

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

INFLUÊNCIA DA OSCILAÇÃO CLIMÁTICA EL NIÑO SOBRE AS VAZÕES AFLUENTES À USINA GOV. BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO (PR)

Isabella Kahler Concer¹; Daniel Henrique Marco Detzel²

ABSTRACT

This study investigates the influence of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) phenomenon on the inflows to the Governador Bento Munhoz da Rocha Netto Hydroelectric Power Plant, located on the Iguaçu River in Paraná, Brazil. Using hydrological data and the Oceanic Niño Index (ONI), quarterly average streamflows were compared during periods classified as El Niño, La Niña, and neutral phases from 1950 to 2023. The Wilcoxon test was applied to assess the statistical significance of differences among groups. Results indicate statistically significant differences in streamflows between ENSO events and neutral periods, although no significant difference was found between El Niño and La Niña phases. The findings underscore the substantial impact of ENSO on the hydrological regime of the basin and highlight the importance of continuous climate monitoring to support water resource management and planning.

RESUMO

Este estudo investiga a influência do fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS) sobre as vazões afluentes à Usina Hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, localizada no rio Iguaçu, Paraná. A partir da análise de dados hidrológicos e do Índice Oceânico de El Niño (ONI), foram comparadas as vazões médias trimestrais durante os períodos classificados como El Niño, La Niña e condições neutras, no intervalo de 1950 a 2023. Utilizou-se o teste de Wilcoxon para verificar a significância estatística das diferenças entre os grupos. Os resultados apontam diferenças significativas nas vazões entre os eventos ENOS e os períodos neutros, embora não haja distinção estatística clara entre El Niño e La Niña. Conclui-se que o ENOS exerce influência relevante sobre o regime hidrológico da bacia, e seu monitoramento é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-Chave – ENSO; regime de vazões; usinas hidrelétricas

INTRODUÇÃO

A variabilidade climática desempenha um papel central na dinâmica dos sistemas hidrológicos, influenciando diretamente a disponibilidade de água e o funcionamento de setores essenciais como o abastecimento urbano e a geração de energia. Dentre os mecanismos de variabilidade destaca-se o fenômeno El Niño–Oscilação Sul (ENOS), cuja influência se estende

1) Graduanda do Curso de Engenharia Civil, UFPR, isabella.concer@ufpr.br

2) Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Engenharia Civil, UFPR, detzel@ufpr.br

globalmente, com impactos notáveis sobre o regime de precipitação e, consequentemente, sobre bacias hidrográficas.

O ENOS é o principal mecanismo de variabilidade interanual do clima da Terra (Berlato, 2024). Esse fenômeno é um processo que envolve a variação do sistema natural oceano-atmosfera na região do oceano Pacífico equatorial, ou seja, mudanças complexas na temperatura da superfície do mar (TSM) e na circulação atmosférica naquela área. O ENOS não é apenas um evento isolado, mas sim uma oscilação contínua que ocorre em escalas de tempo variando de meses a anos, afetando significativamente o equilíbrio climático. Embora o ENOS se manifeste principalmente como uma flutuação climática de ano a ano, sua dinâmica envolve uma ampla gama de processos interagindo em escalas temporais que variam de semanas a décadas (Timmermann et al., 2018, p. 535).

A caracterização do fenômeno ocorre pela conjugação de variações da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Equatorial Centro-leste, com alterações na pressão atmosférica, categorizando o evento em fase positiva e negativa, conhecidas respectivamente por El Niño e La Niña. Os períodos de tempo entre esses eventos são denominados de períodos neutros.

