

ANÁLISE DA NÃO ESTACIONARIEDADE DA PRECIPITAÇÃO NA CIDADE DE SÃO PAULO, SP.

Gustavo de Almeida Coelho^{1*} & *Arisvaldo Vieira Mello Junior*²

Resumo – Neste trabalho foi realizada a análise de tendência da precipitação em São Paulo por meio dos testes não paramétricos de *Mann-Kendall* e de correlação de *Spearman*. O estudo foi realizado para as séries históricas de precipitação total anual e máxima diária anual, medidas em seis postos pluviométricos com duração entre 56 e 111 anos. Os resultados obtidos mostraram um comportamento não estacionário da precipitação total anual em parte da região estudada. A precipitação máxima diária anual apresentou comportamento estacionário ao longo do período analisado em todos os postos estudados.

Palavras-Chave – precipitação, não estacionariedade, teste não paramétrico.

RAINFALL NON-STATIONARITY ANALYSIS IN SÃO PAULO CITY, SP.

Abstract – In this work, a rainfall trend analysis over São Paulo city is presented using two nonparametric tests for trend: *Mann-Kendall* and *Spearman correlation*. Annual rainfall amount and annual maximum daily rainfall series over six rain gauges from 56 to 111 years long were analyzed. Analyses indicate a non-stationary behavior for annual rainfall amount in some part of studied region. Results for annual maximum daily rainfall indicate a stationary behavior for all six studied rain gauges.

Keywords – rainfall, non-stationarity, nonparametric test.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem são projetados e operados em todo o mundo considerando a hipótese da estacionariedade das séries de precipitação (Milly *et al.*, 2008). A alteração do padrão de chuvas ao longo do tempo ou adoção de parâmetros de projeto equivocados pode afetar significativamente a concepção e funcionamento destes sistemas. A análise da estacionariedade da precipitação tem sido realizada em diferentes regiões (Angel e Huff, 1997; Aguilar *et al.*, 2005; Alexander *et al.*, 2006; Seneviratne *et al.*, 2012) e os resultados podem ser utilizados para o aperfeiçoamento das metodologias de cálculo de sistemas de drenagem, uma vez que a ocorrência de inundações em áreas urbanas acarreta diversos transtornos e riscos para a população.

Em geral, é grande a dificuldade de encontrar dados de precipitação com séries temporais longas e com boa distribuição espacial que possibilitem inferir resultados confiáveis para uma determinada bacia ou localidade. Estudos dessa natureza têm a finalidade de apresentar resultados representativos para a tomada de decisão em relação às medidas de controle das inundações.

As pesquisas que vem sendo realizadas sobre a análise de tendências e/ou alterações no comportamento da precipitação a médio e longo prazo normalmente atribuem ou indicam que tais alterações podem estar relacionadas a duas causas principais: urbanização (Kalnay e Cai, 2003; He

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, coelho_gustavo@yahoo.com.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, arimellojr@gmail.com.

* Autor Correspondente.

et al., 2007) e mudanças climáticas (IPCC, 2007). Ambos os fatores podem vir a influenciar o balanço energético, e conseqüentemente, o ciclo hidrológico mesmo que em escalas diferentes.

A urbanização é responsável por significativas modificações no tipo de uso e ocupação do solo que afetam o balanço energético superficial, o escoamento superficial, a disponibilidade de umidade no ar e a ocorrência de precipitações (Dufek e Ambrizzi, 2007; IPCC, 2007). O microclima das cidades se caracteriza pela ocorrência do efeito da Ilha de Calor Urbana (ICU), que é o fenômeno em que a sua temperatura é mais elevada do que nas áreas rurais vizinhas (Oke, 1982). O efeito ICU frequentemente ocorre de forma localizada e depende de fatores locais como correntes de ar, nebulosidade, poluição e aerossóis. O quarto relatório do IPCC (2007) sugere quatro mecanismos que induzem a ocorrência de precipitações em áreas urbanas: (1) aumento da convergência devido ao aumento da rugosidade da superfície no ambiente urbano; (2) desestabilização da camada limite da atmosfera devido a perturbações térmicas geradas pelas ICU e que resultam em movimentos descendentes na circulação das ICU ou gerando nuvens convectivas; (3) aumento dos aerossóis e, conseqüentemente, da disponibilidade de fontes de núcleos de condensação e (4) divisão ou desvio de sistemas de precipitação pela cobertura urbana ou processos similares.

