



IV-511 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POTI NO ESTADO DO CEARÁ

Antônio Duarte Martins Terceiro

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús (2019).

Alan Michell Barros Alexandre ⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza (2002), mestre e doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2005 e 2012). Professor Adjunto da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús.

Tatiane Lima Batista

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará (2015), mestra em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2018). Professora Assistente da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús.

José Kerlly Soares de Araújo

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús (2023), mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Professora Machadinha Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús-CE, CEP 63708-825. Fone: +55 (88) 3691-9700 - e-mail: alanmichell@crateus.ufc.br

RESUMO

Alterações climáticas ao longo dos anos tem se tornado cada vez mais evidentes, pode-se notar estas mudanças em diversos contextos, dentre eles, nas precipitações. As precipitações são componente fundamental na composição de uma sociedade, movendo sua economia, entre outras. Tendo em vista sua importância, é fundamental que alterações ocorridas em seus ciclos sejam observadas e quantificadas, para que o seu comportamento futuro possa ser previsto com um bom nível de segurança e problemas sejam evitados. Para isso, é possível analisar estatisticamente a estacionariedade de suas séries temporais. Neste estudo, foram selecionadas treze estações com área de influência na porção cearense da bacia hidrográfica do rio Poti, e suas séries temporais de precipitação total anual avaliadas pelos testes de Mann-Kendall e Regressão Linear. Como resultado, apenas a estação 440005 de Croatá foi considerada não estacionária em ambos os testes. A partir do coeficiente angular da Regressão Linear foram identificadas onze estações com tendência de diminuição da precipitação, entre elas: Croatá com uma taxa de -4,11 mm/ano. Entre as estações consideradas estacionárias, foram observados valores altos como em 540019 de Independência em -3,525 mm/ano e 440003 de Novo Oriente com -3,49 mm/ano. Apesar das altas taxas de variação da precipitação, as duas últimas estações foram consideradas sem tendência estatisticamente significativa nos testes de Mann-Kendall e Regressão Linear. Somente as estações 540020 do Aeroporto, no município de Crateús e 441005 de Pedro II no estado do Piauí apresentaram taxas de crescimento nas séries com 0,2365 mm/ano e 2,117 mm/ano, respectivamente. No entanto, esta foram consideradas estatisticamente estacionárias.

PALAVRAS-CHAVE: Regime pluviométrico, Estacionariedade de séries temporais, teste não paramétrico Mann-Kendall.

INTRODUÇÃO

Alterações nos padrões climáticos de uma região tendem a afetar diretamente não só a natureza do local, mas seus polos econômicos e sociais. Aplicadas estas mudanças em uma série histórica de dados hidrológicos, quando relacionadas a uma tendência temporal, causam efeitos inesperados em seus ciclos, que são previstos baseados em médias e variâncias constantes, invariáveis. Dentre os fatores que causam essa não-estacionariedade é possível citar o desmatamento, crescimento urbano, mudanças físico-químicas no solo e outros fatores de origem antropogênica que promovem mudanças climáticas, assim como os efeitos da variabilidade natural no clima (Moreira; Naghettini; Eleutério, 2016).



Tais alterações nos parâmetros de uma amostra dificultam as previsões estatísticas do local, visto que por padrão, uma série é considerada estacionária, principalmente ao analisar um espaço curto de tempo, em que as variações não demonstram um grau de significância. A confiabilidade desta pressuposição é indiretamente proporcional ao tamanho da amostra, não sendo confiável principalmente em um período maior que 30 anos (Detzel *et al.*, 2011).

Ao executar a previsão de variáveis hidroclimatológicas de uma região haverá uma presença residual diferente dos resultados esperados, visto que a análise foi feita considerando uma taxa de frequência não tendenciosa, logo, não mudando com o tempo. Justificando a necessidade deste estudo, já que essa diferença não esperada é capaz de, em um grande espaço de tempo, acarretar problemas hidrológicos de grande magnitude.

