

ESTUDO DA ESTACIONARIEDADE DAS VAZÕES DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO, SÃO CARLOS – SP.

*Bruno Bernardo dos Santos¹; Dalva Maria Castro Vitti²; Flávia Maria de Toledo Pedrosa³;
Frederico Fábio Mauad⁴;*

RESUMO --- Entender a dinâmica de uma bacia hidrográfica e suas características hidrológicas é cada vez mais importante no que diz respeito ao gerenciamento de recursos hídricos. Ao proceder um estudo hidrológico se deve verificar a estacionariedade dos dados utilizados para entender fatores responsáveis por possíveis alterações no regime hidrológico, minimizando o impacto das incertezas do clima sobre esse gerenciamento. Neste estudo preliminar se objetivou analisar a estacionariedade das vazões máximas, médias e mínimas anuais. Para tanto, utilizou-se uma série hidrológica de 29 anos provenientes da bacia do Ribeirão do Feijão localizado em São Carlos, SP. Inicialmente, aplicou-se o teste Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das partições das séries de vazões. Em seguida, para as séries que apresentaram distribuição normal, aplicaram-se os testes F de Fisher e T de Student na verificação da igualdade das variâncias e das médias, respectivamente, com 5% de significância. Caso a série não apresentasse uma distribuição normal, aplicou-se o teste não-paramétrico Wilcoxon-Mann-Whitney. Os testes mostraram que as vazões médias e mínimas são estacionárias, enquanto as máximas são não estacionárias por serem susceptíveis a fenômenos pontuais dados pelas características das chuvas e umidade inicial no solo.

ABSTRACT --- The knowledge of the dynamic of watersheds and hydrologic characteristics is becoming important in water resources management. Doing an hydrological study we should verify the stationarity of the data used to understand the factors responsible for possible changes in the hydrological regime, minimizing the impact of uncertainties of climate on this management. The objective in this preliminary study was to analyze the stationarity of maximum, medium and annual minimum flows. For this, an hydrological serie of 29 years from fluviometric station located in São Carlos (SP) was used. Initially, it was applied the test Shapiro-Wilk to verify the normality of the partitions of the streamflow series. Then, for the series with normal distribution, the Fisher's F and Student's T tests were apply in verifying the equality of variances and averages, respectively, with 5% significance. If the series doesn't have a normal distribution, the nonparametric test Wilcoxon-Mann-Whitney was applied. The tests showed that the medium and minimum flow are stationary, but the maximum flow weren't considered because they are susceptible to phenomena specific caused by rainfall characteristics and initial moisture in the soil.

Palavras-chave: Hidrologia, climatologia, estacionariedade, estatística.

¹ Mestrando pelo programa de pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, São Carlos, SP. E-mail: bbernardo@sc.usp.br

² Doutoranda pelo programa de pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, São Carlos, SP. E-mail: dalva@sc.usp.br

³ Professora Mestre Pleno II, Faculdade de Tecnologia de Jahu, Jahu, SP. E-mail: flaviatoledo@hotmail.com

⁴ Professor Doutor, Programa de pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC, USP, São Carlos, SP. E-mail: mauadffm@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

Caracterizar os parâmetros hidrológicos de determinadas bacias hidrográficas é essencial em estudos de disponibilidade hídrica, para o acompanhamento de processos erosivos, assoreamento dos corpos hídricos, entre outros.

O entendimento da época e magnitude das vazões fornece uma valiosa ferramenta no desenvolvimento da gestão da água. Esses dados permitem o planejamento das cotas máximas de água nos reservatórios durante os períodos de cheia, com o intuito de assegurar a manutenção da oferta em tempos de escassez, e para atender a crescente demanda (Morán-Tejeda *et al.*, 2011).

A previsão de vazão em um sistema hídrico é uma das técnicas utilizadas para minimizar o impacto das incertezas do clima sobre o gerenciamento dos recursos hídricos podendo-se considerá-la um dos principais desafios relacionados ao conhecimento integrado da climatologia e hidrologia (Sousa *et al.*, 2010), já que segundo Morán-Tejeda *et al.* (2011), condições mais secas são esperadas, e estas são susceptíveis de reduzir a disponibilidade de água para os sistemas sociais, econômicos e ecológicos.

