PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DE PERÍODOS DE ESTIAGEM A PARTIR DA GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS

Pérsio Puertas Garcia Lorenti [1] ; Mateus Seiji Saito [2]& Daniel Henrique Marco Detzel [3]

Palavras-Chave – Modelagem estocástica, modelos ARMA, estiagem.

INTRODUÇÃO

Séries sintéticas de vazão constituem uma ferramenta central para gestão de sistemas de recursos hídricos, ao permitir a avaliação de cenários hidrológicos alternativos aos registros históricos e a quantificação de probabilidades de eventos extremos em diferentes horizontes de planejamento. No estado do Paraná, a estiagem de 2020 evidenciou a vulnerabilidade do abastecimento de água na região de Curitiba, com redução acentuada dos níveis em reservatórios de uso urbano; em particular, o reservatório Iraí atingiu cerca de 12% de seu volume em julho de 2020, caracterizando um episódio crítico de escassez hídrica (SANEPAR, 2025).

Séries hidrológicos com extensão mínima de 30 anos proporcionam uma base empírica para análise da variabilidade hidrológica interanual. Entretanto, mesmo em séries maiores, o número de eventos de estiagem extrema é pequeno, o que limita a robustez de análises tradicionais de frequência baseadas exclusivamente no ajuste de distribuições. Além disso, os resultados preliminares deste estudo mostram que, ao ajustar diferentes distribuições teóricas aos mínimos anuais de médias móveis de 3 meses, múltiplas distribuições são frequentemente válidas pelo teste de Kolmogorov–Smirnov (KS) (MASSEY, 1951) em uma mesma estação. Essa multiplicidade de distribuições compatíveis com os dados evidencia uma fonte importante de incerteza epistêmica associada à escolha da forma funcional da distribuição de extremos.

Nesse trabalho, propõe-se uma metodologia de geração de séries sintéticas de vazão mensal baseada na decomposição determinística da série observada em componentes de tendência, sazonalidade e ruído, no espaço transformado, combinada com modelagem estocástica linear da família ARMA (SALAS *et al.*, 1982) do componente residual. A partir dos modelos ajustados, são geradas, por simulação de Monte Carlo, séries sintéticas de vazão mensal para comprimentos de 5, 10 e 30 anos, preservando a estrutura determinística estimada e a dependência temporal capturada pelo modelo ajustado ao ruído. Em cada estação, define-se uma estiagem de referência em 2020 como o período de três meses consecutivos com vazão média mínima, situada abaixo do quantil histórico Q90, e utiliza-se esse evento como padrão para classificar, nas séries sintéticas, estiagens “iguais ou mais severas” em termos de duração e vazão média. O objetivo central do estudo é estimar, para cada estação e comprimento de série, a probabilidade de ocorrência de ao menos uma estiagem igual ou pior que a de 2020, com base nas séries sintéticas geradas, e discutir as implicações desses resultados para o planejamento e a operação de sistemas hídricos no Paraná, à luz da incerteza associada ao ajuste de distribuições teóricas de extremos.

1) PPGERHA, UFPR, persiopgl@gmail.com
2) PPGERHA, UFPR, mateussaito@hotmail.com
3) Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR, detzel@ufpr.br

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo utilizou séries de vazão diária de estações localizadas no estado do Paraná. Para a seleção de estações foram considerados os critérios de pelo menos 30 anos de dados diários completos, término após 2020 e ocorrência de estiagem em 2020, posteriormente agregadas para passo mensal, resultando em 25 postos. A vazão média das estações varia, em sua maioria, entre 0,45 e 1000 m³/s, com exceção da estação 64575003 que apresenta média de 8055 m³/s. As séries apresentam alta variabilidade com coeficiente de variação acima de 30% em todos os postos.

Estiagem de referência

Para cada estação selecionada, a série mensal foi dividida em histórico anterior a 2020 e no ano de 2020; com base apenas no histórico, calcula-se o limiar Q90 e, em 2020, identificam-se todas as janelas móveis de três meses consecutivos em que as vazões mensais permanecem abaixo desse limiar. Entre as janelas elegíveis, seleciona-se aquela com menor vazão média, definindo a estiagem de referência de 2020 em termos de duração (3 meses), vazão média e datas de início e fim, que é usada como evento-tipo para a análise de recorrência nas séries sintéticas. Adicionalmente, extraem-se mínimos anuais de médias móveis de 3 meses (desde que existam ao menos 15 anos de dados) e ajustam-se as distribuições GEV, Gumbel, Log-normal, Gamma, Weibull mínima e Pearson tipo III por máxima verossimilhança (NAGHETTINI; PINTO, 2007), avaliando-se a aderência pelo teste de KS.

