

Análise de tendências no comportamento da chuva na bacia do rio Paraíba do Sul.

Marcel Pereira de Andrade^{1*}
Celso Bandeira de Melo Ribeiro¹

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
CEP: 36036-900 - Juiz de Fora - MG, Brasil
* marcel.pdandrade@gmail.com

RESUMO

A região do sudeste do Brasil vivenciou durante os verões de 2013 a 2015 uma baixa histórica nos índices pluviométricos, que em conjunto com diversos fatores como o aumento da demanda de água e a má gestão os recursos hídricos desencadeou o que muitos chamaram de “crise hídrica”. Este estudo teve como objetivo avaliar tendências no comportamento da precipitação total mensal na bacia do rio Paraíba do Sul. Para isso foi utilizado o teste de Mann-Kendall e para estimar a magnitude da variação da precipitação o estimador de Sen’s Slope. Esses testes foram aplicados nas séries de dados de 220 estações pluviométricas distribuídas ao longo da bacia do rio Paraíba do Sul. Observou-se o aumento da precipitação em 17 estações e em contrapartida a diminuição da precipitação em 17 estações, as demais não apresentaram significância estatística. A espacialização do resultado demonstrou que a diminuição da precipitação total mensal foi maior do que a de aumento. Por fim, concluiu-se que a ocorrência de regiões em que houve diminuição da chuva foram mais elevadas do que aquelas com aumento.

INTRODUÇÃO

Mudanças no clima e a ocorrência de eventos extremos são assuntos que vem atraindo a atenção de diversos estudos ao redor do mundo. A ocorrência desses podem influenciar diversas áreas como a agricultura, a gestão de recursos hídricos e, o mais importante, afetam a qualidade de vida da população exposta (CHEN *et al.*, 2017). Sob essa ótica, entender a distribuição temporal e espacial da precipitação, que é uma das variáveis mais importantes em estudos hidrológicos, é de suma importância para a gestão de recursos hídricos, de modo que auxiliam nas tomadas de decisões em casos de eventos críticos de seca ou cheia. (CHATTERJEE *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2018).

No final do ano de 2013 o sudeste do Brasil vivenciou a maior estiagem dos últimos 55 anos (NOBRE *et al.*, 2016), onde os índices pluviométricos foram abaixo da média histórica dessa região. Este comportamento atípico da variável precipitação em conjunto com o crescimento da demanda de água nos centros urbanos, uma gestão de recursos hídricos ineficiente e a falta de consciência da população desencadeou uma crise hídrica na região sudeste do Brasil (MARENGO *et al.*, 2015; NOBRE *et al.*, 2016).

Marengo *et al.* (2015) e Nobre *et al.* (2016) estudaram os impactos e as características do período de seca vivenciados nos anos de 2014 e 2015 em especial sobre a região metropolitana de São Paulo. Eles observaram que as condições climáticas que influenciaram os baixos índices pluviométricos na região sudeste estavam relacionadas a alteração da circulação atmosférica, que ocorreu devido a influência de um anticiclone anômalo que teve início nos primeiros dias do mês de janeiro de 2015 sobre o Oceano Atlântico subtropical. Marengo *et al.* (2015) concluíram que os problemas relacionados a falta de água, principalmente na região metropolitana de São Paulo, não resultam apenas das variáveis climáticas, mas também pela falta de eficiência no gerenciamento.