A interação das variáveis atmosféricas nas bacias hidrográficas refletem respostas nas vazões e regimes fluviais. A construção de reservatórios e utilização de água para usos múltiplos, ou segundo Goudie (2006), mudanças na temperatura global irão alterar a intensidade, duração, tipo e tempo de precipitação, o que afetará as vazões nos rios. Todos esses fatores podem ser responsáveis por mudanças no comportamento do regime hidrológico registrado na série histórica.

Estimar o tempo de retorno de uma cheia ou estiagem, na maioria das vezes pressupõe a estacionariedade dos processos hidrológicos subjacentes. Assim ao proceder em hidrologia a uma análise estatística, torna-se imperiosa a verificação da estacionariedade dos dados hidrológicos utilizados (Fill, 2011).

A análise de estacionariedade verifica a identidade da média e da variância de dois sub-períodos distintos de uma série hidrológica através dos testes t de Student e Fisher, sendo que a série deve se ajustar à distribuição normal para aplicação dos testes (Tucci, 2002), não sendo normal, aplica-se o teste de Wilcoxon.

A distinção entre flutuações naturais e mudanças de valor esperado em séries temporais pode ser efetuada a partir da aplicação de testes estatísticos para verificação da hipótese, comumente utilizada como pressuposto em diversos modelos estocásticos, referida como estacionariedade da série. Se uma série temporal é estacionária, suas características estatísticas são invariantes no tempo. Em particular, a estacionariedade indica que o valor esperado dos valores da série é invariante temporalmente (Damázio *et al.*, 2011).

Neste trabalho, objetivou-se estudar a estacionariedade das vazões máximas, médias e mínimas anuais para o Ribeirão do Feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo refere-se à bacia do ribeirão do Feijão, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Paraná. O ribeirão do Feijão se encontra sob as coordenadas 22° 04' 49,96" de latitude Sul e 47° 42' 59,63" de longitude Oeste, e 22° 09' 11,79" de latitude Sul e 47° 53' 20,56" de longitude Oeste. Nasce na Serra do Cuscuzeiro, sendo afluente do Rio Jacaré-Guaçu pela margem esquerda e este afluente do rio Tietê. O clima da região segundo Köppen é do tipo Cwa, com verões chuvosos e invernos secos, caracterizando seis meses quentes e úmidos e seis meses frios e secos.

O trabalho foi desenvolvido com dados hidrológicos de uma estação fluviométrica pertencente à rede hidrométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) de São Carlos (código 62760005) situado no Ribeirão do Feijão, apresentando área de drenagem de 229 Km².

Estudo de estacionariedade

A estacionariedade da série hidrológica foi demonstrada pela análise das vazões máximas, médias e mínimas anuais, obtidas através do software SisCAH 1.0 (Souza *et al.*, 2009). Ainda segundo o mesmo autor, recomenda-se, no estudo da estacionariedade, dividir as vazões em sub-grupos com no mínimo 5 dados.

Inicialmente, utilizou-se o teste Shapiro-Wilk para conferir se a amostra aleatória provém de uma distribuição normal, apresentado conforme Shapiro e Wilk (1965) e Kim (2011).

Para as amostras que apresentaram distribuição Normal, utilizou-se o teste F de Fisher para verificar a igualdade das variâncias. Na verificação da igualdade das médias, utilizou-se o teste T de Student. Vale observar que se as variâncias são iguais, realizou-se o teste T que considera as variâncias desconhecidas e iguais, e se as variâncias são diferentes, realizou-se o teste T que considera as variâncias desconhecidas e diferentes.

Entretanto, para as amostras que não apresentaram distribuição Normal, foi verificada se o Ln da amostra apresentava normalidade. Caso contrário, utilizou-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, conforme utilizado por Fill (2011) para verificação da igualdade das médias.

Esquemmatizou-se a metodologia aplicada nesse estudo para a análise da estacionariedade, apresentada na figura 1.

