

## ANÁLISE DA ESTACIONARIEDADE DA PRECIPITAÇÃO NA CIDADE DE MACEIÓ SEGUNDO MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS

*João H. P. de B. Salgueiro<sup>1\*</sup>; Eber José de Andrade Pinto<sup>2</sup>; Suzana Maria Gico Lima Montenegro<sup>3</sup>; Bernardo Barbosa da Silva<sup>4</sup> & Leidjane Maria Maciel de Oliveira<sup>5</sup>*

**RESUMO** – Devido às alterações nos regimes pluviométricos e o aumento nas ocorrências de desastres naturais, pesquisas sobre precipitações extremas utilizando séries pluviométricas de longos períodos estão sendo muito exploradas. Este trabalho analisou a estacionariedade das séries de precipitação total anual - PTA e do trimestre mais chuvoso - TMU, medidas na cidade de Maceió-AL (Brasil), através da verificação da existência de tendências. A metodologia incluiu os testes estatísticos de Mann-Kendall e Spearman's Rho, associados à técnica Bootstrapping de Reamostragem. Os resultados indicaram com significância estatística, fortes evidências de tendência crescente em ambas as variáveis.

**Palavras-Chave** – Alteração pluviométrica, Testes estatísticos, Reamostragem *Bootstrapping*

## ANALYSIS OF THE PRECIPITATION STATIONARY IN THE CITY OF MACEIÓ THROUGH STATISTICAL METHODS FOR VERIFICATION OF TRENDS

**ABSTRACT** – Due to changes in rainfall regimes and the increase in occurrences of natural disasters, research on extreme rainfall using long-term rainfall series is being explored. This work analyzed the stationarity of the total annual rainfall series - PTA and of the three more rainy months - TMU, measured in the city of Maceió-AL (Brazil), by verifying the existence of trends. The methodology included the statistical tests of Mann-Kendall and Spearman's Rho, associated with the Bootstrapping Resampling technique. The results indicated, with statistical significance, strong evidences of increasing tendency in both variables.

**Keywords** – Rainfall change, Statistical tests, Bootstrapping resampling

<sup>1\*</sup> Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil-CPRM. E-mail: joao.salgueiro@cprm.gov.br;

<sup>2</sup> Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil-CPRM e Professor da UFMG, E-mail: eber.andrade@cprm.gov.br;

<sup>3</sup> Professora do Departamento de Engenharia Civil da UFPE. Email: suzanam@ufpe.br;

<sup>4</sup> Professor do Departamento de Meteorologia da UFCG. Email: bbdasilva.ufpe@gmail.com;

<sup>5</sup> Professora do Departamento de Engenharia Civil da UFPE. Email: leidjaneoliveira@hotmail.com.

## INTRODUÇÃO

Pesquisas específicas sobre as precipitações extremas utilizando séries pluviométricas de longos períodos estão sendo muito exploradas em diversas partes do mundo, principalmente pela intensificação da magnitude e frequência dos desastres naturais observados. Salgueiro *et al.* (2014) destacam que atualmente, estudos importantes sobre alterações nos regimes de chuvas vêm sendo desenvolvidos em todos os continentes, motivados pelas ocorrências extremas constatadas nas últimas décadas, e suas relações com as modificações dos climas, cujos prejuízos decorrentes são evidentes. Farias e Nóbrega (2010) afirmaram que eventos extremos, como secas severas ou grandes enchentes, podem causar grandes transtornos à população, seja com inundações nos grandes centros urbanos, como também com estiagens prolongadas na zona rural. O aquecimento global e suas diversas consequências, entre elas as mudanças na precipitação, têm atraído atenção dos pesquisadores em diferentes regiões do mundo (Silva *et al.*, 2015).

Segundo Santos *et al.* (2014), o aumento da temperatura observado ao longo dos últimos anos está associado às mudanças dos componentes do ciclo hidrológico e do sistema hidrológico, tais como os padrões de precipitação. O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças climáticas (IPCC, 2013), observou para o Nordeste Brasileiro - NEB a intensificação dos contrastes climáticos, sobretudo o aumento de chuvas intensas e secas severas. Os desastres naturais decorrentes desses episódios representam a componente mais preocupante dos estudos, por essa resultar em determinadas vezes, em situações de risco, permitindo a destruição dos patrimônios públicos e privados, e ocorrência de óbitos, agravando cada vez mais os problemas socioeconômicos e ambientais (Salgueiro *et al.*, 2014).