Um dos principais problemas que podem ocorrer é o mau dimensionamento de infraestruturas hídricas, as quais podem estar subdimensionadas ou superdimensionadas devido a variação nos parâmetros não contabilizada, podendo trazer problemas econômicos, sociais, e risco a vida da população caso haja um sinistro (Ishak *et al.*, 2013). Situado o problema desta imprecisão estatística, faz-se necessária a análise de estacionariedade nas séries de dados, como precipitações, em regiões onde a avaliação não foi feita com a precisão necessária para um valor de confiança aceitável.

Nos parâmetros estatísticos que caracterizam uma série de dados, a estacionariedade é uma característica que pode ser encontrada em um conjunto de dados que apresentam invariância temporal, em determinado período estudado. Logo, ao observar dois subconjuntos de uma amostra estacionaria, é de se esperar que ambos demonstrem comportamento muito semelhante, ou idêntico, dentro de um grau de liberdade definido.

A não-estacionariedade é o termo dado ao efeito de mudança temporal dos dados, que apresentam um comportamento tendencioso que muda sua média, variância e autocorrelação, sendo necessário um intervalo satisfatório de tempo para que as mudanças sejam consideradas significativas. Por vezes uma amostra tendenciosa pode ser considerada estacionária apenas por seu intervalo analisado não ser grande o suficiente para que as variações fossem consideradas relevantes. Quando a não-estacionariedade ocorre repentinamente define-se como salto, se gradualmente é o caso de uma tendência. Esta também pode apresentar característica cíclica, principalmente ao analisar dados que são afetados pela ação climática (Naghettini; Pinto, 2007).

Testes estatísticos são comumente aplicados, na investigação de séries temporais de precipitação de modo a verificar se a hipótese da estacionariedade de uma série temporal admitida é confiável. Estudos no estado do Ceará como de Santo *et al.* (2009) avaliaram a estacionariedade de 18 estações distribuída no estado do Ceará, através da significância do coeficiente angular da Regressão Linear, observaram mudanças em 7 estações apontando um aumento da precipitação, e tendências negativas em 4 estações, porém estas não são estatisticamente significantes.

Mateus *et al.* (2015) fizeram uma análise da precipitação através do teste Mann-Kendall, para estações representativas das 8 macrorregiões de planejamento do Ceará da Secretaria do Planejamento e Gestão. Foram encontradas tendências de diminuição nas precipitações (com significância estatística) para Região Metropolitana de Fortaleza, Sertão dos Inhamuns e Sertão Central; tendências de aumento nas precipitações (sem significância estatística) foram observadas no Litoral Oeste, Sobral/Ibiapaba, Baturité, Litoral Leste/Jaguaribe e Cariri/Centro Sul.

Estudos mais recentes como de Hiera, Lima Júnior e Zanella (2019) examinaram diversas estações de precipitação distribuída pelo estado do Ceará utilizando o teste de Mann-Kendall, e observaram tendência decrescente significativa nos quadros de meses chuvosos para as regiões do Cariri e Jaguaribana. Araújo *et al.* (2020) avaliaram as precipitações da região metropolitana do Cariri, usando o teste Mann-Kendall e Regressão Linear, das nove estações avaliadas, detectaram tendências negativas em oito e positivas em apenas uma.

Análise de tendências em séries de precipitações podem utilizar diversas variáveis de acordo com a finalidade do estudo como: precipitação total anual, precipitação acumulada sazonal, número de dias com precipitação acima de um valor de referência, precipitação máxima diária, precipitação máxima em um determinado número de dias, quantidade de dias úmidos, dias consecutivos sem chuva etc. Nesse trabalho, o objetivo é analisar a estacionariedade da precipitação anual, para posterior análise de aporte de vazões afluentes a

reservatórios superficiais, em estações pluviométricas localizadas na região hidrográfica dos Sertões de Crateús a partir de testes estatísticos de Mann-Kendall e Regressão Linear.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo limita-se a parcela cearense da bacia hidrográfica do rio Poti. Com foz no rio Parnaíba, no estado do Piauí, e nascente na região centro-oeste do estado do Ceará, na serra dos Cariris Novos, a bacia do rio Poti possui uma área total de área de aproximadamente 52.270 km², dos quais cerca 13.470 km² encontram-se no estado do Ceará.