OBJETIVO

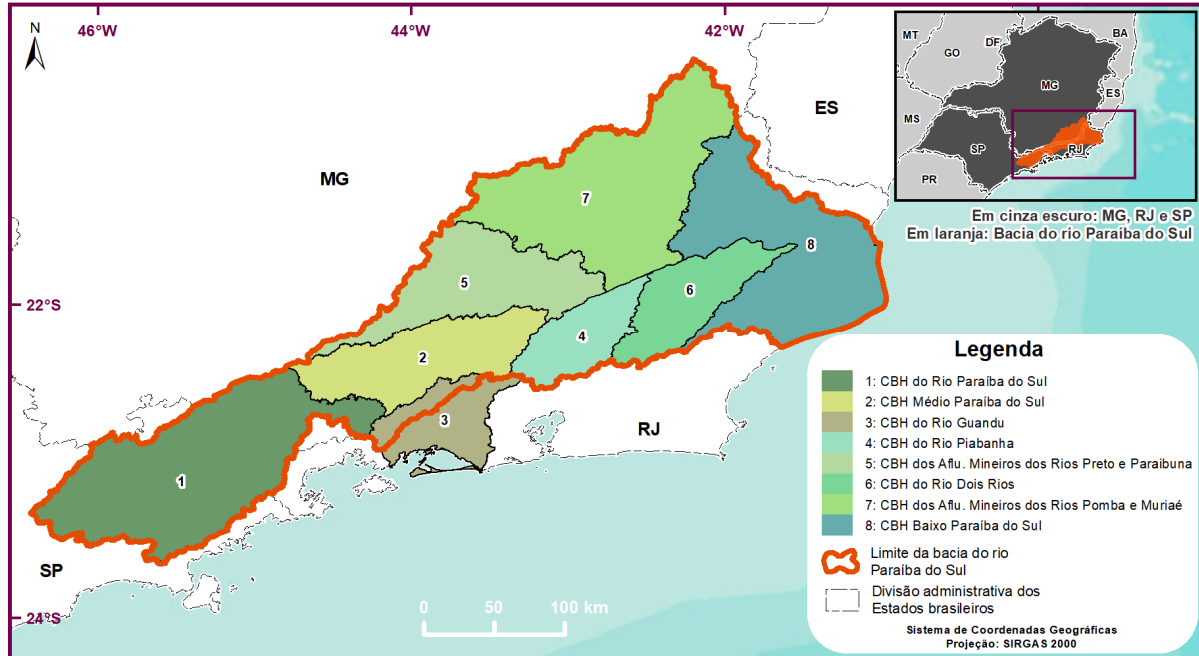
Este estudo teve como objetivo avaliar tendências no comportamento da precipitação total mensal de 220 estações pluviométricas distribuídas ao longo da bacia do rio Paraíba do Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, que está localizada na região sudeste do Brasil entre as latitudes 20°26’S e 23°38’S e as longitudes 41°00’O e 46°25’O. Ela possui área de drenagem de aproximadamente 62.074 km² e uma grande densidade populacional tendo cerca de 17.634.301 habitantes. A bacia engloba de forma integral ou parcial, 39 municípios no estado São Paulo, 57 no estado Rio de Janeiro e 88 no estado de Minas Gerais, contabilizando um total de 184 municípios (AGEVAP, 2012; INEA, 2014). O limite

da bacia juntamente com os limites de atuação de cada comitê da bacia do rio Paraíba do Sul se encontra na Figura 1.

Figura 1: Localização da região hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul. Fonte: Autoria Própria.



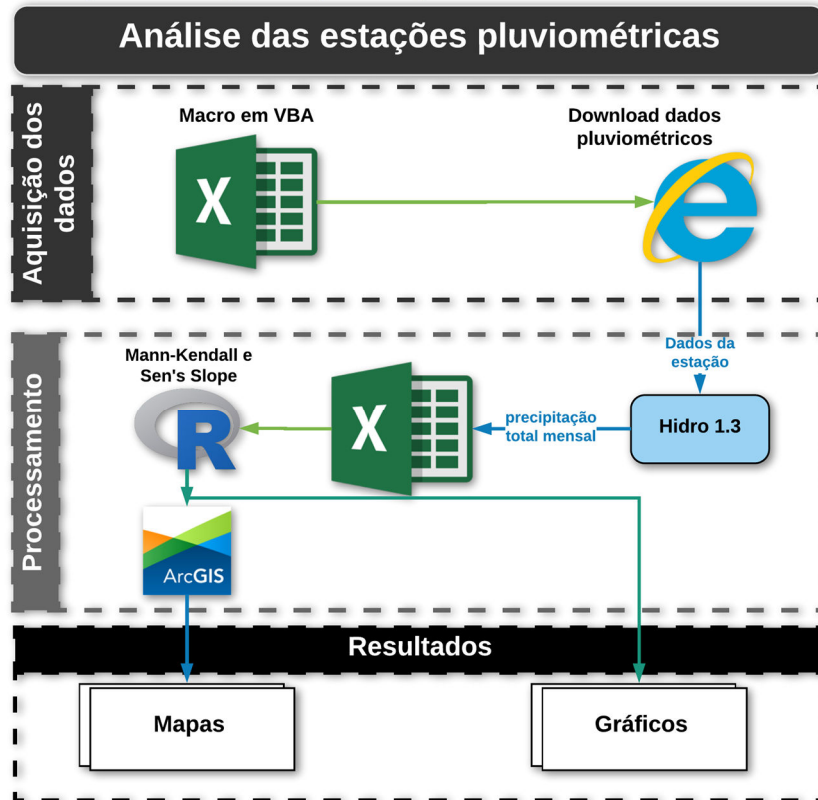
A região da bacia do rio do Paraíba do Sul possui uma grande concentração de indústrias, diversas pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e ainda conta com a transposição do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu, que possui grande importância para a região metropolitana do Rio de Janeiro devido a sua contribuição para geração de energia elétrica e para o abastecimento. (AGEVAP, 2012; INEA, 2014).

