

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

O REGIME DE VAZÕES ANUAIS DOS RIOS INTERMITENTES NA BACIA DO RIO JAGUARIBE: ANÁLISE DA AUTOCORRELAÇÃO DAS VAZÕES ANUAIS

José Nilson B. Campos¹ ; Ticiania Marinho de Carvalho Studart² & David Teixeira Pinheiro³

RESUMO –O método de matriz de transição aplicado em planos e estudos hidrológicos de reservatórios no Estado do Ceará tem como hipótese que as vazões afluentes anuais são serialmente independentes. Para testar essa hipótese foram selecionados 42 reservatórios da bacia do rio Jaguaribe estudados no Plano de Gerenciamento das Águas da bacia do rio Jaguaribe. As séries de vazões temporais foram submetidas a dois testes de hipótese de independência serial: o teste não paramétrico de Wald Wolfowitz e o teste de Anderson, ambos com um nível de confiança de 95%. Dos 42 reservatórios estudados, 41 aceitaram a hipótese de independência dos deflúvios anuais. A rejeição da hipótese de independência de apenas um em 42 reservatórios (2,3%) é perfeitamente aceitável como uma flutuação amostral. Dessa forma a hipótese de independência serial dos deflúvios anuais dos rios intermitentes do Semiárido é comprovada pelas evidências empíricas.

ABSTRACT– The transition matrix model applied in water plans and reservoir hydrological studies in Ceará state has as assumption that river's annual discharges are serially independents. To test this assumption, 42 reservoirs from Ceará state studied in Jaguaribe River Basin Water Plan were selected. Two statistical hypotheses tests were applied to the time series: the non parametric Wald Wolfowitz and the Anderson test, both at 95% confidence level. The Wald Wolfowitz test accepted the hypothesis of no serial correlation on all the 42 reservoirs. For the Anderson test, in 41 the null hypothesis of no serial correlation was accepted. The rejection of just one series, representing 2.3% of the sample, is totally acceptable as sample fluctuation considering the 5% significance level. So, as conclusion the assumption of no serial dependence on annual discharges of Brazilian semiarid intermittent rivers is empirically proved.

Palavras-Chave – Autocorrelação, Rios do Semiárido, correlação serial

INTRODUÇÃO

O conhecimento do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é de fundamental importância para a estimativa das potencialidades e disponibilidades hídricas dessa bacia. Isso é indispensável quando são aplicadas as técnicas hidrologia estocástica e simulação Monte Carlo na avaliação das potencialidades.

Os modelos matemáticos estocásticos têm por objetivo reproduzir ou assemelhar as principais características estatísticas das séries temporais históricas de variáveis hidrológicas. Essa reprodução deve ser vista no sentido estatístico, o que não implica que o modelo reproduza exatamente as mesmas estatísticas da amostra (Salas, et al. 1980, p. 8)

1) Professor na Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. E-mail: Nilson@ufc.br

2) Afiliação: Times New Roman, 8 pt com endereço completo, fone, fax e e-mail

As principais características estatísticas que os modelos buscam reproduzir são média, desvio padrão, assimetria e autocorrelação. Outras características presentes nas séries temporais são: a sazonalidade, as tendências, a intermitência e a periodicidade. O grau de importância dessas características depende, em grande parte da escala temporal adotada no modelo.

Nas séries de vazões mensais as principais características inseridas nos modelos dos rios do semiárido são a forte sazonalidade, a intermitência e a autocorrelação. Ao se adotar a escala de tempo anual retira-se a sazonalidade, permanecendo, porém a intermitência, mesmo que com baixos valores e, em alguns casos, a tendência. A autocorrelação é o objeto desse estudo.

Diversos métodos de dimensionamento de reservatório utilizam a premissa de deflúvios anuais serialmente independentes. Para os rios intermitentes com regimes hidrológicos para o clima do Nordeste foram desenvolvidos: o método da matriz de transição para rios sob intensa evaporação (J. N. Campos 1986); o método do diagrama triangular de regularização (Campos 2005).

Assim, o objetivo principal do artigo é testar empiricamente a hipótese correntemente aplicada em estudos hidrológicos de reservatórios que os rios intermitentes do Semiárido são serialmente independentes, isto é, testar se o coeficiente de autocorrelação dos deflúvios anuais é nulo.

DADOS E METODOLOGIA

Para avaliar o regime de dependência serial dos rios do Estado do Ceará, foram selecionados 42 reservatórios objeto de estudos durante a elaboração do Plano de Gerenciamento das Águas do Rio Jaguaribe (COGERH/ENGESOF 2000). Nessa seção apresenta-se a base conceitual aplicada no estudo com descrição dos testes estatísticos.