Souza e Azevedo (2012) afirmaram que muitos estudos de variabilidade e mudanças do clima consideram as variações de precipitação pluvial como sendo um índice importante para detecção de mudanças climáticas. Segundo Obregón e Marengo (2007), as séries temporais longas, contínuas e homogêneas proporcionam grandes vantagens, em razão de fornecerem estatísticas representativas que caracterizam o fenômeno climático.

Haylock *et al.* (2006) realizaram um estudo da precipitação sobre a América do Sul e observaram tendência de aumento do total anual sobre o NEB. Em Pernambuco, Farias e Nóbrega (2010) apontaram tendência de aumento da precipitação em quase todo o Estado. Entretanto, Santos *et al.* (2014) identificaram redução da precipitação na bacia do Una em Pernambuco. A mesma redução foi observada também nas bacias dos rios Brígida e Pajeú, localizadas no Sertão, e na bacia do rio Capibaribe, no Agreste, segundo Assis *et al.* (2012) e Assis e Sobral (2012), respectivamente. Em Recife, Souza e Azevedo (2012) detectaram aumento das chuvas intensas.

Este trabalho analisou a estacionariedade da precipitação na cidade de Maceió, investigando a existência de tendência em séries pluviométricas de longo período medidas no local. Para tanto, utilizou metodologia de precisão comprovada, segundo aplicações em outras áreas de estudo. Espera-se que os resultados contribuam para a intensificação da pesquisa científica nessa cidade, além de colaborar com os planejamentos urbanos multidisciplinares, principalmente no tocante aos recursos hídricos, como o armazenamento do excesso para suprir as estiagens, como também a mitigação dos seus impactos sociais, econômicos e ambientais.

## MATERIAL E MÉTODOS

A cidade de Maceió fica localizada no estado de Alagoas, onde assume a condição de capital do Estado nordestino. Segundo o SEMARH-AL (2010), fica localizado no espaço geoeconômico do leste alagoano e ao mesmo tempo na região ambiental do Litoral. Tais referências lhes proporcionam o privilégio de ter sua costa banhada pelo oceano Atlântico. Entre os municípios

limítrofes mais importantes, podem-se destacar: São Luis do Quitunde, Paripueira, Satuba, Rio Largo e Marechal Deodoro. Conforme IBGE (2016), a população de Maceió foi estimada para o ano de 2015 em 1.013.773 hab., sobre uma área de 509.909 km<sup>2</sup>, proporcionando uma densidade demográfica de 1.854,10 hab./km<sup>2</sup>. O Índice de Desenvolvimento Humano Médio – IDHM publicado para o ano de 2010 foi de 0,721. A Figura 1 detalha a localização da cidade de Maceió, em relação ao estado de Alagoas e parte da região Nordeste.

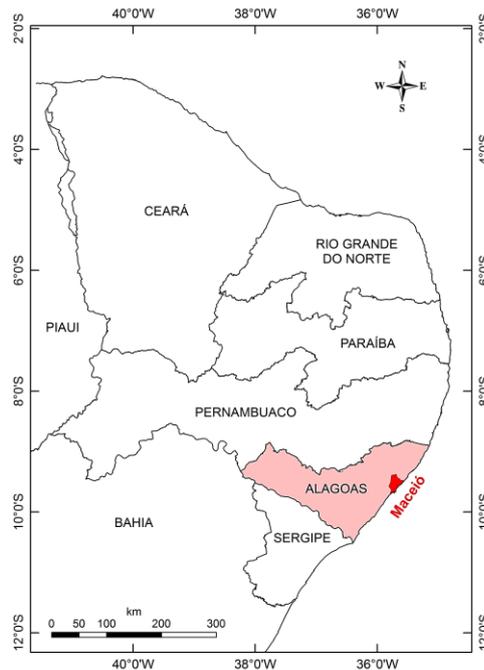


Figura 1 - Localização da cidade de Maceió no estado de Alagoas no NEB

No que concerne à climatologia, SEMARH-AL (2010) afirma que a precipitação anual média oscila entre 1900 a 2100 mm, sendo os sistemas meteorológicos frontais e ondas de leste os mais frequentes. Nesse mesmo contexto, também é possível verificar uma evaporação abaixo de 1400 mm e uma evapotranspiração entre 1200 a 1300 mm, além de outros indicadores fisiográficos. Tais características permitem fazê-la enquadrar-se no “Clima Tropical Chuvoso com Verão Seco”, representado por As’ na classificação climática de Köppen. A Figura 2 mostra a distribuição anual das médias mensais de precipitação pluviométrica para o período de 1943 a 2012. O relevo é marcado por baixas altitudes, e encontra-se inserido na unidade geomorfológica da Baixada litorânea, cuja largura de 25 m estendendo-se por toda costa alagoana.