O clima predominante na bacia é o subtropical quente, com temperaturas médias anuais entre 18°C e 28°C. O período onde ocorrem os maiores volumes de chuvas é o verão, entre dezembro e janeiro, já o período de seca (baixo índice pluviométrico) ocorre entre os meses de maio a julho (AGEVAP, 2014).

De acordo com Andrade *et al.* (2015) o uso e cobertura do solo predominante é a classe pastagem, que corresponde cerca de 60% do total da bacia. Entretanto, eles observaram que apenas 12% da área corresponde a classe floresta, que mesmo sendo reduzida e estando localizadas basicamente em unidades de conservação e em locais de difícil acesso, as áreas de floresta ainda sofrem com atividades como desmatamentos e queimadas (AGEVAP, 2014).

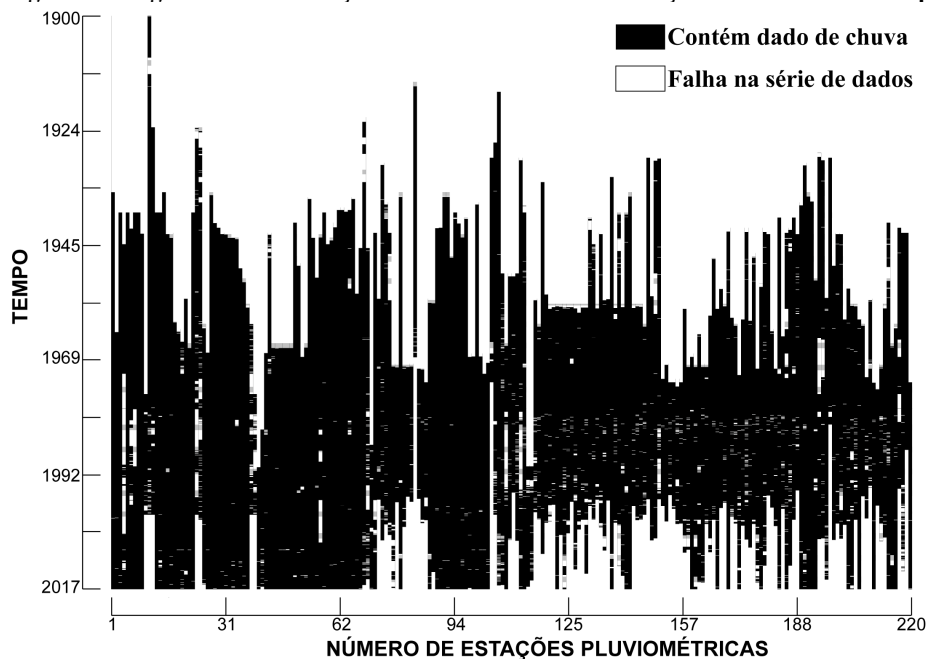
Na figura 2, se encontra o fluxograma das etapas de aquisição dos dados e processamento dos mesmos. Os dados pluviométricos foram obtidos pelo site Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Devido ao grande número de estações foi elaborado um código em VBA no *software* Excel para otimizar o processo de busca e download dos dados de chuva no Hidroweb. O código desenvolvido fazia uma varredura na lista de estações pluviométricas escritas em uma coluna do Excel, capturava o número da estação descrito na célula (i,j) e executava uma sequência de comandos que abria o internet explorer e fazia a busca e download do dado.

Figura 2: Fluxograma das etapas de aquisição e processamento de dados. Fonte: Autoria Própria.



Após a etapa de aquisição e preparação dos dados, foram obtidas 220 séries de chuva, as quais se encontram na figura 3. Nota-se nessa que grande parte dos dados de chuva estão compreendidos entre os anos de 1969 e 2000. Além disso, observa-se que quase todas as estações possuíam falhas nos dados (quadrados brancos, figura 3), mas no geral as estações tinham mais dados preenchidos (quadros pretos, figura 3) do que faltantes. Neste trabalho não foi realizado o preenchimento das falhas.