Nesse estudo foram selecionadas 13 estações pluviométricas consideradas como representativas do regime pluviométrico da região, com série histórica de dados acima de 45 anos. As séries históricas de dados pluviométricos foram coletados no portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA). Os dados referentes as estações pluviométricas e sua localização podem ser observados na Figura 1 e Tabela 1. A Figura 1 apresenta o mapa da região em estudo, com sua distribuição espacial e a quantidade de dados anuais em suas séries históricas entre parênteses na legenda. A Tabela 1 mostra o início e fim da série, as coordenadas e código ANA das estações pluviométricas.

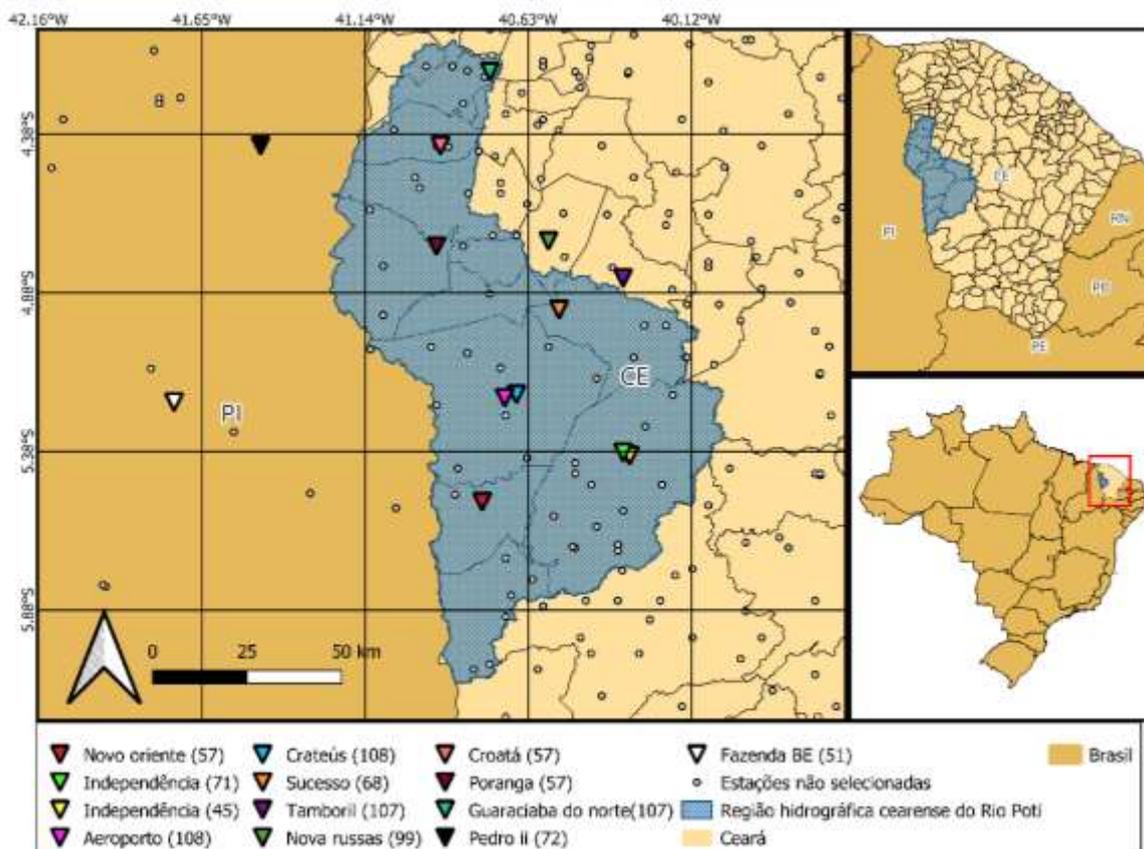


Figura 1: Mapa da parcela cearense do rio Poti com a localização das estações

Tabela 1: Estações pluviométricas na área de estudo

Estação	Código ANA	Coordenadas		Período	Nº Anos
		X	Y		
Novo Oriente	540003	303493,736	9387505,504	1962-2018	57
Independência*	540019	354548,122	9403670,838	1974-2018	45
Independência**	540016	352273,930	9404804,772	1911-1981	71
Aeroporto (Crateús)	540020	311578,544	9424974,539	1911-2018	108
Crateús	540000	315270,429	9424984,372	1911-2018	108
Sucesso	440020	329989,820	9454512,950	1920-1987	68
Tamboril	440007	352147,905	9465617,454	1912-2018	107
Nova Russas	440017	326230,466	9478455,726	1920-2018	99
Croatá	440005	287823,301	9511618,754	1962-2018	57
Poranga	440018	287362,044	9476479,867	1962-2018	57
Guaraciaba do Norte	440023	305713,830	9537352,642	1912-2018	107
Fazenda Boa Esperança	541002	196553,109	9421794,085	1968-2018	50
Pedro II	441005	226202,706	9511315,670	1913-1985	72

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é utilizado frequentemente para séries temporais no contexto ambiental, por avaliar a sequência dos valores, sem assumir nenhum critério e ainda assim ser tão poderoso quanto testes paramétricos, onde é especialmente efetivo ao analisar dados não-normais e séries temporais com falhas, caso comum em séries hidrometeorológicas (Mourato; Moreira; Corte-Real, 2009; Wang *et al*, 2020). Na literatura, é o teste mais utilizado para detectar tendências (YUE *et al*, 2002), e o mais apropriado dentro do contexto de mudanças climáticas (GOOSSENS; BERGER, 1987).

Para esse teste, é necessário aplicar primeiramente o teste de sequências, seguindo as equações 1 e 2 (Lopes; Da Silva, 2013):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad \text{equação (1)}$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad \text{equação (2)}$$