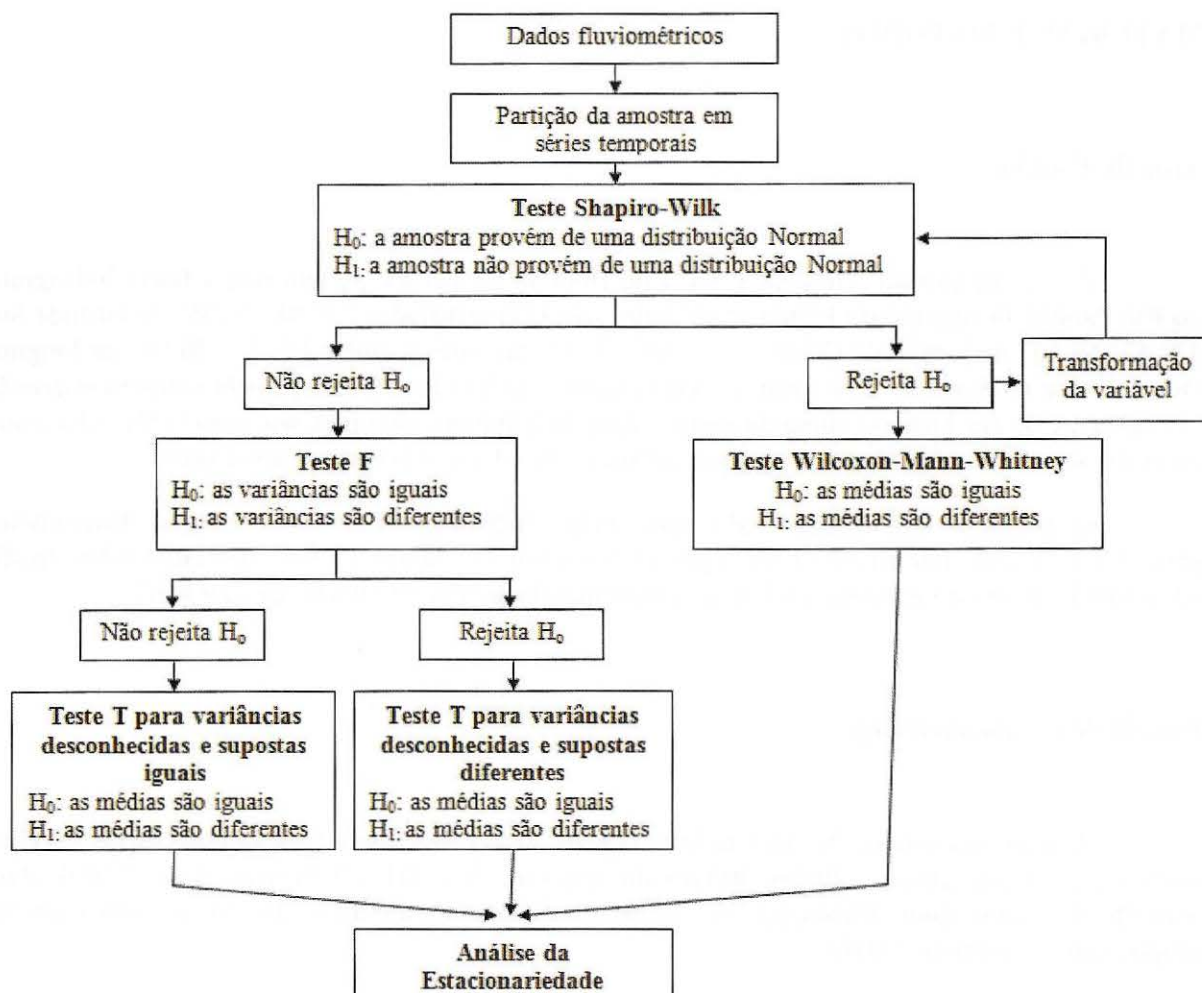


Figura 1 – Fluxograma da metodologia adotada para a análise da estacionariedade

Na resposta dos testes de hipóteses, um valor é comparado com o nível de significância previamente escolhido, sendo chamado de p-valor. O p-valor (nível de significância observado) é o menor nível de significância em que H_0 seria rejeitado, quando um procedimento de teste específico é usado em um determinado conjunto de dados. Assim, quando $p\text{-valor} \leq \alpha$ implica na rejeição de H_0 no nível α .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com auxílio do software SisCAH 1.0, obteve-se as vazões máximas ($Q_{\text{máx}}$), médias ($Q_{\text{méd}}$) e mínimas ($Q_{\text{mín}}$) para cada ano da série histórica (tabela 1).

