

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DINÂMICA SEDIMENTOLÓGICA EM UMA SUB-BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS E SUA RELAÇÃO COM O EL NIÑO-OSCILAÇÃO SUL: UMA ABORDAGEM COM TESTES ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS E NÃO PARAMÉTRICOS

Robson Gualberto de Carvalho Júnior¹ ; Vitor Rocco Albernaz² & Wellington Lopes Assis³

Abstract: The objective of this paper is correlate cycle oscillations of precipitation with sedimentological dynamics on a sub-basin of Alto Rio das Velhas, with emphasis on the effects associated with *El Niño*-Southern Oscillation (ENSO). Were compared the periods of early 1979 and late 1985 and the early 2012 and late 2018, with corresponding control samples, with primary focus on 2012-2018 interval. Statistical analyses were conducted using Mann-Whitney U test and Student's t-test to indicate significative differences and changes on precipitation and solid discharge over historical series. The results indicate the increases or decreases in precipitation cycles probably associated with ENSO events cause cycle answers on sedimentological dynamic of sub-basin on study. Both statistical tests presented different conclusions to anual precipitation data of sub-basin, that follows normal distribution. About solid discharge, the Mann-Whitney U test indicate significative difference between samples period and their respective control group.

Resumo: O objetivo desse estudo é correlacionar oscilações periódicas da precipitação com a dinâmica sedimentológica em uma sub-bacia do Alto Rio das Velhas, com ênfase nos efeitos associados aos eventos *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS). Foram comparados os períodos do início de 1979 ao fim de 1985 e início de 2012 ao fim de 2018, com suas respectivas amostras de controle, com enfoque principal no intervalo de 2012-2018. Foram utilizados o teste U de Mann-Whitney e o teste t de Student para apontar diferenças significativas e mudanças nas variáveis precipitação e vazão sólida ao longo da série histórica. Os resultados indicam que o aumento ou diminuição cíclicos da precipitação provavelmente associados ao ENOS causam respostas periódicas na dinâmica sedimentológica da sub-bacia de estudo. Os dois testes estatísticos apresentaram diferentes conclusões para os dados de precipitação anual da sub-bacia, que seguem à distribuição normal. Quanto aos valores de vazão sólida, o teste U de Mann-Whitney apontou diferença significativa entre as amostras e seus respectivos conjuntos de controle.

Palavras-Chave – Testes estatísticos; Sedimentos; Hidrologia

1) TRACTEBEL, R. Paraíba – Savassi 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, robson.gualberto@tractebel.enge.com.

2) TRACTEBEL, R. Paraíba – Savassi 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, vitor.albernaz@tractebel.enge.com.

3) Department of Geography, Federal University of Minas Gerais (UFMG), Ave. Antônio Carlos – Belo Horizonte, 31270-901, Minas Gerais, Brazil, assisw@ufmg.br.

INTRODUÇÃO

A compreensão dos efeitos das oscilações climáticas de grande escala sobre a precipitação é um tema amplamente discutido na literatura científica. Particularmente, a relação entre a variabilidade pluviométrica e os ciclos do *El Niño*-Oscilação-Sul (ENOS) tem sido explorada por diversos autores, como: De Gois *et al.*, 2023; Mota *et al.*, 2019; Carpenedo e De Paula Lima, 2022. Sendo que Minuzzi *et al.* (2005) quantificou a influência dos eventos *La Niña* e *El Niño* no Estado de Minas Gerais, com fortes indícios de que há relação clara com a precipitação.

Além de sua importância direta, a precipitação exerce papel central em diversos processos ambientais, como a formação da vazão, o transporte de sedimentos, a erosão do solo e o deslocamento de poluentes. Logo, sendo a precipitação sensível às oscilações climáticas, espera-se que os processos ambientais correlacionados sejam afetados de forma indireta.

Nesse sentido, Albernaz *et al.* (2023) correlacionou a vazão sólida diária da estação fluviométrica 41199998, monitorada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com dados de precipitação médios diários em uma sub-bacia do Alto Rio das Velhas obtidos na base de dados *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD Xavier *et al.* 2022). Os resultados indicaram padrões anuais (365 dias) e outras repetições de eventos em períodos abaixo de um ano em ambos os gráficos. Porém, há um enfraquecimento abrupto no padrão anual da descarga sólida no período de 2012 a 2018, que foi relacionado com possíveis efeitos de oscilações climáticas.