Em que: X_i e X_j = valores da série, com $j > i$; n = comprimento da série.

Em seguida, realiza-se o cálculo da variância (V_s) e a estatística Z do teste, que determina a existência de tendências positivas, negativas ou nulas na série, a partir das equações 3 e 4:

$$V_s = \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m i(i-1)(2i+5) \right) / (18) \quad \text{equação (3)}$$

$$Z = \begin{cases} (s-1)/\sqrt{V_s}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{V_s}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad \text{equação (4)}$$

Em que: i = valores em grupos empatados; n = tamanho amostral; \sum = Somatório dos conjuntos de dados empatados; M = quantidade de grupos empatados.

Ao obter a estatística do teste, analisamos seu valor p, que é obtido aplicando a função de distribuição acumulada, dada na equação 5:

$$p = 0,5 - \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_0^{|Z|} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) \quad \text{equação (5)}$$

Em que: t = valores normalizados da amostra

RESULTADOS

Na análise de tendência usando o teste de Mann-Kendall foram calculados o valor P para cada uma das estações para os níveis de significância estatística (α) para 5% e 10%. A hipótese nula (H_0) indica a não existência de tendência na série de dados, ou seja, a série pode ser considerada estacionária para o nível de significância adotado, aceita a hipótese nula quando o valor P for maior que o nível de referência do teste (valor $P > 0,05$ ou $0,10$). Caso contrário rejeita-se a H_0 e aceita-se a hipótese alternativa (H_1) que há tendência na série de dados, logo ela é estatisticamente não estacionária (Helsel; Hirsch, 1992).

A tendência da série analisada ou taxa de variação anual foi obtida através de uma análise de Regressão Linear simples, onde os valores de precipitação total anual são ajustados a um modelo linear do tipo $Y = A(X) + B$, onde: X é a variável tempo; Y é a precipitação; A é o coeficiente angular; B é o valor da reta ajustada para o primeiro ano da série. A tendência da série analisada foi obtida pelo comportamento da reta, onde: $A > 0$ significa tendência positiva; e $A < 0$ indica tendência negativa, onde a pode ser avaliado como mm/ano. A avaliação da significância do A foi realizada com o valor P, como descrito anteriormente.

