuem boa precisão, com desvios inferiores a 10%.

CONCLUSÕES

A pesquisa evidencia que a modelagem probabilistica aplicada a série de máximas diarias é bastante poderosa para a caracterização de eventos extremos de chuva. A distribuição Log-normal, apresentou o menor desvio máximo, indicando excelente aderência aos dados observados. A distribuição de Gumbel, embora adequada para extremos, não representou tão bem o conjunto completo dos dados. A distribuição Normal apresentou o maior desvio, evidenciando limitação em representar a assimetria típica da chuva.

Deste modo, conclui-se que a Log-normal é a distribuição mais adequada, refletindo a assimetria característica dos dados hidrológicos. As estimativas de precipitação associadas aos periodos de retorno, apresentaram coerência estatistica e aplicabilidade prática contribuindo para o suporte à tomada de decisão em planejamento hídrico e mitigação de riscos. Assim, recomenda-se o uso da distribuição Log-normal em estudos similares na região.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Janilson Pinheiro De *et al*. Ajuste de sete modelos de distribuições densidade de probabilidade às séries históricas de umidade relativa mensal em Mossoró – RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável,** v. 8, n. 1, p. 01–10, 15 mar. 2013. **DOI**: https://doi.org/10.18378/rvads.v8i1.1886

CUNNANE, C. Unbiased plotting positions — A review. Journal of Hydrology, v. 37, n. 3–4, p. 205–222, maio 1978 **DOI:** https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3

CHICOMBO, Tomé Francisco; MOREIRA, Alecir Antônio Maciel. **mapeamento de suscetibilidade às inundações com base na análise multicritério (AHP): estudo de caso do distrito de chókwe, em Moçambique**. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 25, n. 99, p. 301–319, 2024. DOI: 10.14393/RCG259970390.

DAMÉ, Rita de Cássia Fraga; TEIXEIRA, Claudia Fernanda Almeida; SOUTO, Mery Vijagran; MOREIRA, Núcia Margot. Análise de frequência hidrológica dos dados de precipitação pluvial de algumas estações agroclimatológicas da região sul do **Rio Grande do Sul. Ciência Rural, Santa Maria**, v.26, n.3, p351-355, dez 1996. **DOI:** https://doi.org/10.1590/S0103-84781996000300001

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. Rio de Janeiro: **Elsevier**. Cap 7, 2017.

Ferreira, F. R. de L., Pelissari, A. L., Cysneiros, V. C., Rodrigues, C. K., Moura, L. A., & Marques, E. R. G. (2023). Modelagem da distribuição diamétrica de espécies arbóreas em fragmento de florestas estacional semidecidual. **Revista Árvore**, 47,**DOI:** https://doi.org/10.1590/1806–908820230000001

GUIMARÃES, Rita Cabral Probabilidade e estatística aplicada à hidrologia. Universidade de Évora-Departamento de Engenharia Rural, 2011.

Instituto Nacional de Estatística -INE Estatísticas do distrito de Chókwè. Maputo -Moçambique, 2013 disponível em: Estatísticas - INE acessado no dia 10 de Maio de 2025

MACIE, Odete Amélia de Amílcar. Características da estação chuvosa em Moçambique: Probabilidade de ocorrência de períodos secos e padrões atmosféricos associados: Universidade de São Paulo-Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas -Programa de Pós-graduação em Meteorologia, abril.2016

LEGATES, David R.; MCCABE, Gregory J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, jan. 1999.

MELLO, Yara Rúbia de; KOHLS, Werner; OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais de. Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Boletim de Geografia**, v. 35, n. 1, p. 112, 9 ago. 2017. **DOI**: https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v35i1.30893

MAE. Perfil do distrito de Chókwè-Província de Gaza. Moçambique – Maputo, 2005. Disponível em: https://www.scribd.com/document/546833066/Chokwe, acessado no dia 20 de março de 2026

NAGHETTINI, Mauro; PORTELA, Maria Manuela. Probabilidade e estatística aplicadas à hidrologia. 2007. CPRM,. 552p. ISBN 978-85-7499-023-1

SOUZA, Samara Alves; COELHO, Maria Holanda; VIEIRA, Wedman de Lavor; CARDOSO, Adail Pinto; BEZERRA, Luiz Carlos Alves; NETO, João Coelho Lima Verde. Estudo de Chuvas Máximas Para o Município de Iguatu-CE. **Conex. Ciências e Tecnologias, Fortaleza/Ceará**, v.10, n.2, p47-52, julho.2016. DOI:10.21439/conexoes.v10i2.758