A correlação linear entre a precipitação acumulada e a vazão sólida acumulada discutida por Albernaz *et al.* (2023) apresentaram tendências distintas ao longo do tempo. Cita-se a diminuição da conversão da precipitação em sedimentos no período de jan/2013 a jul/2020, evidenciada pela menor inclinação da reta de ajuste, e a elevada inclinação da reta no período de jan/1979 a dez/1985. Condições que podem estar relacionadas com a diminuição e aumento das chuvas nos respectivos períodos, hipóteses que serão testadas nesse estudo. Dessa forma, o objetivo deste estudo é identificar diferenças significativas nos dados de descarga sólida e precipitação, principalmente entre os anos de 2012 e 2018, na estação fluviométrica 41199998, além de analisar a correlação desses dados com os eventos do *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) no período, hipótese discutida nos resultados de Albernaz *et al.* (2023).

METODOLOGIA

A metodologia foi definida pela coleta e transformação dos dados, elaboração de gráficos, cálculo de estatísticas que visualizem o fenômeno proposto (ênfase no período 2012-2018) e testes estatísticos que, por fim, confirmarão a análise.

Os dados de vazão líquida e sólida utilizados neste estudo referem-se à estação Honório Bicalho Montante (HBM - código ANA 41199998), os mesmos empregados por Albernaz *et al.* (2023). A vazão líquida foi obtida a partir do sistema HidroWeb (ANA, 2025), enquanto a vazão sólida (Q_s) foi calculada mediante a curva-chave desenvolvida pelos autores, calibrada com medições de 1981 a 2018. Os dados cadastrais da estação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados cadastrais da estação fluviométrico utilizada no estudo

Código (ANA)	Nome	Curso d'Água	Município	Latitude (m) SIRGAS 2000 23S	Longitude (m) SIRGAS 2000 23S	Área de Drenagem (km ²)
41199998	Honório Bicalho Montante	Montante Rio das Velhas	Nova Lima	623.013,67	7.785.353,02	1.671,95

A curva-chave de descarga sólida ($R^2 = 0,82$) foi desenvolvida mediante transformação logarítmica dos pares de dados de vazão líquida e sólida, conforme metodologia consolidada para dados de vazão sólida (Carvalho, 2008). Obteve-se série temporal de vazão sólida diária de abril/1971 a novembro/2023, convertendo-se vazão líquida (m³/s) em vazão sólida (ton/dia) pelas equações da curva chave abaixo.

$$Q_s = 0,0002070813(Q^{4,26962}) \quad \text{se } Q \leq 56,375238 \quad (1)$$

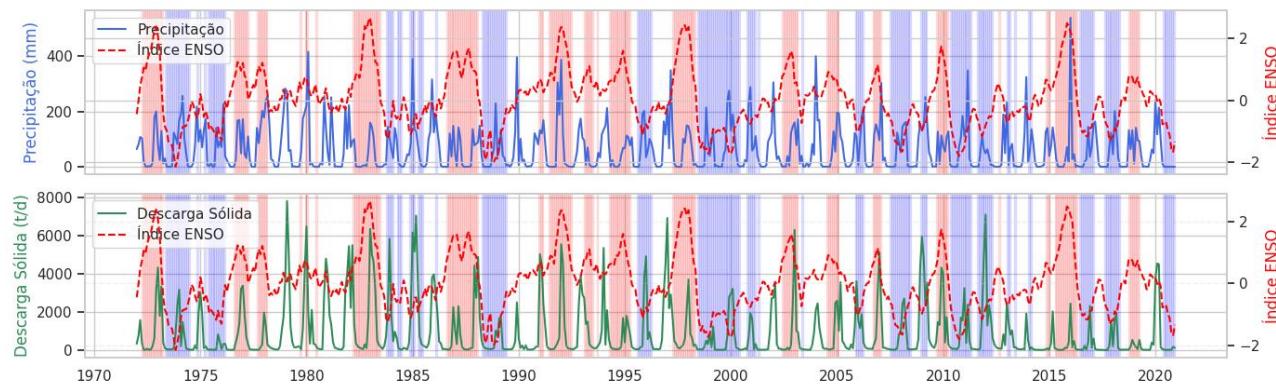
$$Q_s = 2.186,9764155(Q^{0,26117}) \quad \text{se } Q > 56,375238 \quad (2)$$

Para a precipitação, levantou-se a série diária (1961-2023) do banco de dados de Xavier *et al.* (2022) para o Brasil com resolução de 0,1°, calculando-se médias dos pontos da grade contidos na bacia de drenagem da estação HBM com *buffer* de 0,05°.