Figura 3: Diagrama da distribuição dos dados de chuva das estações. Fonte: Autoria Própria.



As análises de tendências estatísticas foram realizadas no ambiente r, conforme figura 2. Para avaliar se há tendência de aumento ou de diminuição da precipitação utilizou-se o teste de Mann-Kendall, que é um teste não paramétrico e que vem sendo muito utilizado em estudos hidrológicos com o objetivo de avaliar a significância das tendências de parâmetros como, precipitação, vazão e qualidade da água (MARENGO, *et al.* 2005; YUE *et al.*, 2002; SAGARIKA *et al.*, 2014).

Esse teste trabalha da seguinte forma: dado uma série temporal (X_i, X_{i+1}, \dots, X_n) resultante de uma amostra com “n” variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. É possível obter o coeficiente de Mann-kendall (S) através do somatório dos sinais da diferença entre os valores (X_i) e os seus futuros valores (X_j), conforme as Equações 1 e 2. Quando o valor de S é positivo indica que há tendência de aumento e quando o mesmo é negativo indica tendência de diminuição.

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

Onde

$$\text{sinal}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Nos casos em que $n \geq 10$ a variável S possui características de uma distribuição normal, onde sua variância ($\text{Var}(S)$) e o índice de distribuição normal (Z) podem ser calculados por meio das Equações 3 e 4

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-2)(2n+5) - \sum_{j=i+1}^n t_j(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O teste de Mann-Kendall é bi-caudal, com isso a hipótese H_0 (hipótese nula) deve ser rejeitada nos casos em que o valor absoluto de Z for superior a $Z_{\alpha/2}$, onde α é o nível de significância. Neste estudo foi considerado um valor de α de 0,05.

Além do teste não paramétrico de Mann-Kendall, foi utilizado o estimador Sen's Slope para avaliar a magnitude das tendências, em outras palavras, é possível estimar o quanto uma variável aumentou ou diminuiu por unidade de tempo, caso haja uma tendência linear na série de dados. Esse teste foi proposto por Sen (1968), segundo ele a inclinação de N pares de dados, pode ser obtida pela Equação 5.

$$Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (5)$$

Onde x_j é o valor de uma dada variável num passo de tempo a frente do valor x_i . Então, os N pares de Q_{ij} são ranqueados em ordem crescente e em seguida é realizado a mediana desses valores para se obter o estimador de Sen, conforme a Equação 6.

$$Q_{med} = \begin{cases} \frac{Q_{(N+1)}}{2} & \text{se } N \text{ for impar} \\ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_N}{2} + \frac{Q_{(N+2)}}{2} \right) & \text{se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (6)$$