Em relação às mudanças climáticas, os principais estudos sobre este assunto, reunidos no relatório do IPCC (2007), apontam para a existência de mudanças no fluxo radiativo na superfície terrestre afetando a evaporação e a transferência de calor sensivelmente. Em particular, mudanças nos aerossóis podem ter afetado a precipitação e outros aspectos do ciclo hidrológico de maneira mais forte do que outros agentes antropogênicos. Entretanto, ao contrário das forças radiativas, isto não pode ser usado para comparar os efeitos de diferentes agentes no equilíbrio médio da temperatura global quantitativamente. Em resumo, de acordo com o 3º Relatório de Avaliação do IPCC (2001), dentre os vários fatores que influenciam o clima, grande parte dos cientistas afirmam que as atividades humanas, como a mudança das quantidades dos gases efeito estufa e dos aerossóis, assim como mudanças no uso do solo, se tornaram a força dominante e responsável pela maior parte do aquecimento observado ao longo dos últimos 50 anos.

No Estado de São Paulo, Dufek e Ambrizzi (2008) analisaram os dados de 59 postos pluviométricos com o intuito de verificar mudanças nas séries de precipitação total e extrema. No período de 1950 a 1999 observou-se a existência de tendência positiva, indicando o aumento da precipitação total anual em 59 % dos postos, enquanto que para o período entre 1990 e 1999, o valor foi reduzido para 8,5 %. No município de São Paulo, Sugahara et al. (2009) constataram o aumento da quantidade de chuva diária em cerca de 40 mm ao analisar a frequência dos valores extremos de precipitação do posto do Instituto de Astronomia, Geociências e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo no período de 1933 a 2005.

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise estatística das séries históricas de precipitação na cidade de São Paulo para verificação da sua estacionariedade. O interesse do estudo foi buscar a existência de tendências nos volumes totais anuais precipitados e nas precipitações máximas diárias anuais obtidas em seis postos pluviométricos localizados no município de São Paulo, num raio de 9 km. Espera-se obter resultados práticos para fins de recomendações sobre a precipitação de projeto para obras de engenharia e para medidas não estruturais bem como suas implicações sobre os custos das obras de drenagem e das medidas de controle.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e dados de precipitação

Os dados de precipitação utilizados neste trabalho foram obtidos por meio do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA), do Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SigRH) e da Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. (EMAЕ). Após uma análise preliminar dos dados disponíveis, foram selecionados seis postos pluviométricos localizados no município de São Paulo apresentando séries de precipitação com poucas ou nenhuma falha e duração próxima de 60 anos ou mais, conforme mostrado na Tabela 1. Neste trabalho buscou-se analisar dados de precipitação de diversos postos situados numa mesma região no intuito de identificar um comportamento homogêneo local. A Figura 1 mostra a localização dos postos pluviométricos estudados.

Tabela 1 – Características dos postos pluviométricos selecionados.