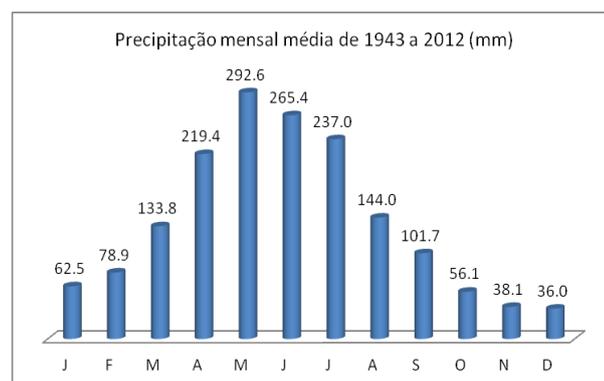


Figura 2 - Precipitação mensal de Maceió - AL no período de 1943 a 2012

Pinho *et al.* (2010) afirmaram que em Maceió, nos meses de abril a julho, concentra-se a maior média de precipitação, com valor que chega a 995,5mm, correspondendo a 60% da precipitação anual. Os meses que representam o período seco correspondem a 12% do total anual, mostrando-se ao longo do tempo, uma variabilidade espacial característica do NEB.

Para formação da série temporal, foram considerados os dados pluviométricos produzidos pela extinta Rede Hidroclimática da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE; Rede do estado de Alagoas - SEMARH - AL; e a Rede do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. O período de observação foi estabelecido em 70 anos, começando de janeiro de 1943 a dezembro de 2012. Por conta das variabilidades climáticas, para análise de tendência, Robson *et al.* (2000) sugeriram que pelo menos 50 anos de registros fossem necessários e não mais 30, antes provavelmente utilizados para atender às normais climatológicas.

Inicialmente, a série diária foi transformada em séries mensais e totais anuais, sendo os meses e os anos faltosos respectivamente preenchidos e os dados duvidosos analisados. Em ambos os casos foi aplicado o Método de regressão linear múltipla para consistência dos dados pluviométricos (Holanda e Oliveira, 1979). Esta metodologia é utilizada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM em parceria com a Agência Nacional de Águas - ANA, para atender ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH.

A análise exploratória dos dados teve início com uma análise estatística (tendências centrais e dispersivas) e detecção de *outliers* (pontos atípicos). Para verificação dos *outlier* foi usado o critério da Amplitude Inter-quartil (AIQ). Em seguida, foi usado o método do histograma para a análise da distribuição de frequência. Para intensificar as análises dos parâmetros estatísticos foi utilizado o diagrama *Box Plot*. Em seguida, elaborou-se um gráfico cartesiano contendo a variabilidade interanual e a respectiva tendência linear da série.

Com as séries mensais e anuais preenchidas e homogeneizadas foi possível compor as duas variáveis hidrológicas previstas na metodologia, como a “Precipitação Total Anual - PTA” e o “Trimestre Mais Umido - TMU”. Em seguida, os testes estatísticos de Mann-Kendall e Spearman’s Rho propostos para detecção de tendência, foram aplicados às variáveis hidrológicas. Esses testes estatísticos podem ser encontrados em Robson *et al.* (2000) e Chiew e Siriwardena (2005).

Segundo Chiew e Siriwardena (2005) os testes estatísticos consistem em definir uma hipótese nula “ $h_0$ ” que pressupõe a não existência de tendência em uma série de dados, e uma hipótese alternativa “ $h_1$ ”, para a existência de tendência crescente ou decrescente. A estatística de teste é designada por um valor numérico calculado a partir da série de dados que está sendo testada. Se o valor da estatística de teste é maior do que o valor crítico, “ $h_0$ ” é rejeitada. Nesse processo, poderão ocorrer dois tipos de erros: O erro tipo I, quando “ $h_0$ ” é incorretamente rejeitado, e tipo II, quando “ $h_0$ ” é aceita sendo e “ $h_1$ ” verdadeira.