Por sua grande influência, o ENOS elucida como fenômenos climáticos globais podem modificar significativamente as características locais de precipitação, gerando efeitos sequenciais que vão desde problemas ambientais até desafios socioeconômicos, exigindo atenção de pesquisadores e gestores públicos em escala global e regional. De particular interesse, a oscilação influencia a variabilidade do regime fluvial dos rios ao redor do mundo (Lee et al., 2018). Essas variações afetam diretamente as vazões, podendo ocasionar cheias (Ward et al., 2016) e estiagens prolongadas (Nicholson & Kim, 1998), impactando setores como por exemplo o abastecimento de água e a geração de energia através das hidrelétricas (Ng et al., 2017; Kelman et al., 2000; Gelati et al., 2010). Assim, compreender a relação entre o fenômeno e o comportamento hidrológico das bacias é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, permitindo medidas mais eficazes para mitigar os impactos de eventos extremos.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é investigar evidências estatísticas da influência do fenômeno ENOS nas séries de vazões afluentes a um reservatório, utilizando a Usina Hidrelétrica (UHE) Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, no rio Iguaçu (PR), como estudo de caso. Diferentemente dos estudos previamente citados, as análises aqui apresentadas são feitas para vazões médias trimestrais, escala consoante com a utilizada pelos principais índices de monitoramento do ENOS. Detalhes adicionais são providenciados nas sessões a seguir.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo analisa a influência do fenômeno ENOS, em suas fases positiva (El Niño) e negativa (La Niña), sobre as vazões afluentes à UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto. São analisados dados hidrológicos e climáticos no período de 1950 a 2023, com a comparação entre anos classificados como neutros e anos de ocorrência do fenômeno, tanto na fase positiva quanto negativa. A análise buscou identificar padrões ou anomalias nas vazões médias trimestrais em resposta às diferentes fases do ENOS.

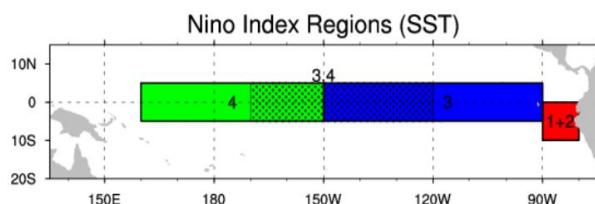
Índice de monitoramento do ENSO

A identificação das fases do ENOS tem sido objeto de estudo ao longo dos anos com base na observação de séries temporais de diferentes variáveis. Dada a complexidade do fenômeno, resultante

da interação entre os sistemas oceânico e atmosférico, os índices desenvolvidos para monitorá-lo geralmente consideram uma ou ambas as componentes. No presente trabalho, optou-se pelo uso do Índice Oceânico de El Niño (ONI), segundo recomendações de Silva (2021).

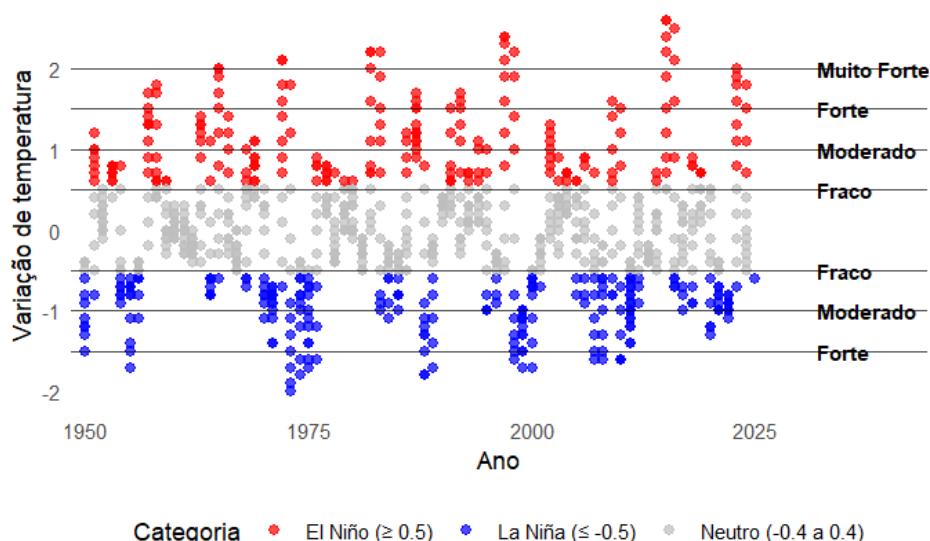
O ONI estabeleceu-se como a referência principal pela agência norte americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para classificar os eventos de El Niño e La Niña no leste do Pacífico tropical. Ele observa a média móvel de três meses da anomalia da temperatura da superfície do mar para a região Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120° - 170°W), localizada no Pacífico tropical leste-central (Figura 1).