	Nome	Responsável /Operadora	Prefixo	Latitude	Longitude	Altitude	Período de Observação
A	Observatório IAG	FCTH/DAEE-SP	E3-035	-23,65	-46,63	780	1933 - 2009
B	Luz (Estação)	FCTH/DAEE-SP	E3-036	-23,53	-46,63	730	1888 - 2003
C	Congonhas (Aeroporto)	FCTH/DAEE-SP	E3-052	-23,63	-46,65	800	1946 - 2003
D	Instituto Biológico	FCTH/DAEE-SP	E3-090	-23,58	-46,65	760	1943 - 2003
E	Pedreira	EMAЕ	P12-042	-23,70	-46,67	752	1927 - 2011
F	Represa Guarapiranga	EMAЕ	P12-059	-23,67	-46,72	739	1922 - 2011

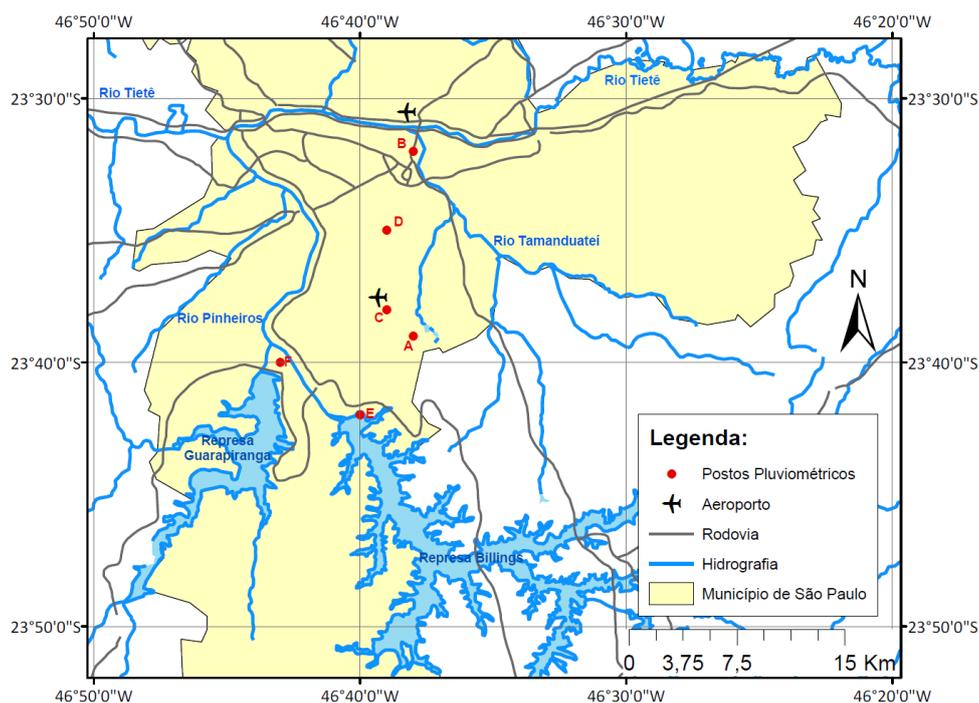


Figura 1 - Localização dos postos pluviométricos estudados.

O município de São Paulo possui uma área de 1.051 km² e mais de 11 milhões de habitantes (Censo IBGE, 2010). A sua área está inserida no Planalto Atlântico da região Sudeste do Brasil, em uma região de transição climática entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude, com período seco definido, e os Subtropicais, permanentemente úmidos do Brasil meridional (Tarifa e Armani, 2000).

2.2. Teste não paramétrico para verificação de tendência – Mann-Kendall

A verificação de tendências nas séries de precipitação estudadas foi realizada por meio do teste não paramétrico de *Mann-Kendall* que constitui uma aplicação particular do teste de correlação de Kendall (1945). Considerando x_1, x_2, \dots, x_n , como uma sequência de valores observados ao longo do tempo, Mann (1945) propôs testar as hipóteses:

- **H_0 (Hipótese nula):** Aceita que as precipitações totais anuais ou máximas diárias anuais (x_i) são uma amostra de n variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.
- **H_1 :** Aceita que as distribuições de x_j e x_k não são idênticas para todo k , ou seja, que existe uma tendência crescente (positiva) ou decrescente (negativa) na distribuição de x_j e x_k .