O meio de medir se a estatística de testes é muito diferente dos valores que normalmente ocorreriam sob “ $h_0$ ”, é o nível de significância estatística ( $\alpha$ ). É, portanto, a probabilidade de que o valor crítico ultrapasse a estatística de teste em ( $\alpha$ ) assumindo que não há tendência na série. Logo, o nível de significância é a probabilidade de um teste detectar uma tendência (rejeitar “ $h_0$ ”) quando na realidade não existe tendência (erro tipo I) (Chiew e Siriwardena, 2005). Conforme Robson *et al.* (2000), uma possível interpretação do nível de significância pode ser:

- $\alpha > 0,10$  significa pouca evidência contra a hipótese nula “ $h_0$ ”;
- $0,05 < \alpha < 0,10$  significa possíveis evidência contra a hipótese nula “ $h_0$ ”;
- $0,01 < \alpha < 0,05$  significa forte evidência contra a hipótese nula “ $h_0$ ”;
- $\alpha < 0,01$  significa muito forte evidência contra a hipótese nula “ $h_0$ ”.

Para os casos em que os pressupostos dos testes possam ser violados, foi empregado um recurso confiável para determinação do nível de significância e dos valores críticos, conhecido como “Reamostragem” ou *Resampling*. Quando a reamostragem é realizada pelo Método *Bootstrapping*, a série temporal original é reamostrada com reposição para fornecer muitas séries temporais de igual comprimento a dos dados originais. Os dados de cada série temporal reamostrada é obtida por meio de uma seleção aleatória dos valores da série temporal original até que a série reamostrada tenha comprimento de igual ao da série original. Chiew e Siriwardena (2005) recomendam a geração de 1000 séries reamostradas. O valor do teste estatístico obtido com os dados da série temporal original pode então ser comparado com os valores dos testes estatísticos obtidos a partir das séries reamostradas para estimar o nível de significância. Assim, se o valor do teste estatístico calculado com os dados originais é superior ao 950º, maior valor dos testes estatísticos de 1000 séries reamostradas, a hipótese nula, “ $h_0$ ”, é rejeitada ao nível de significância de 5%.

Kundzewicz e Robson (2004) afirmaram que os pressupostos de que se refere à violação, correspondem à condição de normalidade, homogeneidade e independência, atribuídas aos dados da série. Considerando que as violações às hipóteses nulas “ $h_0$ ” frequentemente ocorrem quando se trata de séries pluviométricas, decidiu-se, portanto, utilizar a opção da técnica de reamostragem *Bootstrapping*, sugerida por Chiew e Siriwardena (2005). Por ser reconhecido como um método robusto, a aplicação desse recurso tem sido muito utilizada como forma de adequação às características peculiares às séries temporais de chuva.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise exploratória dos dados da série anual, tanto as estatísticas descritivas de tendências centrais como as dispersivas, apresentaram-se compatíveis. O critério da Amplitude Inter-quartis (AIQ) não detectou *outlier*. O sumário das estatísticas descritivas e análise de pontos atípicos estão detalhados na Tabela 1.

Tabelas 1 - Estatísticas descritivas e análise de pontos atípicos da série anual

Sumário estatístico e detecção de <i>outlier</i>			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Média	1665,7 mm	Mínimo	890,2 mm
Mediana	1568,0 mm	1º quartil	1368,3 mm
Desvio padrão	441,5 mm	3º Quartil	1915,6 mm
Variância	194932,1 mm	Amplitude (AIQ)	547,3 mm
Coef. de curtose	-0,40	Limite superior	2736,5 mm
Coef. de assimetria	0,66	Limite inferior	547,5 mm
Coef. de variação	27%	<i>Outlier</i> inferior	Não existe
Máximo	2676,8 mm	<i>Outlier</i> superior	Não existe

Analisando o histograma e o *Box Plot* observou-se que a variável PTA apresentou assimetria positiva. Quanto à linha de tendência, o gráfico denotou uma reta com coeficiente positivo, sinalizando a possibilidade de detecção de tendência crescente na PTA. As Figuras 3, 4 e 5 mostram individualmente os gráficos que serviram à análise exploratória dos dados.