Figura 1 - Regiões do Oceano Pacífico monitoradas como índices do ENSO. A região Niño 3.4 é utilizada para compor o índice ONI. Fonte: Souza & Reboita (2021)



Os eventos são definidos por cinco períodos consecutivos de três meses sobrepostos, com anomalias iguais ou superiores a $+0,5^{\circ}$ para eventos de El Niño (quentes) e iguais ou inferiores a $-0,5^{\circ}$ para eventos de La Niña (frios). A classificação é dividida em: Fraco (anomalia entre $0,5^{\circ}$ e $0,9^{\circ}$), Moderado ($1,0^{\circ}$ a $1,4^{\circ}$), Forte ($1,5^{\circ}$ a $1,9^{\circ}$) e Muito Forte ($\geq 2,0$, esta somente para El Niño). Dessa maneira, a Figura 2 foi construída a partir do ONI, aplicando os critérios estabelecidos para a identificação e categorização em toda série histórica registrada. Nele, é possível visualizar a variação das anomalias da temperatura da superfície do mar ao longo do tempo, bem como a classificação de cada evento de acordo com sua intensidade.

Figura 2 - Série histórica do índice ONI, incluindo a classificação das intensidades dos fenômenos El Niño e La Niña.



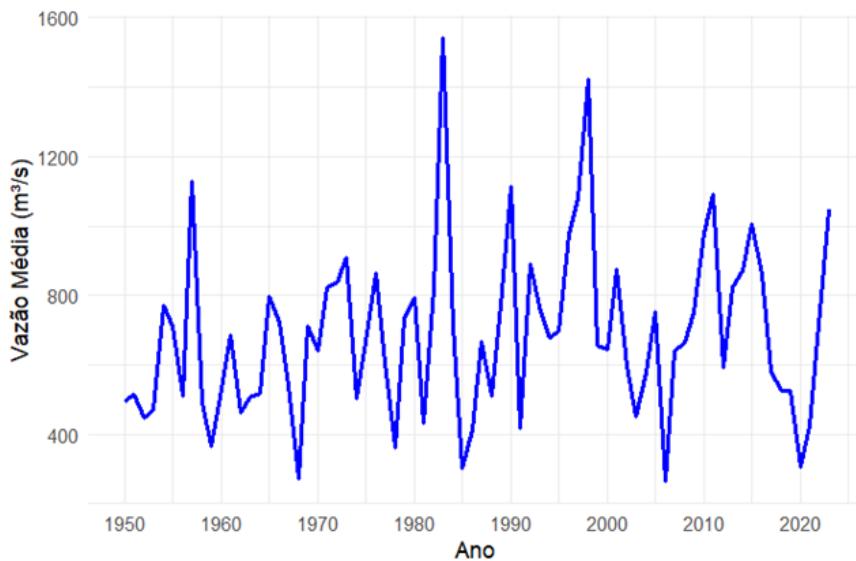
Na comparação entre as fases positivas e negativas do fenômeno, é possível observar uma maior ocorrência da fase El Niño em comparação com a La Niña ao longo do histórico. Da mesma forma, as ocorrências de manifestações El Niño classificados como Muito Fortes são notáveis, em particular nos anos de 1983, 1998 e 2014. Tais anos são bastante conhecidos na literatura (Hu et al., 2019), tendo produzido cheias de grande intensidade na região Sul do Brasil.

Dados de vazão

Para o estudo de caso deste artigo, optou-se pela UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, operada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL), com capacidade instalada de 1.676 MW. Está localizada no rio Iguaçu, no município de Pinhão, estado do Paraná, a cerca de 350 km de Curitiba e aproximadamente 5 km a jusante da foz do rio Areia.