O teorema do teste de *Mann-Kendall* é definido pela estatística S (equação 1) que representa a contagem do número de vezes em que x_j excede o seu valor subsequente x_k , para $j > k$, mais vezes do que x_k excede x_j (Hipel e McLeod, 2005).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

onde

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

O máximo valor possível para S , é chamado de D (equação 2), e ocorre quando $x_1 < x_2 < \dots < x_n$.

$$D = \left[\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{0,5} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{0,5} \quad (2)$$

Então, a verificação do teste de *Mann-Kendall* é realizada pela estatística do *tau de Kendall*, definida pela equação 3.

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (3)$$

Assim, após a obtenção do valor de τ e do *valor-p* bicaudal, número que representa a probabilidade estimada de rejeição de H_0 , rejeita-se H_0 quando τ é diferente de zero considerando um nível de significância de pelo menos 0,05, ou seja, quando o *valor-p* é menor do que 0,05.

2.3. Teste não paramétrico para verificação de tendência – Correlação de Spearman

O teste não paramétrico de correlação de *Spearman* é mais apropriado para a detecção de tendências em séries que possuam variações graduais (sistemáticas e aleatórias), ao invés de variações abruptas (apenas aleatórias), porque elas estão presentes ao longo das séries e resultam em diferenças maiores (d_i). Em variações abruptas, as mudanças ocorrem ao longo de pequenos períodos das séries e resultam em diferenças menores (d_i) (McCuen, 2003).

O teste utiliza duas ordens sendo uma para a variável de critério e outra para uma variável independente, que neste trabalho correspondem à precipitação e ao intervalo de tempo i respectivamente.

As hipóteses do teste de correlação de *Spearman* são:

- **H_0 :** Aceita que os valores das séries representam uma sequência n de eventos independentes, ou seja, admite-se que não há correlação entre r_{xi} e r_{yi} onde a amostra não apresenta tendência temporal.
- **H_1 :** Aceita que os valores apresentam uma correlação, podendo indicar uma tendência crescente ou decrescente.

A estatística do teste de *Spearman* tem como base o coeficiente R_s cujo o cálculo é realizado pela equação 4.

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (r_{Pi} - i)^2}{n^3 - n} \quad (4)$$

onde r_{Pi} é o ranking da precipitação medida no intervalo i e n é o tamanho da amostra.

Para séries com n maior do que dez, a estatística do teste é dada pela equação 5.

$$t = \frac{R_s}{\sqrt{(1 - R_s^2)/(n - 2)}} \quad (5)$$

onde t segue uma distribuição de t de Student com $n - 2$ graus de liberdade.

Por se tratar de um teste bilateral, a um nível de significância, a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se o módulo do valor de t calculado for maior do que o $t_{\alpha/2}$ crítico para $n - 2$ graus de liberdade. Neste trabalho foi considerado o nível de significância α de 0,05.

2.4. Aplicação dos testes

Tendo em vista que este estudo teve o intuito de investigar a existência de um comportamento homogêneo da precipitação na região estudada, apenas a análise do período de dados existentes em comum aos seis postos, entre 1946 e 1998, totalizando 53 anos, é apresentada neste artigo. Deve-se salientar que a presente pesquisa está sendo desenvolvida ao longo do mestrado do primeiro autor e os resultados finais serão apresentados assim que finalizados em outra oportunidade.

2.5. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R (R Development Core Team, 2009) utilizando diferentes extensões onde destaca-se o pacote “*Kendall*” para a aplicação do teste de *Mann-Kendall* (McLeod, 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise da Precipitação Total Anual

A aplicação do teste de *Mann-Kendall* para a verificação de tendências nas séries de precipitação total anual rejeitou H_0 para os três postos (A, C e D), situados em áreas mais urbanizadas da cidade, indicando tendência positiva com nível de significância menor que 5%. O teste confirmou H_0 para os outros três postos (B, E e F), indicando a inexistência de tendências. Os resultados do teste *Mann-Kendall* para todos os postos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para a Precipitação Total Anual.

