ESTIMATIVA NÃO-PARAMÉTRICA DA ELASTICIDADE HIDROLÓGICA DAS VAZÕES AFLUENTES A RESERVATÓRIOS MONITORADOS DO CEARÁ

Jorgiane Pires Bezerra[1]; Ályson Brayner Sousa Estácio[2]

Palavras-Chave – elasticidade hidrológica, precipitação, vazão incremental, semiárido, reservatórios.

INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos no semiárido é condicionada pela variabilidade da precipitação, pela alta evapotranspiração e pela baixa capacidade de armazenamento dos solos e aquíferos. No Nordeste, onde se localiza o Ceará, a precipitação é irregular no tempo e no espaço e o escoamento superficial ocorre de forma concentrada, com escassez hídrica recorrente, conforme Sousa et al. (2023) e Andrade et al. (2020).

A escassez de séries longas de vazão observada em muitas bacias leva ao emprego de modelos chuva-vazão e de variáveis climáticas para inferir o comportamento dos sistemas hídricos. Uma dessas medidas é a elasticidade hidrológica, definida como a razão entre a variação relativa da vazão e a variação relativa da precipitação. Sankarasubramanian et al. (2001) estabeleceram essa medida para bacias dos Estados Unidos e Tang et al. (2019) verificaram que a resposta difere entre regiões conforme a disponibilidade hídrica.

A elasticidade da vazão à precipitação varia entre bacias e relaciona-se com características físicas, cobertura e uso do solo. Valores altos indicam resposta amplificada da vazão, enquanto valores baixos correspondem a maior amortecimento por armazenamento superficial, infiltração e recarga, conforme Güntner e Bronstert (2003) e Ferreira da Silva et al. (2024). No Brasil, Reis Júnior et al. (2013) estimaram a sensibilidade da vazão média de longo período às mudanças do clima a partir das hipóteses de Budyko e do conceito de elasticidade-clima, com respostas distintas entre bacias do semiárido.

Este trabalho estima a elasticidade hidrológica das vazões incrementais afluentes aos 156 reservatórios monitorados no Ceará em relação à precipitação, a partir de séries anuais do período de 1954 a 2024, com o objetivo de caracterizar a variabilidade da resposta hidrológica e identificar áreas de maior sensibilidade à precipitação.

METODOLOGIA

O Ceará localiza-se no Nordeste do Brasil e possui área de cerca de 148.920 km². Cerca de 95% do território está sob clima semiárido, com evaporação elevada e precipitação concentrada no primeiro semestre. Grande parte da área registra precipitação média anual inferior a 800 mm. A oferta hídrica superficial provém de 156 reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH).

Foram utilizadas séries mensais de precipitação e de vazão incremental das 156 bacias incrementais. A precipitação corresponde à média espacial sobre cada bacia incremental, obtida por interpolação pelo inverso da distância ao quadrado. As vazões incrementais afluentes foram simuladas com o

1) UFC, jorgianepires@alu.ufc.br; 2) FUNCEME, alyson.estacio@funceme.br

modelo SMAP em versão regionalizada para as bacias do estado (Estácio et al., 2021). Os dados físicos dos reservatórios provêm do projeto Alocação de Água para Promoção de Segurança Hídrica (ALOCA).

A elasticidade foi estimada a partir das variações relativas anuais da vazão incremental e da precipitação média anual. Para cada bacia incremental, a razão entre essas variações foi calculada ano a ano e a mediana da amostra foi adotada como estimativa de εp, conforme a equação 1.

$$Elasticidade = \frac{(Q-\bar{Q})/\bar{Q}}{(P-\bar{P})/\bar{P}} \quad (1)$$

Em que Qt e Pt são os valores anuais de vazão e precipitação e $\bar{Q}$ e $\bar{P}$ suas médias no período de 1954 a 2024. O emprego da mediana reduz a sensibilidade da estimativa a anos extremos. As séries foram agregadas em totais anuais e processadas em Python, com as bibliotecas pandas, numpy e seaborn.

A classificação seguiu Sankarasubramanian et al. (2001), conforme a Tabela 1. Valores de εp até 1,2 indicam resposta amortecida da vazão à precipitação. Valores entre 1,2 e 2,0 indicam resposta intermediária e valores acima de 2,0 indicam alta sensibilidade, associada a sistemas com baixa capacidade de regulação.

Tabela 1 – Classificação da elasticidade hidrológica (εp)

Faixa de εp	**Intervalo**	**Interpretação hidrológica**
Baixa elasticidade	$\varepsilon p \leq 1{,}2$	Resposta amortecida da vazão às variações de chuva
Elasticidade intermediária	$1{,}2 < \varepsilon p \leq 2{,}0$	Resposta moderada da vazão às variações de chuva
Alta elasticidade	$\varepsilon p > 2{,}0$	Resposta intensificada da vazão às variações de chuva

Fonte: adaptado de Sankarasubramanian et al. (2001).