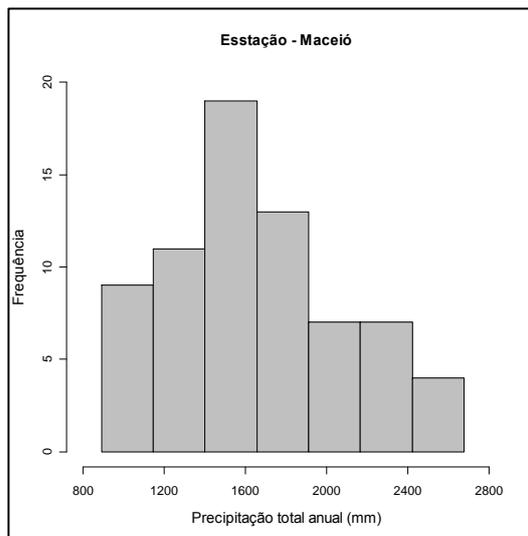


Figura 3 - Análise da distribuição de Frequência

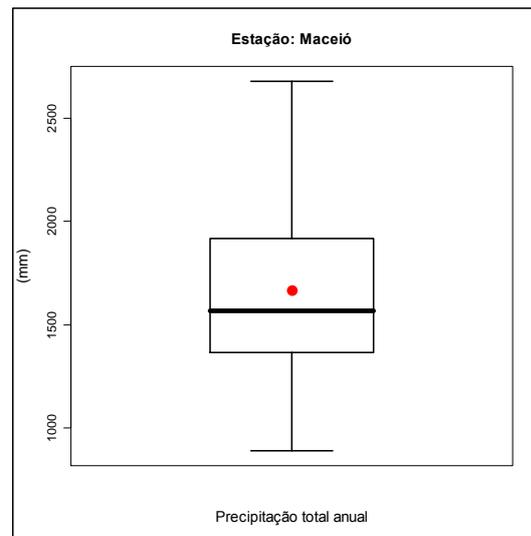


Figura 4 - Análise dos parâmetros estatísticos

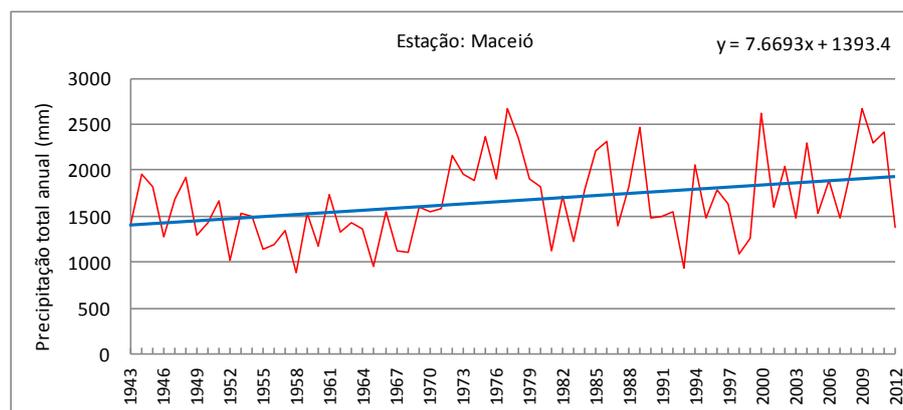


Figura 5 – Análise da variabilidade interanual e linha de tendência da série

Os resultados dos testes estatísticos indicaram tanto para a PTA como para TMU, tendências positivas com fortes evidências contra a hipótese nula “ $h_0$ ” quando  $\alpha < 0,05$ , segundo o resultado do Método de Mann-Kendall. Da mesma forma, indicaram tendência positiva muito forte contra a hipótese nula “ $h_0$ ” quando  $\alpha < 0,01$ , segundo o Método de Spearman’s Rho. Tais condições permitem que se considerem a existência de tendências crescentes na PTA e no TMU. As Tabelas 2 e 3 resumem os resultados dos testes.