	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Estat. de Kendall (τ)	0,228	0,119	0,186	0,331	0,112	0,111
valor-p	0,0164	0,2112	0,0505	0,0005	0,2406	0,2436
Hipótese (tendência)	1 (+)	0 (+)	1 (+)	1 (+)	0 (+)	0 (+)

O teste de correlação de *Spearman* confirmou os resultados obtidos pelo teste de *Mann-Kendall* onde para os postos A, C e D rejeitou-se a hipótese nula e constatou-se a existência de tendência positiva com níveis de significância abaixo de 5 %. Para os postos B, E e F também foi aceita a hipótese nula indicando a inexistência de tendências, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do teste de correlação de *Spearman* para a Precipitação Total Anual.

	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Estat. de Spearman (R_s)	0,355	0,179	0,270	0,492	0,181	0,173
valor-p	0,0095	0,1997	0,0510	0,0002	0,1930	0,2148
Hipótese (tendência)	1 (+)	0 (+)	1 (+)	1 (+)	0 (+)	0 (+)

O estudo de Dufek e Ambrizzi (2007) constatou a existência de uma tendência positiva ao analisar os dados de precipitação total anual do Posto A para o período de 1950 a 1999 e tendência nula ao analisar um período menor entre 1990 e 1999. Como o estudo foi realizado em todo o estado de São Paulo, os resultados são muito robustos para identificar um comportamento estacionário ou não da precipitação na região estudada no município de São Paulo com clareza.

Os resultados obtidos mostram que os dois testes não paramétricos utilizados mostraram comportamentos similares para os mesmos dados observados nos diferentes postos. Os postos A, C e D estão situados no centro da região estudada e abrangem uma área com raio de 3,75 km², onde é possível afirmar que a precipitação total anual apresentam um comportamento não estacionário. Entretanto, ao aumentarmos este raio de abrangência, os resultados dos outros três postos (B, E e F) mostraram que este comportamento não se estende por toda a região estudada.

3.2. Análise da Precipitação Máxima Diária Anual

A aplicação do teste *Mann-Kendall* para esta variável confirmou H_0 para todos indicando a inexistência de mudança de tendência, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do teste de *Mann-Kendall* para a Precipitação Total Anual.

	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Estat. de Kendall (τ)	- 0,001	- 0,129	0,052	0,100	- 0,031	0,042
valor-p	1,0000	0,1770	0,5913	0,3173	0,7531	0,6619
Hipótese (tendência)	0	0 (-)	0 (+)	0 (+)	0 (-)	0 (+)

O teste de correlação de *Spearman* também mostrou a inexistência de tendência em todos os postos, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do teste de correlação de *Spearman* para a Precipitação Total Anual.

	Posto A	Posto B	Posto C	Posto D	Posto E	Posto F
Estat. de Spearman (R_s)	- 0,012	- 0,219	0,073	0,133	- 0,042	0,068
valor-p	0,9310	0,1152	0,6011	0,3633	0,7634	0,6282
Hipótese (tendência)	0 (-)	0 (-)	0 (+)	0 (+)	0 (-)	0 (+)

A análise parcial (1946-1998) dos dados disponíveis para o Posto A obteve resultados diferentes da análise realizada por Sugahara *et al.* (2009), que utilizou os dados do mesmo posto. Ao aplicar o teste de *Mann-Kendall* para o período entre 1933 e 2005, Sugahara *et al.* (2009) constatou a existência de uma tendência crescente e significativa ($\tau > 0$; valor- $p < 10^{-4}$). Entretanto, como esta análise foi realizada pontualmente, não é possível afirmar que a precipitação sobre outras áreas próximas se comportarão de maneira semelhante.

Os resultados desse estudo indicam que a precipitação máxima diária anual apresentou um comportamento estacionário durante o período entre 1946 e 1999 em toda a região estudada. A análise das séries completas poderá apontar um comportamento diferente, porém, devido à existência de algumas falhas e ausência de dados, a compreensão desse comportamento poderá ser prejudicada em algumas partes dessa região.