Os dados de vazão utilizados foram obtidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que disponibiliza séries históricas de vazões afluentes às UHEs brasileiras. A série em escala anual na usina estudada é mostrada na Figura 3. Percebe-se valores de vazões médias elevadas para os anos de 1983 e 1998, anos coincidentes com duas das principais manifestações de El Niño consideradas Muito Fortes, conforme comentado no item anterior.

Figura 3 - Série de vazões médias anuais afluentes à UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto.



Para garantir a comparabilidade dos dados de vazão com os períodos identificados por meio do índice ONI, foi necessário compatibilizar a frequência temporal dos dados hidrológicos com os dados climáticos. O ONI é construído a partir de médias móveis trimestrais, ou seja, cada ponto da série representa a média da temperatura do oceano em um período de três meses consecutivos (ex.: dez-jan-fev, jan-fev-mar, etc.). Assim, para manter a coerência entre as duas bases de dados e permitir a análise conjunta, as vazões mensais da usina no período de 1950 a 2023 foram agrupadas e transformadas em médias trimestrais correspondentes. Esse procedimento consistiu em calcular, para cada trimestre, a média aritmética simples das vazões mensais envolvidas.

Teste de hipótese adotado

Para avaliar estatisticamente a influência das diferentes fases do fenômeno ENOS sobre as vazões afluentes à UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, optou-se por aplicar um teste de hipótese sobre combinações das amostras de vazões médias trimestrais referentes a períodos com e sem a manifestação dessas fases.

O teste escolhido foi o de Wilcoxon, também conhecido como Mann-Whitney, ou ainda *rank-sum test* (Helsel et al., 2020). Esta é uma inferência não paramétrica adequada para comparações entre amostras independentes. Diferentemente de testes paramétricos, ele não exige normalidade dos dados nem homogeneidade de variâncias, sendo particularmente útil para análises de dados assimétricos, ordinais ou com tamanhos amostrais reduzidos. Essa robustez o torna uma ferramenta valiosa em áreas como hidrologia e ciências ambientais, onde os dados frequentemente apresentam distribuições não normais ou outliers.

O teste é aplicado sobre duas amostras de tamanhos n_1 e n_2 , com $n_1 \leq n_2$. Como hipótese nula, assume-se que não há diferença na posição central entre as amostras, enquanto a hipótese alternativa (bilateral) assume haver diferença. A implementação do teste se baseia no ranqueamento conjunto de todas as observações das duas amostras, resultando $r_k = 1, 2, \dots, (n_1 + n_2)$. Nesse processo, são guardadas as informações de qual ranque pertence a cada amostra. Em seguida, calcula-se a soma W dos ranques da amostra de menor tamanho, conforme mostra a equação (1):

$$W = \sum_{i=1}^{n_1} r_i \quad (1)$$

Por fim, calcula-se a estatística do teste de acordo com a equação (2):

$$z = \frac{W - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2}{\sqrt{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)/12}} \quad (2)$$

A variável z tem distribuição normal padrão. Portanto, para um teste bilateral, a hipótese nula é rejeitada caso $|z| > z_{\alpha/2}$.

Vale mencionar que o teste de Wilcoxon é relativamente conhecido em trabalhos com séries temporais hidrológicas, porém ele frequentemente é empregado em estudos que buscam identificar tendências (Demirel et al., 2024; Saplıoğlu & Güçlü, 2022; Pilon & Yue, 2002). Para esses casos, uma série hidrológica é dividida em duas subamostras, as quais são submetidas ao procedimento do teste.

No presente trabalho, entretanto, o teste é empregado para as amostras oriundas das diferentes fases do fenômeno ENSO. As comparações foram feitas para as distribuições das vazões trimestrais em três cenários distintos: períodos de El Niño *versus* condições neutras, períodos de La Niña *versus* condições neutras, e períodos de El Niño *versus* períodos de La Niña. Em todos os casos, adotou-se a significância de 5%.