RESULTADOS

A elasticidade foi estimada para as 156 bacias incrementais, a partir das séries de 1954 a 2024. As estimativas de εp variaram de valores negativos, em poucas bacias, até cerca de 3,3, com a maioria situada entre 2,0 e 3,0. Os valores foram distribuídos em três faixas, baixa para εp até 1,2, média entre 1,2 e 2,0 e alta acima de 2,0. A Figura 1 apresenta os valores em ordem decrescente, com a respectiva classificação.

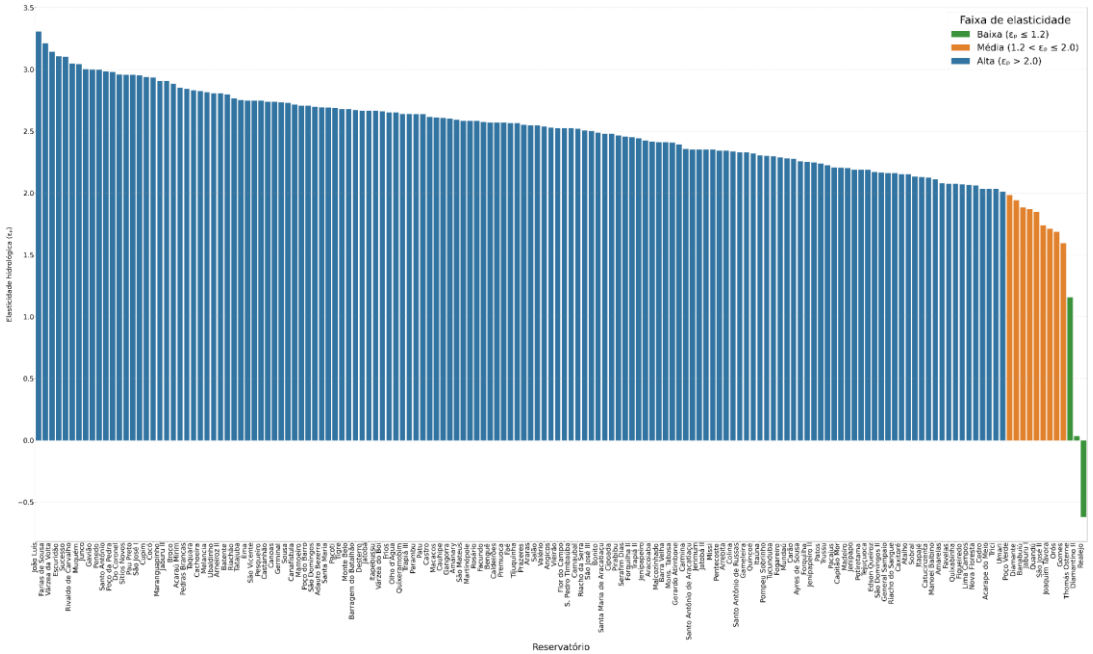


Figura 1 – Valores de εp estimados para as vazões incrementais afluentes aos 156 reservatórios cearenses, ordenados de forma decrescente e classificados por faixa de sensibilidade. Fonte: autoria própria.

A faixa alta concentrou mais de 60% das bacias incrementais, o que indica resposta acentuada da vazão à precipitação na amostra. A distribuição das estimativas, apresentada na Figura 2, concentrou-se entre 2,0 e 2,8 e exibiu assimetria positiva, com uma cauda formada por poucas bacias de baixa e média elasticidade.

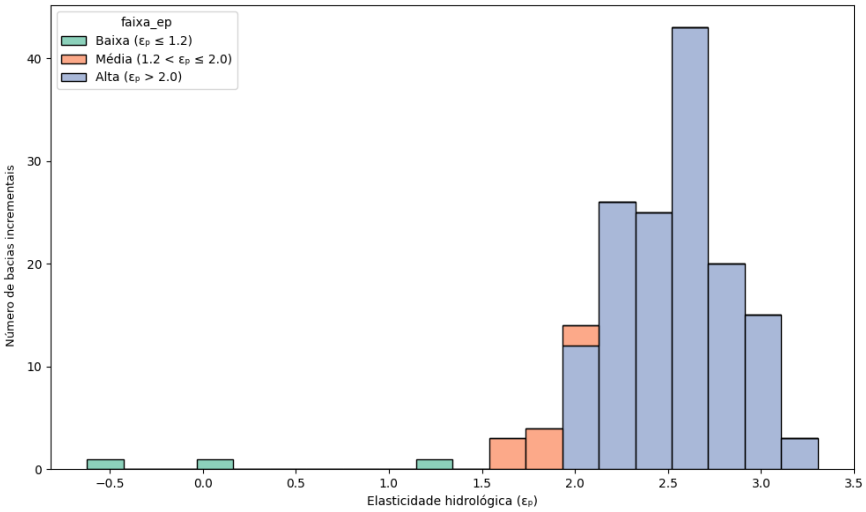


Figura 2 – Distribuição de frequência das bacias incrementais por faixa de elasticidade hidrológica (εp). Fonte: autoria própria.