3.3. Comparação dos testes não paramétricos de *Mann-Kendall* e *Spearman* para a verificação de tendência

A aplicação dos dois testes não paramétricos escolhidos para a verificação de tendências resultou em valores similares, apresentando pequenas diferenças não só entre as suas respectivas estatísticas, mas também entre o valor- p dos mesmos. Outros estudos (Yue et al, 2002; Shadmani et al., 2011) onde estes testes foram aplicados em séries hidrológicas também mostraram performances similares para a análise de tendências.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os testes não paramétricos aplicados apresentaram resultados diferentes na região estudada onde confirmou-se a estacionariedade das séries de precipitação total anual nos postos B, E e F, e a não estacionariedade nos postos A, C e D. Para a precipitação máxima diária anual, os testes confirmaram a estacionariedade das séries em todos os postos. Os dados analisados não permitem identificar um padrão homogêneo do comportamento do volume anual de precipitação na região estudada. Recomenda-se que sejam aprofundados os estudos de correlação entre os postos e analisadas séries maiores, uma vez que há dados disponíveis, para que se possa complementar e confirmar ou não os resultados obtidos até o presente momento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe da Empresa Metropolitana de Água e Energia S.A. (EMAE) por fornecerem parte dos dados utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, E. *et al.* (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961 – 2003. *Journal of Geophysical Research* 110, D23107.
- ALEXANDER, L.V. *et al.* (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 111, D05109.
- ANGEL, J.R. e HUFF, F.A. (1997). Changes in Heavy Rainfall in Midwestern United States. *Journal of Water Resources Planning and Management* 123, 4, pp. 246 – 249.
- DUFEK, A.S. e AMBRIZZI, T. (2008). Precipitation variability in Sao Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(3-4), pp. 167-178.
- HE, J.F.; LIY, J.Y. ZHUANG, D.F. e LIU, M.L. (2007) Assessing the effect of land use/land cover on the change of urban heat island intensity. *Theoretical and Applied Climatology*. 90, pp. 217 – 226.
- HIPEL, K.W. e MCLEOD, A.I. (2005). *Times series modeling of water resources and environmental systems*. Disponível em: <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Org. por Houghton, J.T. *et al.* Cambridge University Press, Cambridge e New York – NY, 881 p.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Org. por Solomon, D. *et al.* Cambridge University Press, Cambridge e New York – NY, 996 p.
- KALNAY, E. e CAI, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*. 423, pp. 528 – 531.
- OKE, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108, pp. 1-24.
- MCCUEN, R.H. (2003). *Modeling Hydrologic Change: Statistical Methods*. Taylor & Francis, 433 p.
- MCLEOD, A.I. (2012). *R-package “kendall”: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test (version 2.2)*. <http://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/index.html> (14-02-12).
- MILLY, P.C.D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R.M., KUNDZEWICZ, Z.W., LETTENMAIER, D.P.; STOUFFER, R.J. (2008). Stationary Is Dead: Whither Water Management? *Science*. 319 (5863), pp. 573 – 574.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. (2009). *R. A Language for Statistical Computing*. Disponível em: <http://www.R-project.org>.
- SENEVIRATNE, S. I. *et al.* (2012). Changes in Climate Extremes and Their Impacts on the Natural Physical Environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Org. por Field, C.B. *et al.*, IPCC, ed. Cambridge University Press, Cambridge e New York – NY, pp. 109 – 230.
- SHADMANI, M., MAROFI, S. e ROKNIAN, M. (2011) Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman’s Rho Tests in Arid Regions of Iran. *Water Resour. Management*. 26, pp. 211 – 224.
- SUGAHARA, S., ROCHA, R. P. e SILVEIRA, (2009). R. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. *Int. J. Climatol*. 29, pp. 1339-1349.
- YUE, S., PILON, P. e CAVADIAS, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol*. 259, pp. 254 – 271.