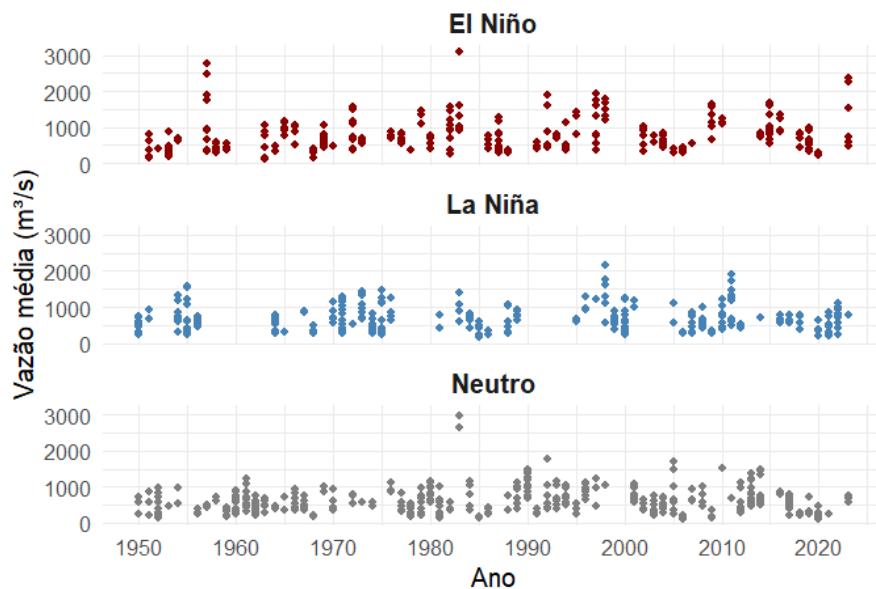
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vazões nas diferentes fases do ENSO

Para compreender a influência do fenômeno sobre o comportamento hidrológico da região, os dados de vazão foram analisados em conjunto com os registros de ocorrência das fases do fenômeno ao longo dos anos. Essa abordagem permitiu estabelecer uma correspondência entre cada ano, a fase específica do fenômeno registrada nesse período e os valores médios de vazão observados.

Com isso, foi possível identificar padrões e variações no comportamento da vazão associados a cada fase, fornecendo uma visão mais detalhada da relação entre o fenômeno e o regime hidrológico. Os resultados dessa análise integrada foram organizados na Figura 4, destacando as diferentes respostas de vazão conforme a fase do fenômeno.

Figura 4 – Vazões médias trimestrais associadas a cada fase do fenômeno ENSO.



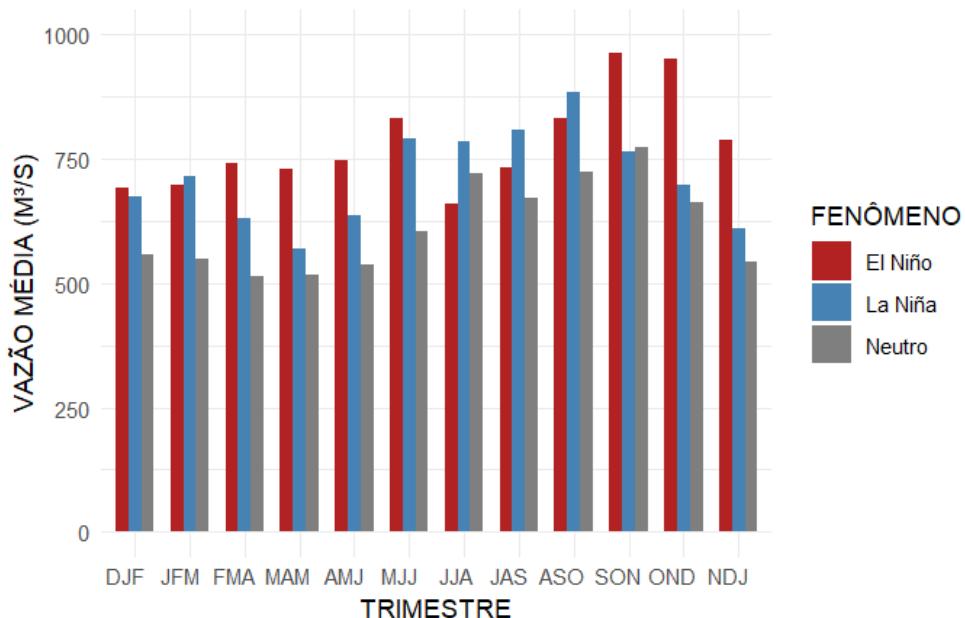
A Figura 4 apresenta as vazões médias trimestrais observadas entre 1950 e 2023, classificadas de acordo com a ocorrência dos fenômenos climáticos El Niño, La Niña e condições neutras. Um aspecto importante é a presença de lacunas na série da La Niña, especialmente entre as décadas de 1960 e 1990, indicando longos períodos sem a manifestação desse fenômeno. Já o El Niño apresenta uma distribuição mais regular ao longo das décadas, com eventos espalhados de maneira relativamente uniforme no tempo. As condições Neutras estão presentes em quase todos os intervalos da série, sem lacunas longas.