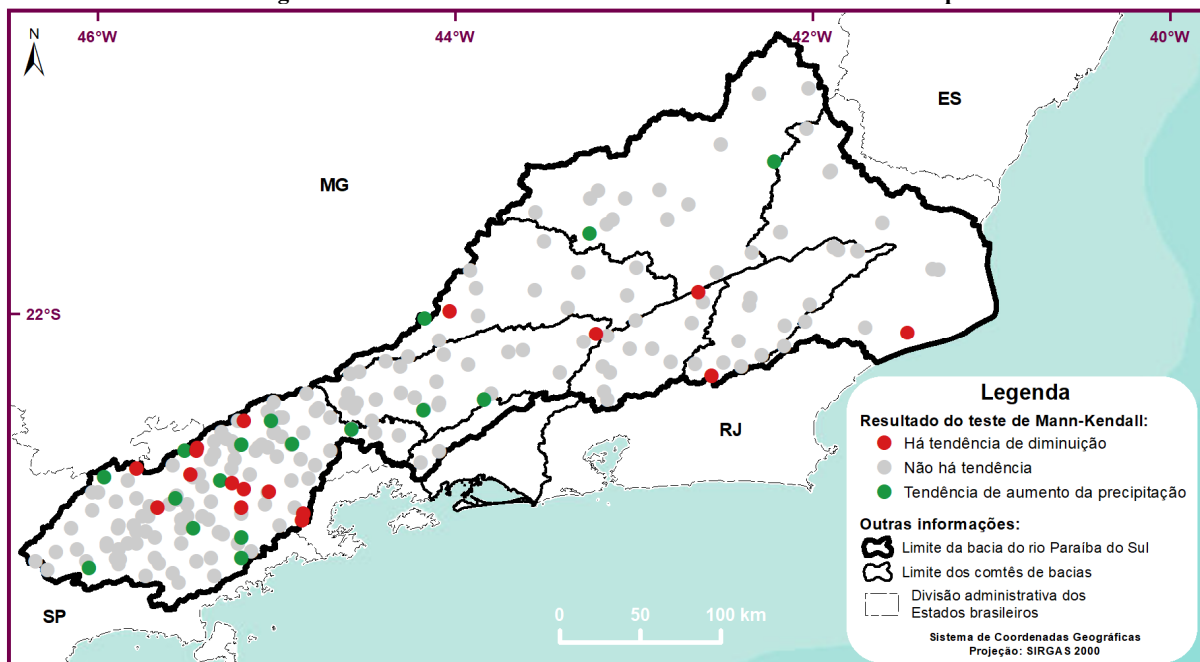
O sinal de Q_{med} indica se a tendência é positiva ou negativa, já o módulo indica a magnitude da inclinação. Para determinar se Q_{med} é significativo, ou seja, diferente de zero deve-se verificar o intervalo de confiança mesma. Neste trabalho, os resultados foram considerados significativos quando o valor p foi menor do que 0,05.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do teste estatístico de Mann-Kendall se encontra na figura 4, onde os círculos em vermelho representam tendência de diminuição da chuva, os círculos cinzas significam que não foi detectado tendência (tau do teste foi igual a zero) e os círculos na cor verde são aquelas em que o teste estatístico indicaram aumento da precipitação total mensal. No geral, das 220 estações estudadas, apenas 34 estações apresentaram tendências significativas, dessas, metade apresentaram aumento da precipitação e a outra parte diminuição dos índices pluviométricos.

Verificou-se que a região do comitê do rio Paraíba do Sul (parcela da bacia no estado de São Paulo) apresentou o maior número de estações com tendências significativas. Além disso, é a região com a maior densidade de estações pluviométricas na bacia do rio Paraíba do Sul.

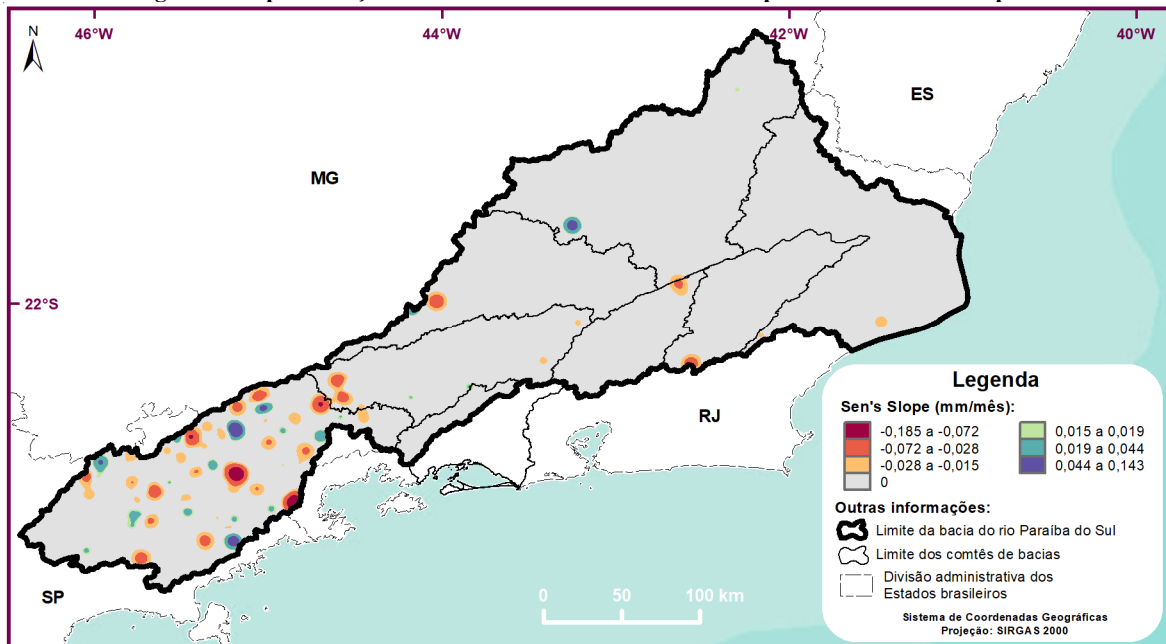
Figura 4: Resultado do teste de Mann-Kendall. Fonte: Autoria Própria.