Base conceitual para a autocorrelação

Nos primórdios da formulação teórica dos modelos estocásticos autorregressivos, houve debate entre seguidores da modelagem estocástica e seguidores da modelagem clássica

Salas et al. (1980 p. 7) propuseram uma justificativa física para o modelo ARMA aplicada a vazões anuais, como descrito a seguir.

Considere-se uma bacia hidrográfica na qual se busca estudar o comportamento da série de vazões anuais. o deflúvio anual z_t é formado por uma contribuição devida à alimentação por águas subterrâneas igual a cS_{t-1} e pelo deflúvio superficial dx_t . Tem-se

$$z_t = cS_{t-1} + dx_t \quad (1)$$

Aplicando-se a equação da continuidade, obtém-se:

$$S_t = S_{t-1} + dx_t - aS_{t-1} \quad (2)$$

ou ainda

$$S_t = (1 - c)S_{t-1} + ax_t \quad (3)$$

Combinando-se as equações 1 e 3 chega-se a

$$z_t = (1 - c)z_{t-1} + dx_t - [d(1 - c) - ac]x_{t-1} \quad (4)$$

Essa é a formulação geral do modelo ARMA(1,1).

A memória do sistema é decorrente dos termos derivados das reservas em águas subterrâneas e do escoamento de base. Para os rios intermitentes do Semiárido esses termos são nulos em função de uma longa estação seca, cerca de seis meses na qual os rios permanecem totalmente secos.

Definições de correlação serial

A correlação serial, ou autocorrelação, de ordem k de uma série temporal da variável aleatória X_t é definida pelo coeficiente de correlação entre as variáveis X_t e a variável X_{t-k} . Na população de $\{X_t\}$ o coeficiente de autocorrelação de ordem k (ρ_k) é estimado pela Equação 5:

$$\rho_k = \frac{Cov(X_t, X_{t-k})}{var(X)} \quad (5)$$

Na amostra, a autocorrelação de ordem k (r_k) é estimada em uma amostra por meio da Equação (6)

$$r_k = \frac{\sum (X_t - \bar{X})(X_{t-k} - \bar{X})}{\sqrt{\sum (X_t - \bar{X})^2 \sum (X_{t-k} - \bar{X})^2}} \quad (6)$$

onde r_k denota o coeficiente de autocorrelação com tempo de retardo k , $\bar{X}$ representa a média de X_t e as demais variáveis definidas anteriormente.

Os testes estatísticos

Para estimar se a correlação serial presente em uma amostra é significativa aplicam-se os testes de hipótese.

No presente artigo foram aplicados dois testes, a saber: o de Wald e Wolfowitz (1943) e o de Anderson (1941). A seguir descrevem-se esses testes.

O teste de Wald Wolfowitz

-

Trata-se de um teste não paramétrico recomendado pela Organização Meteorológica Mundial -WMO para a avaliação de autocorrelação em séries temporais (Serrano, Mateos and Garcia 1999), (Mitchell, et al. 1966).

O teste é executado da maneira descrita a seguir. Inicialmente obtém-se uma série padronizada da variável aleatória Z pela Equação 7:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \quad (7)$$

onde x_i denota o valor da variável aleatória(vazão) no ano i, $\bar{X}$ é a média da amostra de vazões, S_x é o desvio padrão da série.

A estatística de teste u é estimada pela Equação 8.

$$u = \frac{1 + (n - 1)(\sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+1} / \sum_{i=1}^n x_i^2)}{\sqrt{n - 1}} \quad (8)$$

onde u denota a estatística de teste, n a extensão da série de vazões, x_i e x_{i+1} representam as vazões nos anos i e i+1 respectivamente.

Esse teste estabelece que na hipótese nula de autocorrelação nula ($\rho = 0$) a variável de teste u segue uma distribuição normal padrão com média zero e desvio padrão um. Para um dado nível de confiança α a hipótese nula será rejeitada se $\Pr\{z < u\} > \alpha$.

O teste de Anderson

Esse teste proposto por Anderson (1941) verifica se o valor da autocorrelação de ordem 1 obtido da amostra está contido no intervalo de confiança definido pelas equação 9.

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1,96 \sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad (9)$$

onde r_k denota o coeficiente de autocorrelação estimado na amostra pela Equação 6, n é o tamanho da amostra e k representa o tempo de retardo, igual a 1 no presente caso.

RESULTADOS

Nessa seção apresentam-se os resultados da aplicação de dois testes de hipóteses aplicados: o teste não paramétrico de Wald Wolfowitz e o teste de Anderson.