As medições de temperatura e anomalias da Região 3.4 do Pacífico foram baixadas em CPC/NOAA (2025), a fim de indicar eventos (Neutralidade, *El Niño* e *La Niña*) que ocorreram de 2012 a 2018. A série temporal abrangida é de 01/01/1950 até 31/09/2024.

Apresenta-se a série de precipitação acumulada mensal, de descarga sólida média mensal, e as anomalias ENOS da Região 3.4 do Pacífico de forma gráfica na Figura 1.

Figura 1 – Séries de dados de precipitação, descarga sólida e ENOS.



Os resultados foram seccionados em estatística descritiva, gráficos *box plot* de distribuição dos dados e, por fim, testes estatísticos que confirmarão ou rejeitarão as hipóteses arguidas nas etapas anteriores. A etapa de estatística descritiva teve como objetivo a realização de uma análise inicial dos dados, e serviu de base para a escolha dos testes que foram aplicados, os quais foram escolhidos conforme a distribuição dos dados.

RESULTADOS

Apresenta-se na Tabela 2 a estatística descritiva dos dados de precipitação anual na área da sub-bacia somados anualmente (1961-2023) e os dados médios anuais de vazão sólida da respectiva estação (1971-2023). As colunas indicadas por “controle” mostram estatísticas dos dados anteriormente a 2012 e após 2018, de acordo com a série histórica obtida de cada tipologia.

Tabela 2 – Estatística descritiva (precipitação anual e vazão sólida anual)

Estatística	Precipitação Anual [mm] (2012-2018)	Precipitação Anual [mm] (controle)	Vazão Sólida Média Anual [ton/dia] (2012-2018)	Vazão Sólida Média Anual [ton/dia] (controle)
n	7	56	7	46
Média	1332,19	1552,50	480,07	997,12
Mediana	1381,40	1520,66	377,42	844,32
Desvio Padrão	272,25	293,24	389,26	517,71
Mínimo	854,11	555,00	76,09	151,20
Máximo	1597,20	2158,90	1238,55	2397,35
Coeficiente de Assimetria	-0,99	-0,29	1,37	1,06
p-valor (Teste de Shapiro-Wilk)	0,30	0,10	0,31	0,0021

Os valores da média, e mediana da série de precipitação anual são ligeiramente menores na amostra de 2012-2018, indicando um período de escassez hídrica. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk utilizando a biblioteca *scipy.stats* do Python (Virtanen *et al.*, 2020), sendo que esse teste é usado para testar a hipótese nula de que os dados seguem à distribuição normal, rejeitada se p-valor do teste é menor ou igual a 0,05 (5,00%). O p-valor do teste de Shapiro-Wilk para ambas as amostras de precipitação foi acima de 0,05, logo há evidência estatística de que os grupos seguem à distribuição normal, permitindo a aplicação de testes paramétricos.

Destaca-se que a diferença entre as estatísticas da vazão sólida entre o período de 2012 a 2018 em relação ao grupo de controle é de maior magnitude, como observa-se na redução da média e mediana, de respectivamente, 51,85% e 55,30%. Essas variações indicam que houve alteração na dinâmica dos processos que influenciam a vazão sólida no período. O teste de Shapiro-Wilk aplicado indica que os dados da amostra de controle não seguem à distribuição normal devido ao p-valor menor que 0,05, logo não são possíveis testes estatísticos paramétricos, que pressupõem distribuição normal.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados gráficos *box plot* que permitem visualizar o fenômeno proposto, apresentando dados de precipitação e vazão sólida.