Outro ponto a destacar é a parcial correspondência entre as vazões médias trimestrais dos anos 1983, 1998 e 2014 e as fases do ENSO. Para o ano de 1983, a vazão média trimestral máxima ($3.110 \text{ m}^3/\text{s}$, cerca de 400% maior do que a vazão trimestral média de longo termo) ocorreu no trimestre mai-jun-jul e está associada ao El Niño. Os dois trimestres seguintes (jun-jul-ago e jul-ago-set) também registraram vazões elevadas (acima dos $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$, cerca de 322% superior que a vazão trimestral média de longo termo), contudo estão associados a períodos neutros. Isso sugere uma defasagem temporal entre o momento da detecção do sinal do El Niño e os impactos verificados nas vazões da usina estudada. Esse deslocamento é também percebido nos demais anos. Por outro lado, o pico

observado no ano de 1957 ($2.700 \text{ m}^3/\text{s}$, 334% acima da vazão média trimestral de longo termo) parece se enquadrar bem ao fenômeno El Niño.

A Figura 5 mostra as vazões médias trimestrais de longo termo para cada fenômeno separadamente. Observa-se que, no geral, trimestres com a manifestação do fenômeno El Niño resultam em vazões médias consideravelmente mais elevadas quando comparados aos trimestres neutros. A única exceção acontece no trimestre jun-jul-ago, o qual experimentou vazões importantes principalmente no ano de 1983, como comentado previamente.

Figura 5 – Vazões médias trimestrais associadas a cada fase do fenômeno ENSO.



Outra constatação importante se refere ao fenômeno La Niña. Para todos os trimestres, exceto set-out-nov, as vazões associadas foram também superiores às dos períodos neutros. Além disso, para os trimestres jan-fev-mar, jun-jun-ago, jul-ago-set e ago-set-out, vazões associadas à La Niña superaram os valores para vazões associados ao El Niño. Este é um resultado importante, pois demonstra que independente da fase do fenômeno ENSO, as vazões do rio Iguaçu no ponto estudado tendem a responder positivamente.

Resultados do teste estatístico

A aplicação do teste de Wilcoxon sobre as amostras separadas por fase do fenômeno ENSO resultou nos p-valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da aplicação do teste de Wilcoxon para as vazões associadas às diferentes fases do ENSO.

Fases	p-valor
El Niño versus Neutro	<0,001
La Niña versus Neutro	<0,001
El Niño versus La Niña	0,234

Tanto para o El Niño como para a La Niña, os p-valores inferiores a 0,05 sugerem significância estatística na diferença entre as vazões associadas. Por outro lado, na comparação entre vazões observadas durante períodos El Niño e La Niña, não foi detectada diferença estatística significativa. Estes resultados corroboram as análises apresentadas no item anterior.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo sugerem que o fenômeno ENOS exerce influência significativa sobre o regime hidrológico da bacia do rio Iguaçu, especialmente nas vazões afluentes à UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto. As análises estatísticas realizadas com o teste de Wilcoxon revelaram diferenças expressivas entre os anos classificados como El Niño ou La Niña em relação aos anos neutros, com indicação de alterações relevantes no comportamento das vazões associadas às fases ativa do ENOS. Essa manifestação se mostrou em favor de uma elevação nas vazões quando da ocorrência do fenômeno.