Resultados com o teste de Wald Wolfowitz

O teste de Wald Wolfowitz tem a seguinte formulação:

Variável de teste = u

Hipótese nula H_0 = as vazões anuais são serialmente independentes

Hipótese alternativa H_1 : as vazões anuais

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Intervalo de aceitação de hipótese nula: $-2,8279 < u < 2,8279$

Os valores obtidos para a variável de teste u estão apresentados na Tabela 01. O maior valor encontrado para u foi de 2,12996 para o reservatório São José., o qual se encontra na zona de aceitação da hipótese nula. Em conclusão, pelo teste de hipótese de Wald Wolfowitz, para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe a hipótese de correlação serial dos deflúvios anuais

Dessa forma conclui-se que a um nível de confiança $(1-\alpha)$ de 95%, a hipótese de independência serial de dos deflúvios anuais é estatisticamente aceita. Assim, fica comprovada a hipótese utilizada na formulação dos modelos de matriz de transição para rios intermitentes (J. N. Campos 1986)

Tabela 1 - Resultados da estatística u de 42 reservatórios na bacia do rio Jaguaribe.

	Reservatório	Série	U	Resultado do teste
1	Arneiroz	86	0.27078	Aceita H_0
2	Atalho	86	0.16076	Aceita H_0
3	Brotas	84	-1.28486	Aceita H_0
4	Boa Viagem	81	1.11621	Aceita H_0
5	Canoas	85	0.46169	Aceita H_0
6	Castanhao	37	0.52421	Aceita H_0
7	Ceará Mirim	54	1.51840	Aceita H_0
8	Canafístula	85	0.59837	Aceita H_0
9	Cipoada	86	1.93420	Aceita H_0
10	Ema	85	1.60078	Aceita H_0
11	Fogareiro	78	0.78232	Aceita H_0
12	Favelas	85	0.39761	Aceita H_0
13	Ingazeiro	85	1.40506	Aceita H_0
14	Joaquim Távora	85	0.59982	Aceita H_0
15	Juca	85	0.33764	Aceita H_0
16	Lima Campos	85	1.28370	Aceita H_0
17	Manoel Balbino	84	0.90228	Aceita H_0
18	Monsenhor Tabosa	86	0.89074	Aceita H_0
19	Muquem	85	0.45030	Aceita H_0
20	Nobre	85	0.21401	Aceita H_0
21	Olho d'Água	86	0.46657	Aceita H_0

22	Oros	83	0.63549	Aceita H_0
23	Poço de Barro	86	1.60611	Aceita H_0
24	Pedras Brancas	86	1.61140	Aceita H_0
25	Pombas	86	0.46460	Aceita H_0
26	Poço da Pedra	84	0.22060	Aceita H_0
27	Prazeres	84	0.90228	Aceita H_0
28	Puiu	86	0.41773	Aceita H_0
29	Quixeramobim	85	-0.20787	Aceita H_0
30	Riacho dos Carneiros	84	0.90263	Aceita H_0
31	Rivaldo de Carvalho	85	0.55737	Aceita H_0
32	Rosario	86	1.48134	Aceita H_0
33	Riacho dos Tanques	85	0.03820	Aceita H_0
34	Riacho Verde	85	-0.01869	Aceita H_0
35	São José	86	2.12996	Aceita H_0
36	Santo Antônio de Russas	81	1.39206	Aceita H_0
37	Thomas Osterne	86	1.86217	Aceita H_0
38	Trapia	86	0.46632	Aceita H_0
39	Trici	86	0.66485	Aceita H_0
40	Trussu	86	0.76013	Aceita H_0
41	Umari	81	-0.32029	Aceita H_0
42	Várzea do Boi	86	0.40993	Aceita H_0

Teste de Anderson

O teste de Anderson tem a seguinte formulação:

Variável de teste = r_1 (coeficiente de correlação serial com tempo de retardo 1)

Hipótese nula H_0 = as vazões anuais são serialmente independentes

Hipótese alternativa H_1 : as vazões anuais são serialmente correlacionadas

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Intervalo de aceitação de hipótese nula: (Tabela 2)

Os valores obtidos para a variável de teste r_1 estão apresentados na Tabela 02. O maior valor encontrado para r_1 foi de 0,2265 para o reservatório São José., o qual é o único que se encontra na zona de rejeição da hipótese nula. Considerando-se que o nível de significância do teste é de 5% e que somente um reservatório (representa 2,4% da amostra) é perfeitamente admissível que esse valor represente uma flutuação amostral. Em conclusão, pelo teste de hipótese de Anderson para a bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, a hipótese de independência serial dos deflúvios anuais é uma hipótese comprovada pelos dados empíricos.