A Tabela 2 apresenta o valor P, qual das hipóteses foi aceita e o valor do coeficiente angular da regressão (A) para as diferentes estações analisadas. A Figura 2 apresenta as séries de dados de precipitação anual e a linha de tendência ajustada na Regressão Linear.

Tabela 2: Resultados dos testes Mann-Kendall e Regressão Linear

ESTAÇÃO	Mann-Kendall			Regressão Linear			
	Valor P	Nível de significância		Valor P	Nível de significância		Coeficiente angular A
		$\alpha = 5\%$	$\alpha = 10\%$		$\alpha = 5\%$	$\alpha = 10\%$	
Novo Oriente	0,184	H_0	H_0	0,142	H_0	H_0	- 3,4902
Independência*	0,353	H_0	H_0	0,228	H_0	H_0	- 3,5250
Independência**	0,222	H_0	H_0	0,251	H_0	H_0	- 1,7155
Aeroporto	0,897	H_0	H_0	0,809	H_0	H_0	0,2365
Cratéis	0,750	H_0	H_0	0,789	H_0	H_0	- 0,2577
Sucesso	0,312	H_0	H_0	0,614	H_0	H_0	- 1,0121
Tamboril	0,289	H_0	H_0	0,157	H_0	H_0	- 1,5161
Nova Russas	0,457	H_0	H_0	0,403	H_0	H_0	- 0,9749
Croatá	0,014	H_1	H_1	0,021	H_1	H_1	- 4,1133
Poranga	0,885	H_0	H_0	0,727	H_0	H_0	- 0,7699
Guaraciaba do Norte	0,205	H_0	H_0	0,141	H_0	H_0	- 2,3386
Faz. Boa Esperança	0,537	H_0	H_0	0,492	H_0	H_0	- 2,3110
Pedro II	0,977	H_0	H_0	0,514	H_0	H_0	2,1172