Figura 2 – Gráficos *box plot* da distribuição da precipitação anual

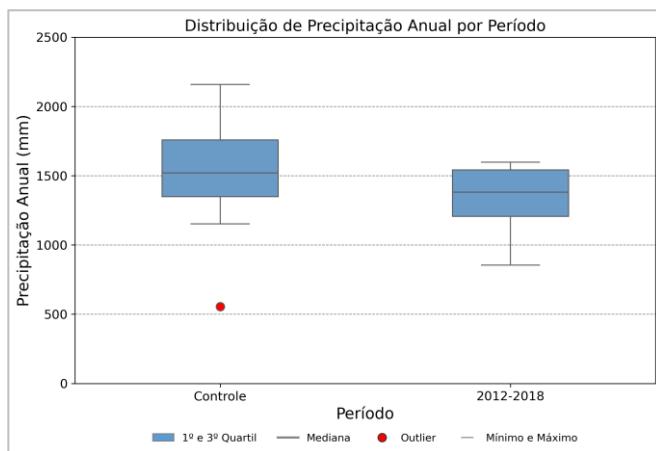
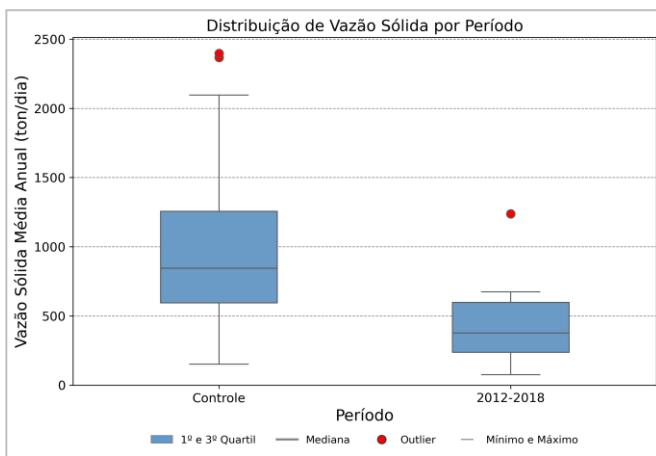


Figura 3 – Gráficos *box plot* da distribuição da vazão sólida média anual



As figuras demonstram indicativos de diminuição dos valores medidos entre o início de 2012 e fim de 2018 em relação ao grupo de controle. Os gráficos apontam as condições já observadas na estatística descritiva de diminuição da descarga sólida e precipitação no período de 2012-2018, porém de forma mais visual.

Segundo Trenberth (1997), as oscilações do *El Niño*–Oscilação Sul (ENOS) são indicadas a partir do sexto mês consecutivo das anomalias que os caracterizam. Anomalias entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,5^{\circ}\text{C}$ por seis meses consecutivos caracterizam eventos de neutralidade, acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ *El Niño* (aquecimento) e abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$ *La Niña* (resfriamento). A Tabela 3 apresenta os fenômenos do ENOS no período de 2012 a 2018, levantados a partir dos dados de anomalias da Região *Niño* 3.4 (CPC/NOAA, 2025). As datas de início foram sentenciadas a partir do sexto mês consecutivo, assim como o cálculo da anomalia média.

Tabela 3 – Eventos do *El Niño*–Oscilação Sul (ENOS) de 2012 a 2018

Evento	Início	Fim	Duração (meses)	Anomalia Média
<i>La Niña</i>	janeiro, 2012	março, 2012	3	-0,72
Neutralidade	setembro, 2012	outubro, 2014	26	-0,13
<i>El Niño</i>	agosto, 2015	abril, 2016	9	2,09
Neutralidade	julho, 2017	setembro, 2017	4	-0,01

A Tabela 3 demonstra que os anos de 2012 a 2018 foram muito atípicos em relação aos eventos do ENOS. Primeiramente, um evento de neutralidade que perdurou por extensos 26 meses consecutivos, sendo que essa duração apenas foi superada por outro evento de neutralidade entre meados de 1959 e 1963 (45 meses) e um evento *La Niña* de aproximadamente 1998 a 2001 (27 meses). Esse longo evento de neutralidade foi seguido por um *El Niño* com anomalia média de 2,09°C, a maior anomalia média entre todos os eventos *El Niño* considerando a metodologia de classificação dos eventos e a série temporal obtida.

Trenberth e Hoar (1996) sugerem que os eventos *El Niño* se tornaram mais frequentes a partir da década de 1970, e ciclos sem precedentes ocorreram a partir desse marco. Esses extremos foram vinculados às mudanças do clima em toda a bacia do Pacífico, revelando que os processos atmosféricos e a interação oceano-atmosfera afetam as características do ENOS. Nesse estudo também foram utilizados testes estatísticos para demonstrar essa mudança abrupta, uma vez que os eventos *El Niño* nesse período teriam probabilidade de ocorrência de uma vez a cada dois mil anos.

A partir do exposto sobre a distribuição dos dados e os eventos climáticos, foram realizados testes estatísticos sobre as variáveis vazão sólida e precipitação, comparando-se o período de controle com a série de 2012 a 2018. Adicionalmente, o período de 1979-1985 também foi aplicado para a precipitação, verificando se houve aumento das chuvas nesse intervalo de tempo. O teste U de Mann-Whitney (Tabela 4) foi realizado com a biblioteca Python *scipy.stats* (Virtanen *et al.*, 2020). As amostras de controle referem-se à série temporal externa ao intervalo entre os anos de início e fim da respectiva amostra 2, de acordo com a série temporal de cada variável apresentada na metodologia.