Os resultados dos ajustes mostraram que em 24 estações a hipótese nula não foi rejeitada (5%) para todas as distribuições testadas. Apenas na estação 64575003 verificou-se o ajuste adequado para 3 distribuições, ao invés de 6.

Geração de séries sintéticas e avaliação estatística

Inicialmente, verificou-se a condição de normalidade das séries por meio do teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO, WILK, 1965), e quando necessário foi aplicada a transformação logarítmica. As séries mensais foram decompostas de forma aditiva em tendência, sazonalidade e ruído, adotando-se um procedimento com identificação de quebras de regime pelo teste de Pettitt aplicado de forma recursiva (significância de 5%). Entre cada par de quebras (até um máximo de quatro por estação), ajusta-se uma tendência linear por trecho, garantindo continuidade entre segmentos sucessivos, enquanto a sazonalidade é estimada como a média mensal dos resíduos após remoção da tendência, e o ruído é definido como o resíduo final após subtrair tendência e sazonalidade.

Em seguida, procedeu-se a estimação dos parâmetros do modelo ARMA (SALAS *et al*., 1982), com ordens p e q selecionadas por busca extensiva em $0 \leq p,q \leq 5$ (excluindo p=q=0), por máxima verossimilhança. A escolha dos modelos ARMA ajustados foi realizada com base no menor critério de informação de Akaike (AIC) (CAVANAUGH, NEATH, 2019). Em seguida, foram aplicados aos resíduos de cada modelo os testes de Ljung–Box (independência serial), Breusch–Pagan (homocedasticidade) e Shapiro–Wilk (normalidade) (BREUSCH, PAGAN, 1979; BOX, PIERCE, 1970). Esses diagnósticos são usados para caracterizar a qualidade ajustada dos modelos e para discutir, nos resultados, as limitações da hipótese de normalidade dos resíduos em dados hidrológicos reais.

Tendo os modelos definidos, para cada estação foram geradas 1000 séries sintéticas em horizontes de 5, 10 e 30 anos. Para cada série sintética e horizonte de análise, aplica-se o mesmo critério definido para a estiagem de 2020, buscando janelas de três meses consecutivos com vazão média menor ou igual à vazão média da estiagem de referência observada em cada estação. Em cada conjunto de 1000 séries, contabilizou-se a fração de simulações em que ocorre pelo menos uma estiagem igual ou mais

severa do que a de 2020, interpretada como estimativa da probabilidade de ocorrência do evento no horizonte considerado; estatísticas auxiliares, como severidade e duração médias dos eventos sintéticos, também são calculadas por estação.

RESULTADOS

Para todas as 25 estações, os p-valores do teste de Ljung–Box foram superiores a 5%, indicando ausência de autocorrelação residual significativa. O teste de Breusch–Pagan não rejeitou a hipótese de homoscedasticidade em 14 estações, enquanto o teste de Shapiro–Wilk não rejeitou a hipótese de normalidade dos resíduos em apenas 2 séries. Por meio de análise visual das distribuições, os histogramas de resíduos em escala transformada mostram forma aproximadamente simétrica com boa sobreposição à densidade normal teórica, sugerindo que a violação da normalidade é moderada do ponto de vista prático, ainda que detectada pelos testes formais.

As probabilidades estimadas de ocorrência, em pelo menos uma vez, de estiagens iguais ou mais severas que a de 2020 aumentam com o horizonte de análise e exibem grande variabilidade entre estações. Conforme pode ser visto na Figura 1, a probabilidade dos eventos possui uma densidade bastante concentrada no primeiro painel e mais distribuída no último. Para o horizonte de 5 anos, as probabilidades variam de 0,0% a 44,4%, com quartis em 1,2%, 9,6% (mediana) e 18,0%; em 10 anos, situam-se entre 0,1% e 58,7%, com quartis em 2,4%, 13,8% e 33,1%; e, em 30 anos, variam de 0,1% a 96,7%, com quartis em 6,6%, 34,7% (mediana) e 69,9%. Essas probabilidades são de caráter empírico, diferente das teóricas encontradas com o ajuste das distribuições de probabilidades verificadas na metodologia onde quase todas as hipóteses nulas não foram rejeitadas.

Os mapas da Figura 2 evidenciam ainda um padrão espacial marcado, com estações em determinadas regiões do Paraná apresentando probabilidades em 30 anos próximas de 70–100%, enquanto outras permanecem em faixas moderadas ou baixas, sugerindo que a recorrência potencial de eventos análogos ao de 2020 depende fortemente das características hidrológicas locais e das diferenças capturadas pela modelagem estocástica entre séries.