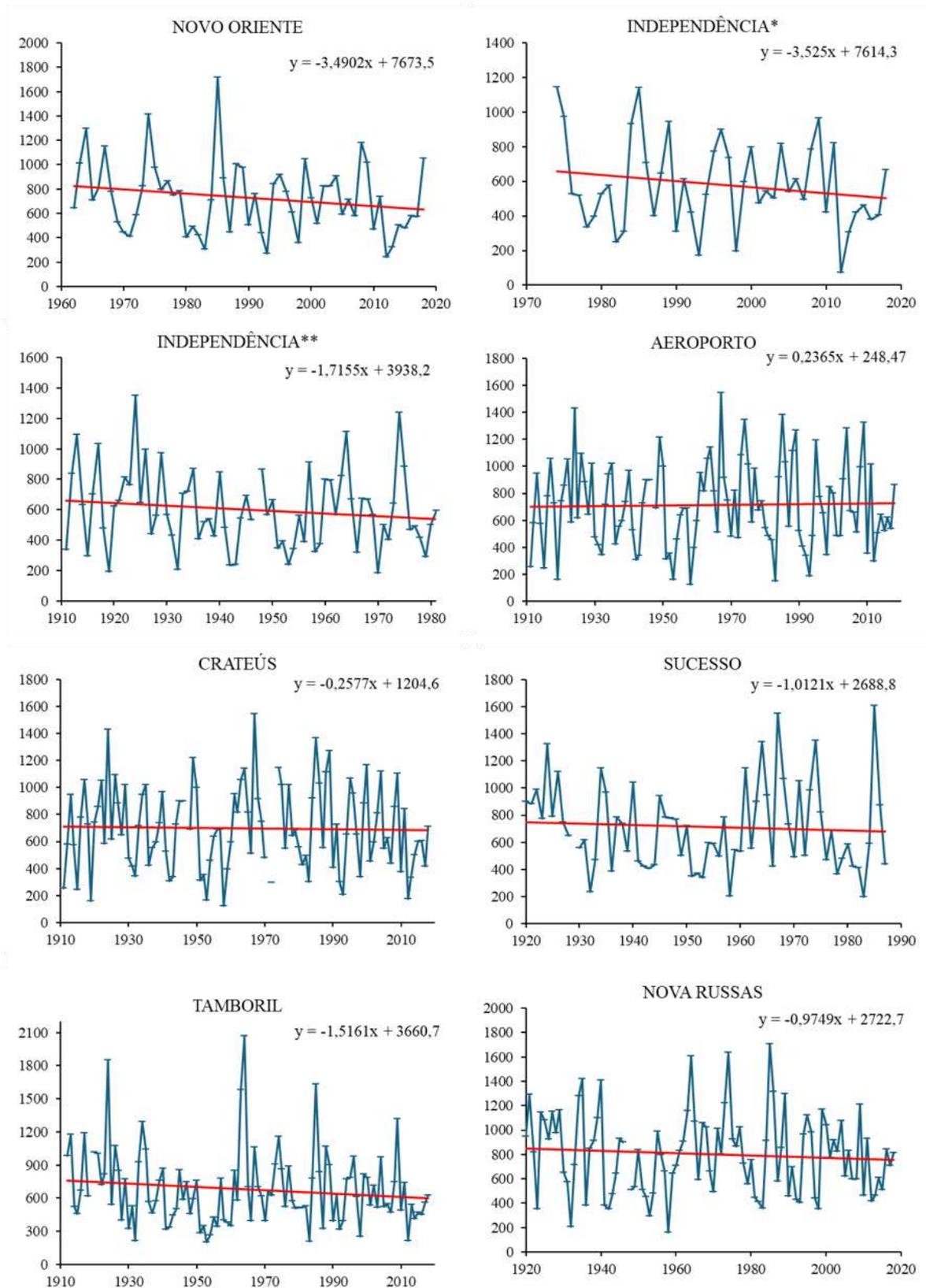


Figura 2: Séries de dados de precipitação anual e linha de regressão. (continua)