Tabela 2 - Resultados do teste de Anderson para 42 reservatórios da bacia do rio Jaguaribe.

	Reservatório	Extensão da série(anos)	r_1	Limite inferior r_{1l}	Limite superior r_{1s}	Resultado
1	Arneiroz	86	0.0177	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
2	Atalho	86	0.0067	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
3	Brotas	84	-0.1560	-0.2258862	0.2017898	Aceita H_0
4	Boa Viagem	81	0.1144	-0.2302608	0.2052608	Aceita H_0
5	Canoas	85	0.0398	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
6	Castanhao	37	0.0611	-0.3498755	0.2943199	Aceita H_0
7	Ceará Mirim	54	0.2039	-0.2855427	0.2478068	Aceita H_0
8	Canafístula	85	0.0531	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
9	Cipoadá	86	0.1963	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
10	Ema	85	0.1628	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
11	Fogareiro	78	0.0796	-0.2348946	0.2089206	Aceita H_0
12	Favelas	85	0.0329	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
13	Ingazeiro	85	0.1389	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
14	Joaquim Távora	85	0.0533	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
15	Juca	85	0.0262	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
16	Lima Campos	85	0.1279	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
17	Manoel Balbino	84	0.0864	-0.2258862	0.2017898	Aceita H_0
18	Monsenhor Tabosa	86	0.0865	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
19	Muquem	85	0.0390	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
20	Nobre	85	0.0031	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
21	Olho d'Água	86	0.0388	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
22	Oros	83	0.0576	-0.2273171	0.2029268	Aceita H_0
23	Poço de Barro	86	0.1607	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
24	Pedras Brancas	86	0.1613	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
25	Pombas	86	0.0385	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
26	Poço da Pedra	84	0.0094	-0.2258862	0.2017898	Aceita H_0
27	Prazeres	84	0.0864	-0.2258862	0.2017898	Aceita H_0
28	Puiu	86	0.0363	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
29	Quixeramobim	85	-0.0296	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
30	Riacho dos Carneiros	84	0.0863	-0.2258862	0.2017898	Aceita H_0
31	Rivaldo de Carvalho	85	0.0476	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
32	Rosario	86	0.1463	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
33	Riacho dos Tanques	85	0.0000	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
34	Riacho Verde	85	-0.0292	-0.2244815	0.2006720	Aceita H_0
35	São José	86	0.2265	-0.2231023	0.1995729	Rejeita H_0
36	Sto Antônio de Russas	81	0.1399	-0.2302608	0.2052608	Aceita H_0
37	Thomas Osterne	86	0.1849	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
38	Trapia	86	0.0518	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
39	Trici	86	0.0557	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
40	Trussu	86	0.0708	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0
41	Umari	81	-0.0343	-0.2302608	0.2052608	Aceita H_0
42	Várzea do Boi	86	0.0321	-0.2231023	0.1995729	Aceita H_0

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a hipótese de independência serial das séries de vazões anuais dos rios intermitentes do semiárido, explicadas pela associação do tipo de solo (substrato cristalino) e o regime de chuvas concentrado em cerca de quatro meses, é suportada pelas evidências empíricas de 42 séries temporais de vazões afluentes anuais em reservatórios da bacia do rio Jaguaribe no Estado do Ceará. A hipótese foi comprovada por dois testes estatísticos clássicos: O teste não paramétrico de Wald Wolfowitz, recomendado pela WMO e o teste paramétrico de Anderson. Dessa forma, a aplicação de metodologias que adotam a independência serial dos deflúvios anuais como os métodos que usam matriz de transição e o método do diagrama triangular de regularização têm validação empírica com os dados da região.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, R.L. (1941) Distribution of the serial correlation coefficients. *Annals of Math. Statitics* .
- CAMPOS, J. N. B..(1986) *A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate*. PhD thesisFort Collins, CO.
- CAMPOS, J. N. B.. (2005) Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização ASTEF, Fortaleza, Ce.
- COGERH/ENGESOFT.(2000) "Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do rio Jaguaribe." Fortaleza, Ce.
- MITCHELL, J.M., DZERDZEEVSKII, B.; FLOTHN, H.; HOFMEYR, W.L.; LAMB, H.; RAO, K.N.; WALLÉN, C.C. (1966) "Climate Change." *W.M.O. Technical Note 79*.
- SALAS, J.D., J.W. DELLEUR, V. YEVJEVICH, AND W.L. LANE.(1980) *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Fort Collins, CO: Water Resources Publications.
- SERRANO, A., V.L. MATEOS, AND J.A. GARCIA. (1999)"Trend Analysis of monththly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995." *Phys. Chem. Earth (8)*.