Tabela 4 – Teste U de Mann-Whitney aplicado às variáveis de interesse

Variável	Direção do Teste	Amostra 1	Amostra 2	H_0	H_a	p-valor do Teste	Conclusão do Teste
Prec. Anual	Unilateral	Controle	2012-2018	$M1 \leq M2$	$M1 > M2$	0,055	Não rejeitar H_0
Prec. Anual	Unilateral	Controle	2012-2017	$M1 \leq M2$	$M1 > M2$	0,033	Rejeitar H_0
Prec. Anual	Unilateral	Controle	1979-1985	$M1 \geq M2$	$M1 < M2$	0,091	Não rejeitar H_0
Vazão Sólida Média Anual	Unilateral	Controle	2012-2018	$M1 \leq M2$	$M1 > M2$	0,0021	Rejeitar H_0
Vazão Sólida Média Anual	Unilateral	Controle	1979-1985	$M1 \geq M2$	$M1 < M2$	0,0004	Rejeitar H_0

O teste U de Mann-Whitney foi aplicado aos dados de precipitação anual (mm) comparando a amostra de controle com os períodos e nível de significância igual a 0,05 (5,00%). Os resultados indicam que, ao comparar a mediana do grupo controle com a do período 2012-2018, não há evidências estatísticas suficientes (p-valor = 0,055) para afirmar que a precipitação do controle seja maior. Em contraste, na comparação entre o controle e o período 2012-2017, a mediana do controle foi significativamente maior (p-valor = 0,033). Essa mudança pode ser explicada pela exclusão do

ano de 2018, cuja precipitação foi de 1548,09 mm (próximo à média de 1.528,02 mm no período de 1961 a 2023), indicando retorno à média após o período de escassez. Por fim, na análise com o período 1979-1985, não foi possível concluir que a mediana do controle fosse menor (*p*-valor = 0,091), já que o resultado não atingiu significância estatística.

O resultado do teste U de Mann-Whitney aplicado indica que há evidência estatística de redução da vazão sólida no período de 2012-2018, considerando o nível de significância de 5,00%. Conforme discutido por Albernaz *et al.* (2023), de jan/2013 a jul/2020 houve diminuição da conversão da precipitação em vazão sólida na reta de ajuste, o que pode explicar essa redução.

Entre as limitações do teste, pode ser citado o fato de os valores observados serem substituídos pela classificação dos postos em ordem crescente. Como por exemplo, os valores observados de 854,08 mm em 2014 e 555,00 mm em 1963, ambos muito abaixo da média de 1.528,02 mm do período de 1961 a 2023. Além disso, os testes não paramétricos usam o conceito de mediana (M), ao contrário dos testes paramétricos que utilizam a média (μ), que é mais influenciada por outliers. Zimmerman (2013) indicou que a presença de *outliers* na amostra aumenta a probabilidade do erro tipo II no teste U de Mann-Whitney, relacionado ao teste não rejeitar a hipótese nula, sendo que ela deveria ser rejeitada. Zimmerman (2013) cita ainda que nesse teste os *outliers* são substituídos pelas posições extremas no ranqueamento entre as duas amostras, ou seja, a magnitude do *outlier* é descartada no cálculo da estatística do teste.

A seguir foi aplicado o teste t de Student (Tabela 5) com a biblioteca Python *scipy.stats* (Virtanen *et al.*, 2020) aos dados de precipitação anual, uma vez que seguem à distribuição normal como apontado na estatística descritiva. Há evidência de que a amostra de precipitação anual de 1979-1985 também segue à distribuição normal (*p*-valor do teste de Shapiro-Wilk igual a 0,26). O teste-F unilateral em ambas as avaliações resultou em evidência estatística significativa de que as variâncias são iguais ($F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$) sob o nível de significância de 5,00%. O teste-T pressupõe homocedasticidade entre as amostras (variâncias iguais) e considera a média (μ) das medições no cálculo das regiões de rejeição e não rejeição da hipótese nula (H_0).