Tabela 1 – Vazões anuais máximas, médias e mínimas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Ano	Q _{máx}	Q _{méd}	Q _{mín}	Ano	Q _{máx}	Q _{méd}	Q _{mín}
1977	19,45	3,68	1,66	1993	13,50	4,07	2,63
1978	18,45	3,31	1,55	1994	7,80	3,23	2,03
1979	13,15	3,59	1,87	1995	20,29	4,72	2,14
1980	17,91	3,61	2,21	1996	13,91	4,05	2,27
1982	14,56	4,21	2,57	1997	9,03	3,59	2,24
1983	21,11	6,01	3,78	1998	9,63	3,59	2,43
1984	12,13	3,78	2,52	2000	15,34	3,64	2,07
1985	7,80	3,21	1,7	2001	11,86	4,07	2,37
1986	10,50	2,95	1,68	2002	13,39	4,14	2,8
1987	12,81	3,29	1,87	2003	12,70	3,62	2,01
1988	16,77	3,45	2,06	2004	7,44	3,27	1,95
1989	15,65	3,39	2,23	2005	16,45	3,77	2,5
1990	14,92	3,82	2,34	2006	9,71	3,00	2,07
1991	14,20	3,88	1,39	2007	12,03	3,53	1,9
1992	8,37	3,41	2,39				

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA)

Para cada partição foi realizado o Teste Shapiro-Wilk para verificar a normalidade da amostra. Levando em consideração que na hipótese nula H_0 as amostras apresentam distribuição normal, com nível de significância de 5%, tem-se os seguintes resultados, estes apresentados nas tabelas 2 a 5.

Tabela 2 – Resultado do teste Shapiro-Wilk para a partição 1

		Série A			Série B		
		1977 - 1989			1990 - 2007		
		Estatística W	p-valor	Resultado	Estatística W	p-valor	Resultado
Partição 1	Q _{máx}	0,9836	0,9941	Normal	0,9565	0,5664	Normal
	Q _{méd}	0,7049	0,0009	não	0,9684	0,7899	Normal
	Ln(Q _{méd})	0,7951	0,0082	não	0,9803	0,9601	Normal
	Q _{mín}	0,8139	0,0136	não	0,9625	0,6791	Normal
	Ln(mín)	0,8978	0,1487	Normal	0,9132	0,1134	Normal

Tabela 3 – Resultado do teste Shapiro-Wilk para a partição 2

		Série A			Série B		
		1977 - 1990			1991 - 2007		
		Estatística W	p-valor	Resultado	Estatística W	p-valor	Resultado
Partição 2	Q _{máx}	0,9892	0,9994	Normal	0,9514	0,51331	Normal
	Q _{méd}	0,7131	0,0008	não	0,9644	0,74173	Normal
	Ln(Q _{méd})	0,8069	0,0082	não	0,9776	0,94199	Normal
	Q _{mín}	0,8293	0,0155	não	0,9646	0,74474	Normal
	Ln(Q _{mín})	0,9121	0,1959	Normal	0,9192	0,16366	Normal

Tabela 4 – Resultado do teste Shapiro-Wilk para a partição 3

		Série A			Série B		
		1977 - 1991			1992 - 2007		
		Estatística W	p-valor	Resultado	Estatística W	p-valor	Resultado
Partição 3	Q _{máx}	0,9909	0,9998	Normal	0,9457	0,4596	Normal
	Q _{méd}	0,7236	0,0007	não	0,9551	0,6078	Normal
	Ln(Q _{méd})	0,8198	0,0089	não	0,9708	0,8694	Normal
	Q _{mín}	0,8580	0,0285	não	0,9508	0,5367	Normal
	Ln(Q _{mín})	0,9463	0,5053	Normal	0,9616	0,7209	Normal

Tabela 5 – Resultado do teste Shapiro-Wilk para a partição 4

		Série A			Série B		
		1977 - 1992			1993 - 2007		
		Estatística W	p-valor	Resultado	Estatística W	p-valor	Resultado
Partição 4	Q _{máx}	0,9796	0,9665	Normal	0,9568	0,6703	Normal
	Q _{méd}	0,7088	0,0003	não	0,9561	0,6595	Normal
	Ln(Q _{méd})	0,8062	0,0044	não	0,9675	0,8418	Normal
	Q _{mín}	0,8697	0,0334	não	0,9385	0,3991	Normal
	Ln(Q _{mín})	0,9505	0,5318	Normal	0,9541	0,6264	Normal

Verificou-se que a hipótese nula de normalidade para a variável Q_{máx} em todas as partições não é rejeitada, diferentemente da variável Q_{méd}, na qual se rejeitou a hipótese, em todas as partições, mesmo realizando transformações nesta variável. A vazão mínima Q_{mín} precisou ser transformada para que a hipótese de normalidade não fosse rejeitada. Assim, para Q_{mín} se tomou o logaritmo de base “e”. Com isso, aplicou-se os testes F e T somente nas variáveis Q_{máx} e Ln(Q_{mín}).