Tabela 2 – Resultados dos testes estatísticos aplicados à PTA

Métodos	Variável hidrológica	Estatística de teste	Valores críticos (Reamostragem)			Resultado
			$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
Mann-Kendall	PTA	2.626	1.739	2.028	2.722	Positivo $\alpha < 0,05$
Spearman-Rho		2.667	1.669	1.928	2.512	Positivo $\alpha < 0,01$

Tabela 3 – Resultados dos testes estatísticos aplicados ao TMU

Métodos	Variável hidrológica	Estatística de teste	Valores críticos (Reamostragem)			Resultado
			$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
Mann-Kendall	TMU	2.043	1.729	2.023	2.560	Positivo $\alpha<0,05$
Spearman-Rho		2.014	1.709	2.061	2.730	Positivo $\alpha<0,01$

## CONCLUSÕES

Os resultados dos testes estatísticos indicaram que existem tendências crescentes da precipitação na cidade alagoana de Maceió. A partir daí, o planejamento dos recursos hídricos da cidade de Maceió deverá priorizar uma maior convivência com os excessos hídricos do que com a escassez.

Os órgãos competentes deverão reavaliar os projetos de micro e macrodrenagem, com vista à predominância de maiores escoamentos superficiais no futuro. A Defesa Civil deverá ter seu contingente pessoal redimensionado para maiores demandas de atuação, assim como reequipar-se com tecnologia mais moderna.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil - CPRM, à Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, à Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas - SEMARH-AL, ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. G. M. (2012). Análise de Detecção de Tendências no Padrão Pluviométrico na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.2, pp.320-331.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; SOUZA, W. M. (2012). Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas do Sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.3, pp. 630-645.
- CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. (2005). Trend/Change Detection Software - User Guide. *CRC for Catchment Hydrology*. Austrália.
- FARIAS, R. F. L.; NÓBREGA, R. S. (2010). Tendência Espacial e Temporal da Precipitação Pluviométrica em Pernambuco. In *Mudanças climáticas e Impactos ambientais*. Org. Galvêncio, J. D. Ed. Universitária, UFPE, Recife-PE, Capítulo 15, pp. 251-264.
- HAYLOC, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIACÃO Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; CORONEL, G.; GRACIA, VJ.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall 1960-2000 and links with Sea Surface Temperature. *International Journal of Climate*. v.19, pp. 1490-1512.

- HOLANDA, C. V. M.; OLIVEIRA, E. (1979). *Programa para Homogeneização de Dados - PROHD*. In *Anais do Simpósio de Hidrologia*, Brasília-DF, pp.810-845.
- PORTAL DO IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE cidades. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br>. Acesso em 07 jun. 2016.
- IPCC. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. *The Working Group I contribution to the IPCC's Fifth Assessment Report (AR5)*, Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. (2004). Change detection in Hydrological Records - a Review of the Methodology / Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, v.49, pp. 7-19.
- OBREGÓN, G.; MARENGO, J. A. (2007). Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: *Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas*. Relatório N. 2 do Ministério do Meio Ambiente.
- PINHO, V. N.; MEDEIROS, I. R.; CARNAÚBA, F. M.; NASCIMENTO, A. A.; BRITO, P. L. C. (2010). *Análise da Distribuição da Frequência de Precipitação em Diferentes Intervalos de Classes para Maceió - Alagoas*. In *Anais do XVI CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Belém-PA.
- SALGUEIRO, J. H. P. B.; PINTO, E. J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. M e SOUZA, W. M. (2014). Tendência de Índices Pluviométricos na Bacia do rio Capibaribe-pe e sua Influência na Gestão dos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, vol.07, n.05, p1002-1014.
- ROBSON, A.; BÁRDOSSY, A.; JONES, D.; KUNDZEWICZ, Z. W. (2000). Métodos Estatísticos para Testes de Mudanças, Detecting Trend and other Change Hydrological Data. *World Climate Program - Water*, Cap. 5, WCDMP-45, WMO, Genebra, Suíça.
- SANTOS, S. M. S.; ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M. (2014). Tendência de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.7, pp. 243-257.
- SEMARH-AL (2010). Secretaria do Meio ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas. Governo do Estado de Alagoas. *Plano Estadual de Recursos Hídricos*, Relatório Síntese, Maceió-AL, v1.
- SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MOREIRA, M.; REAL, J. C.; BARBOSA, R. C. (2015). Rainfall trends over 40 years in the Cobres river basin, Portugal: *variability and impacts*. *Hydrological Sciences and Water Security: Past, Present and Future* (Proceedings of the 11th Kovacs Colloquium, Paris, France, June 2014). IAHS Publ. 366P.
- SOUZA, W. M. & AZEVEDO, P. V. (2012) Índice de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, UFPE, Recife-PE, v.2, pp. 320-331.