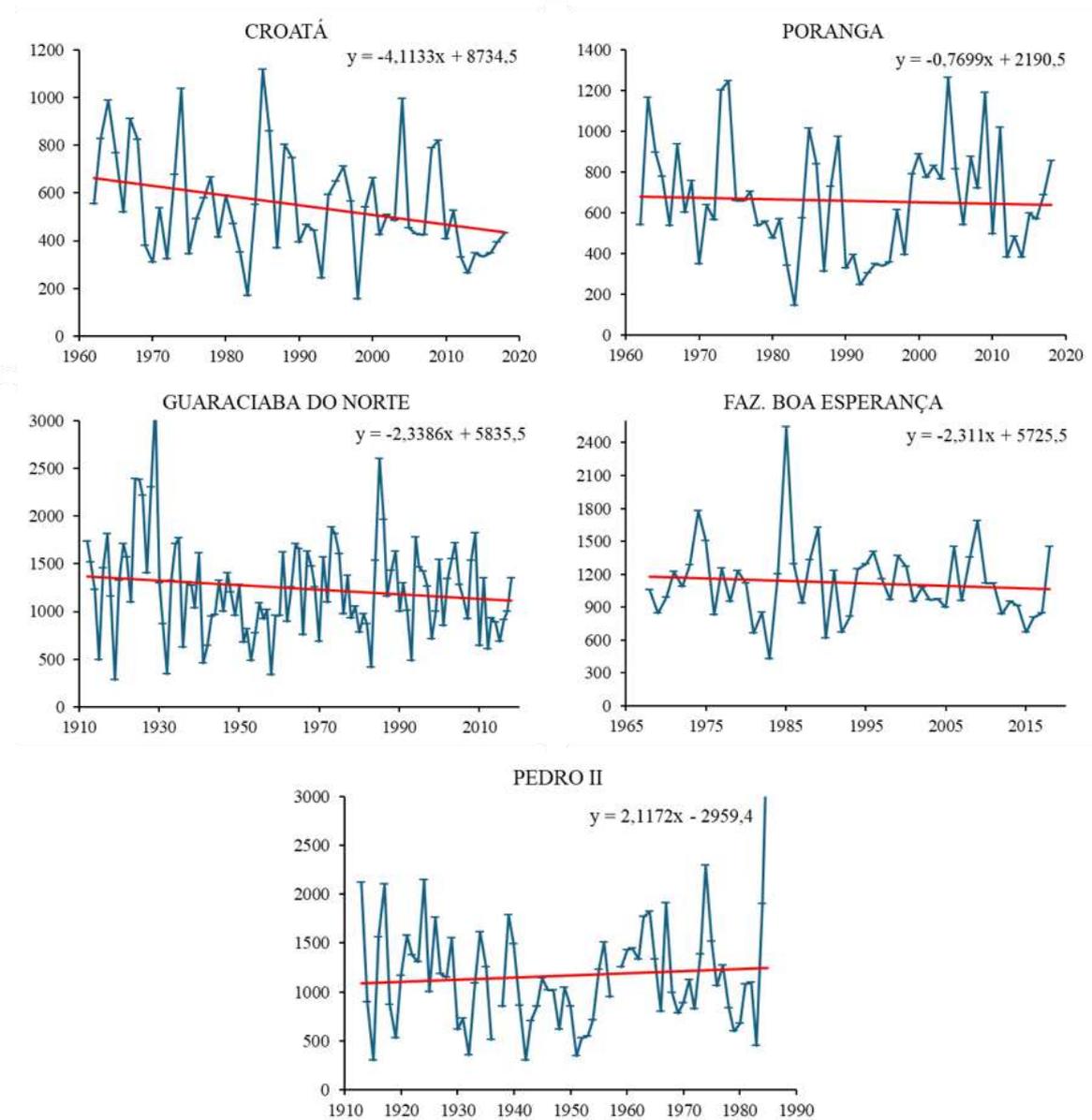


Figura 2: Séries de dados de precipitação anual e linha de regressão

De acordo com a Tabela 2 verifica-se que somente a estação pluviométrica 440005 de Croatá apresentou uma não estacionariedade para o teste de Mann-Kendall para os níveis de significância de 5% e 10% onde o valor P obtido para essa estação foi de 0,014, rejeitando assim a hipótese nula H_0 . As demais estações apresentaram-se como não tendenciosas estatisticamente para os níveis de significância analisados apesar da variação do valor P com o menor valor de 0,184 para estação de Novo Oriente e o maior de 0,977 para estação Pedro II.

Analisando os coeficientes angular A da Regressão Linear apresentados na Tabela 2 e graficamente na Figura 2, observa-se que 11 das 13 estações analisadas possuem uma tendência de diminuição da precipitação total anual ao longo da série estudada. Das quais 10 possuem ainda permanecem como estacionárias. A estação 440005 de Croatá também foi considerada não estacionária devido ao valor P de 0,021 para os dois níveis de significância utilizados. Somente as estações 540020 do Aeroporto de Crateús e 441005 em Pedro II apresentaram tendência de crescimento das precipitações, no entanto elas como a maioria foram consideradas estatisticamente estacionárias.



Considerando o coeficiente angular como taxa de variação da precipitação observa-se o maior valor para a estação de Croatá que diminui -4,11 mm/ano totalizando cerca de 234,5 mm durante os 57 anos da série (1962 a 2018). Cabe observar que essa estação foi considerada não estacionária nos testes de Mann-Kendall e Regressão Linear. No entanto, a estação 540019 no município de Independência foi avaliada com estacionária em ambos os testes apesar de apresentar uma alta taxa de diminuição de precipitação anual -3,525 mm/ano, o que para a série de 45 anos (1974-2018) equivale a um total de 158,6 mm. A estação de Novo Oriente também apresentou uma taxa relativamente alta de diminuição na precipitação com -3,49 mm/ano, perfazendo um total de 198,9 mm em 57 anos de dados (1962-2018), também considerada estacionária.

Duas estações pluviométricas estão localizadas no município de Crateús, uma homônima e outra denominada de Aeroporto, ambas com séries longas com 108 anos de dados (1911-2018). No entanto, a estação Crateús apresenta uma taxa de diminuição de precipitação de -0,2577 mm/ano, já a estação Aeroporto possui uma tendência de aumento das precipitações à taxa de 0,2365 mm/ano. Tal resultado necessita de uma análise mais acurada nas séries de dados, já que a proximidade geográfica e características físicas locais semelhantes nos induz a supor que elas deveriam ter um comportamento semelhante.