Além de reunir o maior número de bacias, a faixa alta apresentou dispersão interna moderada, enquanto as faixas baixa e média concentraram poucos casos. Esse contraste indica que a resposta elevada da vazão à precipitação é o padrão predominante entre as bacias incrementais analisadas. As bacias com εp inferior a 1,2 correspondem a bacias em que aumentos da precipitação produzem variações reduzidas na vazão, associadas a maior infiltração e armazenamento.

Esse comportamento relaciona-se aos processos físicos predominantes em cada bacia, como o tipo de solo e a capacidade de infiltração, e é consistente com Güntner e Bronstert (2003), que descrevem o amortecimento em bacias semiáridas. A relação entre a precipitação média anual e a elasticidade é apresentada na Figura 3. Bacias com precipitação inferior a 1000 mm apresentaram, com maior frequência, εp acima de 2,0, o que indica maior sensibilidade da vazão em bacias mais secas.

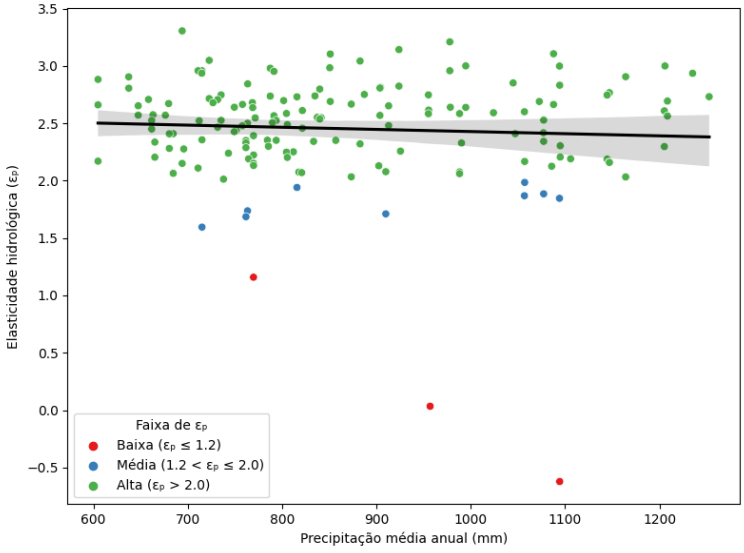


Figura 3 – Dispersão entre a precipitação média anual (mm) e a elasticidade hidrológica (εp), com ajuste de regressão linear. Fonte: autoria própria.

Esse resultado é consistente com Tang et al. (2019), que registraram maior elasticidade do escoamento à precipitação em regiões de menor disponibilidade hídrica. A dispersão dos pontos indica que a precipitação média não explica isoladamente a magnitude de εp, já que bacias sob regimes pluviométricos semelhantes apresentaram valores distintos. Sankarasubramanian et al. (2001) relacionam essa variação à infiltração, ao armazenamento superficial e à dinâmica do escoamento nas bacias. As bacias de baixa elasticidade foram pouco representativas na amostra e não apresentaram padrão espacial definido.

CONCLUSÕES

Mais de 60% das bacias incrementais analisadas apresentaram εp acima de 2,0, o que indica alta sensibilidade da vazão à precipitação no semiárido cearense. A distribuição das estimativas apresentou assimetria positiva, com predomínio de valores elevados e poucos casos nas faixas baixa e média. Bacias em áreas de menor precipitação tenderam a apresentar εp mais elevado, embora a precipitação média não explique isoladamente o padrão observado. O estimador não-paramétrico permitiu estimar a elasticidade em bacias com poucos dados hidrométricos e pode apoiar estratégias de alocação e operação em cenários de escassez.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. M. et al. (2020). Hydrological behaviour of vertisols in the Brazilian semi-arid region: the importance of rainfall of less than 30 mm. Revista Ciência Agronômica, v.51, e20200029. Disponível em: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200029.

ESTÁCIO, A. B. S. et al. (2021). Uncertainty analysis in parameter regionalization for streamflow prediction in ungauged semi-arid catchments. Hydrological Sciences Journal, v.66, n.7, p.1132–1150.

FERREIRA DA SILVA, G. J. et al. (2024). Multi-datasets to monitor and assess meteorological and hydrological droughts in a typical basin of the Brazilian semiarid region. Environmental Monitoring and Assessment, v.196, n.4, art.368. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10661-024-12461-0.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2003). Large-scale hydrological modelling in the semiarid northeast of Brazil: aspects of model sensitivity and uncertainty. In: Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Wallingford: IAHS, p.43–48. (IAHS Publication, 278).

REIS JÚNIOR, D. S.; CERQUEIRA, C. M.; VIEIRA, R. F.; MARTINS, E. S. P. R. (2013). Sensibilidade da vazão média de longo período às mudanças do clima com base nas hipóteses de Budyko e no conceito de elasticidade-clima. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, ABRH.

SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. Water Resources Research, v.37, n.6, p.1771–1781.

TANG, Y. et al. (2019). Different precipitation elasticity of runoff for precipitation increase and decrease at catchment and regional scales. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v.124, n.17–18, p.9947–9963. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2019JD030418

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).