Por outro lado, a comparação direta entre os períodos de El Niño e La Niña não apresentou diferença estatisticamente significativa, sugerindo que, apesar de que ambos os fenômenos alteram o regime hidrológico em relação à condição normal, suas manifestações trazem impactos de magnitude semelhante sobre as vazões, mesmo que os fenômenos sejam distintos entre si.

As análises desenvolvidas reforçam a importância do monitoramento contínuo das anomalias oceânicas e atmosféricas associadas ao ENOS como ferramenta de suporte à gestão dos recursos hídricos. A compreensão prévia dos efeitos prováveis das diferentes fases do fenômeno pode contribuir para o planejamento estratégico da operação de reservatórios, mitigação de impactos de eventos extremos e melhoria dos modelos hidrológicos preditivos. Assim, na continuidade dos trabalhos, sugere-se que defasagens temporais entre o sinal ONI e as vazões observadas sejam promovidas, a fim de melhor compreender a dinâmica entre o fenômeno e seus impactos no regime hidrológico da bacia estudada.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro obtido por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

REFERÊNCIAS

DEMIREL, I.H.; KESGIN, E.; GÜCLÜ, Y. S.; TAN, I.R.; BAŞARAN, B. (2024). “*Trend Stability Assessment for Hydrological Drought in Euphrates Basin (Türkiye) Using Triple Wilcoxon Test and Innovative Trend Analysis Methods*”. *Water*, 16(19), 20734441.

GELATI, E.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D. (2010) “*Markov-switching model for nonstationary runoff conditioned on El Niño information*”. *Water Resources Research*, 46(2). <https://doi.wiley.com/10.1029/2009WR007736>.

HELSEL, D.R., HIRSCH, R.M., RYBERG, K.R., ARCHFIELD, S.A., GILROY, E.J. (2020). *Statistical methods in water resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, book 4, chap. A3, 458 p. <https://doi.org/10.3133/tm4a3>.

KELMAN, J.; VIEIRA, A.D.M.; RODRIGUEZ-AMAYA, J.E. (2000) “*El Niño influence on streamflow forecasting*”. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 14(2), pp. 123–138.

LEE, D.; WARD, P.J.; Block, P. (2018). “*Identification of symmetric and asymmetric responses in seasonal streamflow globally to ENSO phase*”. Environmental Research Letters 13(4), 044031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab4ca>

NG, J.Y.; TURNER, S.W.D.; GALELLI, S. (2017). “*Influence of El Niño Southern Oscillation on global hydropower production*”. Environmental Research Letters 12(3), pp. 034010.

NICHOLSON, S.E.; KIM, J. (1998) “*The Relationship of the El Niño-Southern Oscillation to African Rainfall*”. International Journal of Climatology 17(2), pp. 117–135.

PILON, P.J.; YUE, S. (2002). “*Detecting climate-related trends in streamflow data*”. Water Sciences & Technology 45(8), pp. 89–104. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0151>.

SAPLIOĞLU, K.; GÜCLÜ, Y.S. (2022). “*Combination of Wilcoxon test and scatter diagram for trend analysis of hydrological data*”. Journal of Hydrology 612, Part A, pp. 128132, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128132>.

SOUZA, C.A. de; REBOITA, M.S. (2021). “*Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul*”. Terraes Didatica, 17(00), pp. e02109, 2021. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8663474>

TIMMERMANN, A. et al. (2018). “*El Niño-Southern Oscillation complexity*”. Nature 559, pp. 535–541. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.

WARD, P.J.; KUMMU, M.; LALL, U. (2016). “*Flood frequencies and durations and their response to El Niño Southern Oscillation: Global analysis*”. Journal of Hydrology 539, pp. 358–378.