Além da estação Aeroporto no município cearense de Crateús, a estação Pedro II localizada no município homônimo no estado do Piauí apresentou uma taxa de crescimento de precipitação equivalente a 2,117 mm/ano perfazendo um total de aumento de 158,79 mm durante os 75 anos de série observada (1913-1985).

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo a análise da estacionariedade das séries de precipitação anuais de 13 estações pluviométricas com área de influência na região hidrográfica cearense do rio Poti a partir de testes estatísticos Mann-Kendall e análise do coeficiente angular de Regressão Linear. Das estações avaliadas, 12 apresentaram série histórica de precipitação total anual estatisticamente estacionária para os níveis de significância de 5% e 10% em ambos os métodos. Apenas a estação 440005 de Croatá apresentou um valor P fora do valor crítico estabelecido para significância de 5% e 10%, em Mann-Kendall 0,014 e na Regressão Linear de 0,021.

A avaliação do coeficiente angular da Regressão Linear ajustada para série histórica apresentou tendência de diminuição das precipitações em 11 das estações analisadas. As maiores taxas de diminuição foram observadas na estação de Croatá com -4,11 mm/ano, considerada não estacionária, Independência (540019) com -3,525 mm/ano e Novo Oriente -3,49 mm/ano. Apesar das altas taxas de variação da precipitação as duas últimas estações foram consideradas sem tendência estatisticamente significativa no teste de Mann-Kendall e Regressão Linear. Somente as estações de Aeroporto, no município de Crateús e Pedro II no estado do Piauí apresentaram taxas de crescimento nas séries com 0,2365 mm/ano e 2,117 mm/ano, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAÚJO, H. M. et al. Análise de tendência nas séries de precipitação na Região Metropolitana do Cariri – Ceará. In: 15º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste – SRHNE. Caruaru-PE, 2020.
2. DETZEL, D. et al. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 3, p. 95–111, 2011.
3. GOOSSENS, C.; BERGER, A. How to Recognize an Abrupt Climatic Change? Abrupt Climatic Change, p. 31–45, 1987.
4. HELSEL, D. R.; HIRSCH R. M. Statistical Methods in Water Resources. Amsterdam: Elsevier, 1992.
5. HIERA, M. D.; JUNIOR, A. F. L.; ZANELLA, M. E. Análise da Tendência da Precipitação no Estado do Ceará no Período 1974 a 2016. Revista Brasileira de Climatologia, v. 24, n. 0, 2019.
6. ISHAK, E. H. et al. Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. Journal of Hydrology, v. 494, p. 134–145. 2013.
7. KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4. ed. London: Griffin, 1975.
8. LOPES, J. R. F.; SILVA, D. F. Aplicação do Teste de Mann-Kendall para Análise de Tendência Pluviométrica no Estado do Ceará. Revista de Geografia, v. 30, n. 3, p. 192–208, 2013.
9. MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. Econometrica, v. 13, n. 3, p. 245, 1945.



10. MATEUS, A. E. et al. Perspectivas em Variáveis Meteorológicas para o Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 08, n. 05, p. 1383-1392, 2015.
11. MOREIRA, J.; NAGHETTINI, M.; ELEUTÉRIO, J. Frequência e risco sob não-estacionariedade em registros pluviométricos da bacia do alto rio Tarauacá, Acre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 232–241, 2016.
12. MOURATO, S.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. *International Journal of Climatology*, v. 30, n. 12, p. 1784–1794, 2009.
13. NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. *Hidrologia estatística*. [s.l.] CPRM, 2007.
14. SANTOS, C. A. C. et al. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.1, 39-47, 2009.
15. WANG, F. et al. Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series. *Frontiers in Earth Science*, v. 8, 2020.
16. YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, v. 259, n. 1-4, p. 254–271, 2002.