Em relação ao teste F, para a variável Q_{máx}, verificou-se que as variâncias podem ser assumidas iguais em todas as partições de análise. Já para a variável Ln(Q_{mín}), os valores da estatística calculada revelam que as variâncias podem ser consideradas iguais somente nas partições 1 e 2 e deverão ser assumidas diferentes nas partições 3 e 4 (Tabela 6 e 7).

O teste T evidencia que não se deve rejeitar a hipótese nula de igualdade de médias para a variável Q_{máx} nas partições 1 e 4. Entretanto, o mesmo não ocorre nas partições 2 e 3, na qual verificou-se que as médias são consideradas diferentes. Para a variável Ln(Q_{mín}), as médias são consideradas estatisticamente iguais em todas as partições (Tabela 6 e 7).

Fill (2011) e Souza *et al.* (2012) realizaram a análise da estacionariedade comparando apenas as médias dos sub-períodos, então adotando essa metodologia de comparação, verifica-se que Q_{máx} não é uma série estacionária, enquanto que Ln(Q_{mín}) apresenta estacionariedade.

Pode-se assim observar que existe suscetibilidade das vazões máximas aos fenômenos pontuais, dada pela característica das chuvas e umidade inicial no solo antecedente ao evento, sem necessariamente indicar que a não estacionariedade da série seja resultado de ações antrópicas na vizinhança (Souza *et al.*, 2012)

Tabela 6 – Estudo de estacionariedade da Vazão máxima anual (Q_{\max}): subperíodos utilizados, variâncias s^2 , médias μ e (p-valor)

Partição	Sub-período		Teste F			Teste T		
			Variâncias s^2 ($m^3 s^{-1}$) ²			Médias μ ($m^3 s^{-1}$)		
	Série A	Série B	Série A	Série B	p-valor	Série A	Série B	p-valor
1	1977 - 1989	1990 - 2007	15,436 ^a	11,884 ^a	0,616	15,024 ^a	12,386 ^a	0,066
2	1977 - 1990	1991 - 2007	14,150 ^a	12,222 ^a	0,777	15,016 ^a	12,228 ^b	0,049
3	1977 - 1991	1992 - 2007	13,109 ^a	12,798 ^a	0,960	14,958 ^a	12,097 ^b	0,042
4	1977 - 1992	1993 - 2007	15,066 ^a	12,638 ^a	0,757	14,519 ^a	12,363 ^a	0,131

Obs: Variâncias e médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste F e teste t, respectivamente, a 5%.

Tabela 7 – Estudo de estacionariedade das $\ln(Q_{\min})$ anuais: subperíodos utilizados, variâncias s^2 , médias μ e (p-valor)

Partição	Sub-período		Teste F			Teste T		
			Variâncias s^2 ($m^3 s^{-1}$) ²			Médias μ ($m^3 s^{-1}$)		
	Série A	Série B	Série A	Série B	p-valor	Série A	Série B	p-valor
1	1977 - 1989	1990 - 2007	0,062 ^a	0,025 ^a	0,097	0,730 ^a	0,782 ^a	0,499
2	1977 - 1990	1991 - 2007	0,058 ^a	0,027 ^a	0,152	0,739 ^a	0,778 ^a	0,615
3	1977 - 1991	1992 - 2007	0,066 ^a	0,013 ^b	0,005	0,710 ^a	0,807 ^a	0,209
4	1977 - 1992	1993 - 2007	0,063 ^a	0,014 ^b	0,010	0,721 ^a	0,803 ^a	0,266

Obs: Variâncias e médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste F e teste t a 5%.