O resultado da interpolação do teste de Sen's Slope se encontra na figura 5, onde as cores quentes indicam diminuição da precipitação, as cores frias descrevem o aumento da precipitação e a cor cinza simboliza as regiões em que não foi observado tendência significativa.

Na região próxima ao reservatório de Funil (proximidades da divisa do limite do comitê do rio Paraíba do Sul com o comitê médio Paraíba do Sul) a precipitação diminui cerca de 0,072 a 0,028 mm/mês, ou seja foi observado uma diminuição de 72 mL/m².mês. Nota-se também, na área do comitê do rio Paraíba do Sul, muitas regiões que indicam diminuição da precipitação total mensal. E em algumas dessas a queda do índice de chuva foi de 0,185 mm/mês a 0,072 mm/mês.

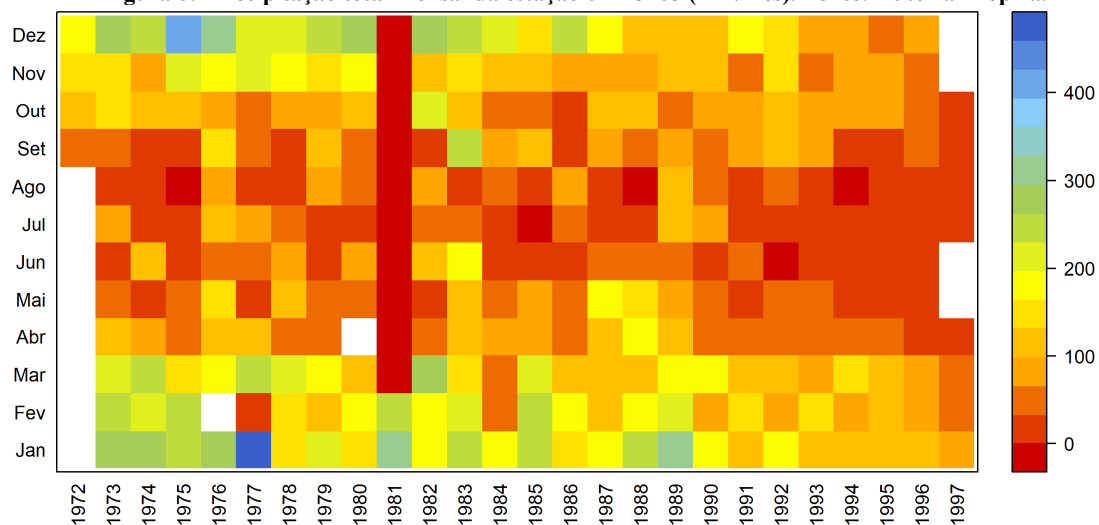
Figura 5: Espacialização do resultado do estimador Sen's Slope. Fonte: Autoria Própria.



As duas estações pluviométricas em que se observaram grande diminuição da precipitação total mensal foram as de Fazendinha (cód.02245165), que fica no município de Guaratinguetá-SP a 960m de altitude e sob as coordenadas 22°59'00" S de latitude e 45°11'00" W de longitude, e a estação de Alto S. do Mar B. Mato Limpo (cód.02344009) da cidade de Cunha-SP, a 1.050m de altitude e sob as coordenadas 23°09'13" S de latitude e 44°51'32" W de longitude. Foi detectado na estação de Fazendinha uma diminuição de cerca de 0,22 mm/mês da precipitação local, já em Alto S. do Mar B. Mato Limpo o estimador de Sen apontou uma diminuição de 0,18 mm/mês. Na figura 6 e 7 se encontram os resultados dos diagramas das chuvas dessas estações, onde as cores frias (próximo do azul) indicam meses com alto índice pluviométricos (cheia) e as cores quentes (próximo do vermelho) indicam meses com baixos índices pluviométricos (seca).