Tabela 5 – Teste t de Student aplicado aos dados de precipitação anual

Variável	Direção do Teste	Amostra 1	Amostra 2	H_0	H_a	<i>p</i> -valor do Teste	Conclusão do Teste
Prec. Anual	Unilateral	Controle	2012-2018	$\mu_1 \leq \mu_2$	$\mu_1 > \mu_2$	0,032	Rejeitar H_0
Prec. Anual	Unilateral	Controle	1979-1985	$\mu_1 \geq \mu_2$	$\mu_1 < \mu_2$	0,037	Rejeitar H_0

O teste t de Student aplicado mostra que, ao contrário do teste U de Mann-Whitney, a hipótese nula deve ser rejeitada. Os resultados demonstram que há evidências estatísticas de diminuição significativa das chuvas no período de 2012-2018 e aumento significativo no período de 1979-1985. Além disso, os dados de precipitação anual seguem à distribuição normal, logo a média é a medida de tendência central mais representativa e os testes paramétricos são preferíveis.

CONCLUSÕES

Os resultados apontam que a condição de menores índices pluviométricos de 2012-2018, associados aos eventos atípicos e extremos do *El Niño*-Oscilação Sul, explicam a mudança de

repetições de padrões anuais na dinâmica sedimentológica na sub-bacia. Além disso, foram identificadas as propriedades dos testes U de Mann-Whitney e t de Student, assim como suas relações com os outliers, objetos do estudo. Logo, quando os dados ambientais seguem à distribuição normal, a aplicação do teste t de Student pode complementar os resultados do teste U de Mann-Whitney e indicar conclusões diferentes quanto à rejeição ou não rejeição da hipótese nula.

A elevada conversão da precipitação em sedimentos no período de 1979-1985 está relacionada com os maiores índices pluviométricos no período, sendo que as tendências foram estatisticamente significativas.

Sugere-se que as oscilações climáticas extremas negativas e positivas possuem influência significativa sobre a dinâmica sedimentológica da sub-bacia estudada, evidência arguida pelos resultados dos testes aplicados.

Com essa metodologia definida, os próximos passos serão aplicá-la a outras bacias do território brasileiro. Principalmente as mais impactadas pela superexploração dos recursos hídricos e com diferentes condições de uso e ocupação do solo e tipos de solo, intervenientes na dinâmica sedimentológica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Estação hidrometeorológica 41199998 – Honório Bicalho Montante*. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

ALBERNAZ, V. R. et al. *Detecção de variações temporais em processos hidrológicos e sedimentológicos numa bacia do Alto Velhas*. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19–24 nov. 2023, Sergipe. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2023. ISSN 2318-0358. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15804>.

CARPENEDO, C. B.; DE PAULA LIMA, M. *Padrões Climáticos dos Extremos Chuvosos em Uberlândia - MG*. Revista Brasileira de Climatologia, v. 31, p. 486–508, 25 out. 2022.

CARVALHO, N de O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. Interciência Rio de Janeiro – RJ, 599 p.

CLIMATE PREDICTION CENTER – CPC/NOAA. *ERSSTv5 - Oceanic Niño Index (ONI): 3-month running mean SST anomalies in the Niño 3.4 region*. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>.

DE GOIS, G. et al. *A influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no índice de anomalia de chuvas do município de Viçosa (MG)*. Revista Brasileira de Climatologia, v. 33, p. 278–311, 15 set. 2023.

MINUZZI, R. B. et al. *El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 3, p. 364–371, set. 2005.

MOTA, E. P. D. et al. *Precipitações em Governador Valadares, MG e sua relação com o fenômeno ENOS nos períodos chuvosos de 2008 a 2017*. ForScience, v. 7, n. 1, 30 maio 2019.

TRENBERTH, K. E.; HOAR, T. J. *The 1990–1995 El Niño-Southern Oscillation Event: Longest on Record*. *Geophysical Research Letters*, v. 23, n. 1, p. 57–60, jan. 1996.

TRENBERTH, Kevin E. *The definition of El Niño*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 12, p. 2771–2777, dez. 1997. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/78/12/1520-0477_1997_078_2771_tdoeno_2_0_co_2.xml.

VIRTANEN, Pauli *et al.* *SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python*. *Nature Methods*, [S.I.], v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41592-019-0686-2>.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). “*New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020)*”. *Royal Meteorological Society, International Journal of Climatology*. 42, 8390-8404.

ZIMMERMAN, Donald W. *A note on the influence of outliers on parametric and nonparametric tests*. *The Journal of General Psychology*, v. 140, n. 4, p. 359–368, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221309.2013.811745>.