A comparação das médias para a variável $Q_{\text{méd}}$ foi realizada através de um teste não paramétrico denominado Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Os valores obtidos para este teste estatístico mostram que a vazão média é uma série de dados estacionários, já que em todos os resultados não se rejeita a hipótese nula de igualdade de médias, conforme mostrado na tabela 8.

Tabela 8 – Estudo de estacionariedade da Vazão média anual ($Q_{\text{méd}}$): subperíodos utilizados, médias μ e níveis de probabilidade (p-valor)

Partição	Sub-período		Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney		
			Médias μ ($m^3 s^{-1}$)		
	Série A	Série B	Série A	Série B	p-valor
1	1977 - 1989	1990 - 2007	3,707 ^a	3,729 ^a	0,499
2	1977 - 1990	1991 - 2007	3,715 ^a	3,724 ^a	0,615
3	1977 - 1991	1992 - 2007	3,727 ^a	3,713 ^a	0,209
4	1977 - 1992	1993 - 2007	3,706 ^a	3,735 ^a	0,266

Obs: Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Wilcoxon-Mann-Whitney a 5%.

CONCLUSÃO

Pelos resultados apresentados dos testes conclui-se que as vazões médias e mínimas anuais são consideradas estacionárias diferentemente das vazões máximas que são não estacionárias. A estacionariedade dos dados do Ribeirão do Feijão mostra que a atividade antrópica e os efeitos das alterações climáticas não estão alterando o regime hidrológico da região. Este estudo ainda mostrou a importância de se aplicar o teste Shapiro-Wilk na verificação da distribuição normal das séries de

vazões, já que as vazões médias para o Ribeirão do Feijão não apresentaram distribuição normal, impossibilitando a aplicação de testes estatísticos paramétricos como o teste F e teste T, esses aplicados para as vazões máximas e mínimas que apresentaram normalidade. No caso das vazões médias que não apresentaram normalidade, utilizando-se o teste não paramétrico Wilcoxon-Mann-Whitney na comparação da igualdade das médias entre dois sub-grupos de vazões, além de ter permitido analisar a estacionariedade, pôde-se mostrar o teste como opção de aplicação em outros estudos. A não estacionariedade das vazões máximas se deve ao fato de serem susceptíveis a fenômenos pontuais dados pelas características das chuvas e umidade inicial no solo. A análise das causas devem apresentar estudos mais complexos, e através da continuidade do monitoramento, novas análises de estacionariedade poderão ser feitas. Este estudo apresenta uma metodologia simples, porém aponta dados importantes de serem analisados, bem como a importância de estudos mais aprofundados relacionados ao tema.

REFERÊNCIAS

- DAMÁZIO, J. M.; COSTA, F. S. C.; MACEIRA, M. E. P. (2011). *Testes estatísticos de estacionariedade no valor esperado para séries temporais com dependência temporal sensíveis a mudanças graduais ou abruptas*. Cadernos de Instituto de Matemática e Estatística – Série estatística, UFRJ, Rio de Janeiro, ISSN: 1413-9022, v.30, p.35-51.
- FILL, H. D. (2011). *Análise da estacionariedade das vazões do Rio Iguaçu em União da Vitória*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, Maceió. Anais... Maceió: ABRH.
- GOUDIE, A. S. (2006). *Global warming and fluvial geomorphology*. Geomorphology 79, 384-394.
- KIM, N. (2011). *The limit distribution of a modified Shapiro-wilk statistic for normality to Type II censored data*. Journal of the Korean Statistical Society, v. 40, p. 257-266.
- MORÁN-TEJEDA, E.; LÓPEZ-MORENO, J. I. (2011). *River regimes and recente hidrological changes in the Duero basin (Spain)*. Journal of Hidrology 404, 241-258.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. (1965). *An analysis of variance test for Normality (Complete Samples)*. Biometrika, v. 52, n. 3/4, p. 591-611.
- SOUSA, H. T. et al. (2009). *SisCAH 1.0: Sistema computacional para análises hidrológicas*. Brasília: Agência Nacional de Águas, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 60p.
- SOUSA, W. S.; SOUSA, F. A. S. (2010). *Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.2, p.173-180.
- SOUZA, F. A. O.; SILVA, C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; OLIVEIRA JUNIOR, M. P. (2012). *Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 1, p. 10-17.
- TUCCI, C. E. M. (2002) *Regionalização de Vazões*. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS, 256 p.