Figura 1 – Histogramas e curvas de densidade para as projeções de 5, 10 e 30 anos

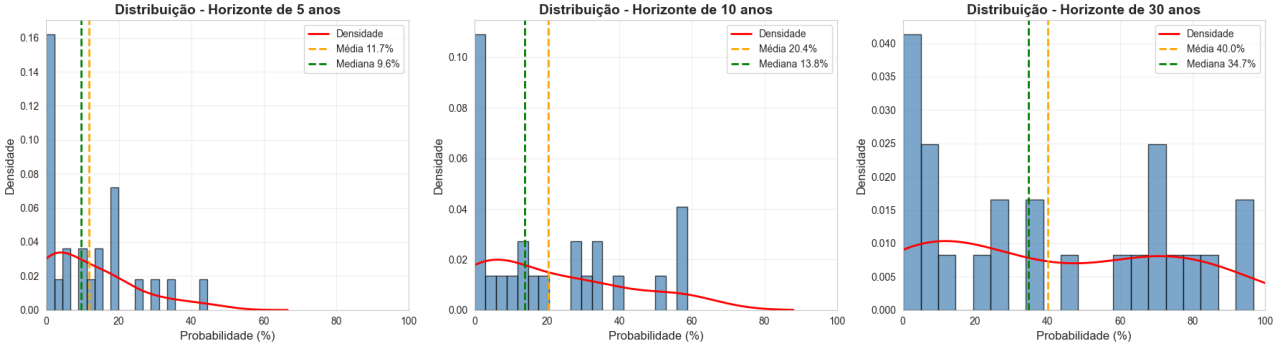
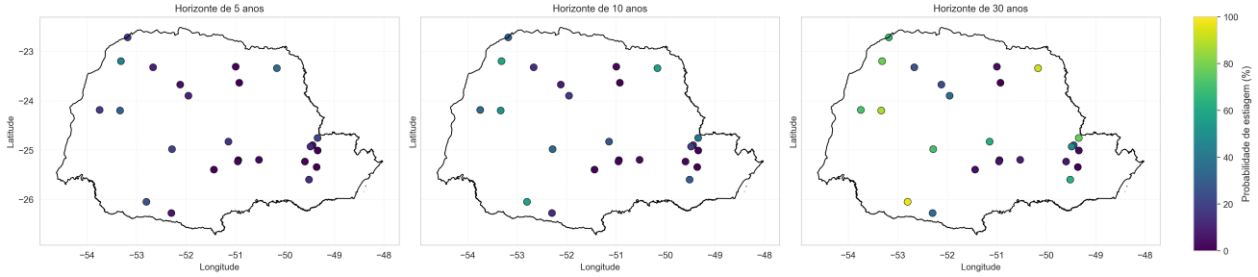


Figura 2 – Distribuição espacial de probabilidade de ocorrência de estiagem tão ou mais severa do que a de 2020



CONCLUSÕES

Por meio das análises conduzidas neste trabalho, foram feitas as seguintes conclusões acerca dos resultados obtidos:

- A estratégia de decompor a série em tendência, sazonalidade e ruído antes da modelagem estocástica pode ser uma alternativa à aplicação direta do ARMA, uma vez que a formulação do modelo pressupõe estacionariedade dos dados. Isso é particularmente relevante em séries longas, sujeitas a influências antrópicas e à variabilidade climática, uma vez que a identificação por Pettitt seguida do ajuste linear por trechos inclui as mudanças de regime que as séries de vazão podem sofrer.

- Os resultados indicam o aumento das probabilidades acompanhando o tamanho do horizonte observado (5, 10 ou 30 anos), além de uma grande variabilidade nas estimativas entre estações. Para o horizonte de 30 anos, as estimativas variam de 0,1% a 96,7%. Na distribuição espacial de probabilidades, nota-se um padrão marcado indicando que a ocorrência de eventos análogos a estiagem de referência, depende fortemente das características hidrológicas locais.

REFERÊNCIAS

BOX, G. E. P.; PIERCE, D. A. (1970). “Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models”. *Journal of the American Statistical Association*, 65(332), pp. 1509–1526.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. (1979). “A simple test for heteroskedasticity and random coefficient variation”. *Econometrica*, 47(5), pp. 1287–1294.

CAVANAUGH, J. E.; NEATH, A. A. (2019). “The Akaike information criterion: background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements”. *WIREs Computational Statistics*, e1460.

MASSEY, F. J., Jr. (1951). “The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit”. *Journal of the American Statistical Association*, 46(253), pp. 68–78.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. CPRM, Brasília, 561 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. (1965). “An analysis of variance test for normality (complete samples)”. *Biometrika*, 52(3–4), pp. 591–611.

SALAS, J. D.; OBREGON, G. C.; SRINIVASAN, R. (1982). “ARMA model identification of hydrologic time series”. *Water Resources Research*, 18(2), pp. 423–434.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). (2025). *Níveis das barragens – 2014 a 2025*. Sanepar, Curitiba.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a bolsa concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, permitindo a elaboração do estudo.