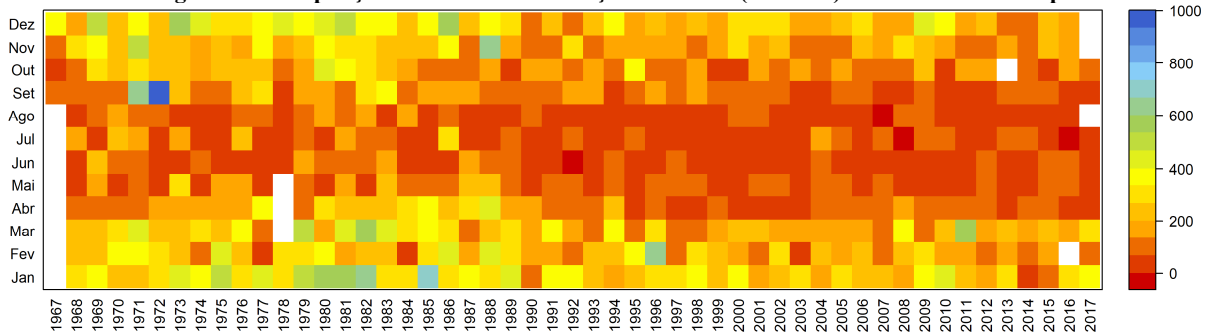
Observa-se na figura 6 (estação de Fazendinha) que a partir do ano de 1990 os índices pluviométricos possuem uma queda, ficando os meses a partir desse ano, abaixo de 150 mm/mês (cores do laranja para o vermelho). Além disso, a diminuição da chuva foi intensificada nos meses de inverno (maio a setembro), onde ocorre o período de seca, o que é um fator agravante para essa região.

Figura 6: Precipitação total mensal da estação 02245165 (mm/mês). Fonte: Autoria Própria.



Na estação de Alto S. do Mar B. Mato Limpo – SP, o comportamento da chuva sofre uma alteração também a partir do ano de 1990, conforme figura 7. Desde então os índices pluviométricos diminuíram e se intensificaram no período de seca.

Figura 7: Precipitação total mensal da estação 02344009 (mm/mês). Fonte: Autoria Própria.



Duas estações destacam-se pelo aumento dos índices pluviométricos. A primeira foi a de Colônia do Piauí (cód.02245021) em Guaratinguetá-SP, onde identificou-se um aumento de 0,18 mm/mês. A segunda estação foi a de Briet (cód.02345175) em São Luís do Paraitinga-SP, na qual o aumento foi de 0,12 mm/mês. O diagrama da variação da precipitação total mensal dessas duas estações se encontra nas figuras 8 e 9, respectivamente.

A precipitação total mensal observada na estação de Colônia do Piauí (figura 8) transitou de verões “secos” (chuvas entre 100 e 400 mm/mês) para verões com índices pluviométricos mais elevados “cheias” (chuvas entre 200 a 1.000 mm/mês), entre os anos de 1987 e 1986.

Figura 8: Precipitação total mensal da estação 02245021 (mm/mês). Fonte: Autoria Própria.

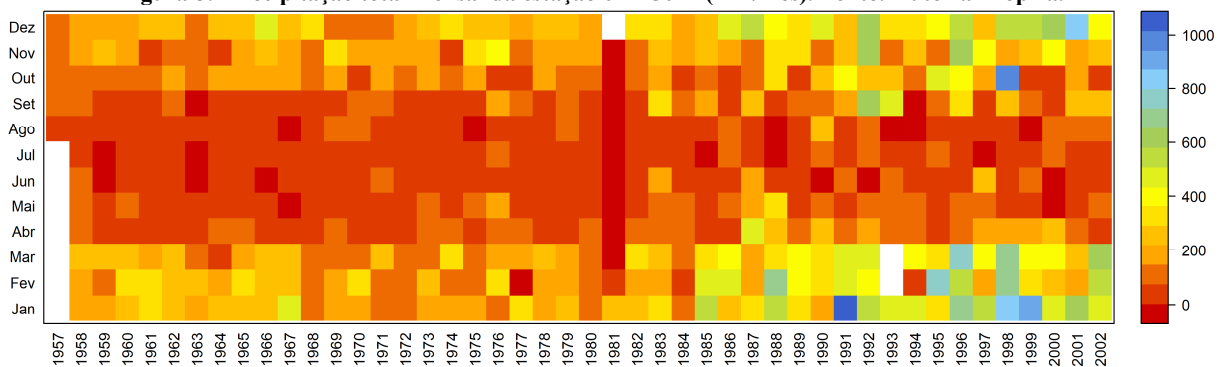
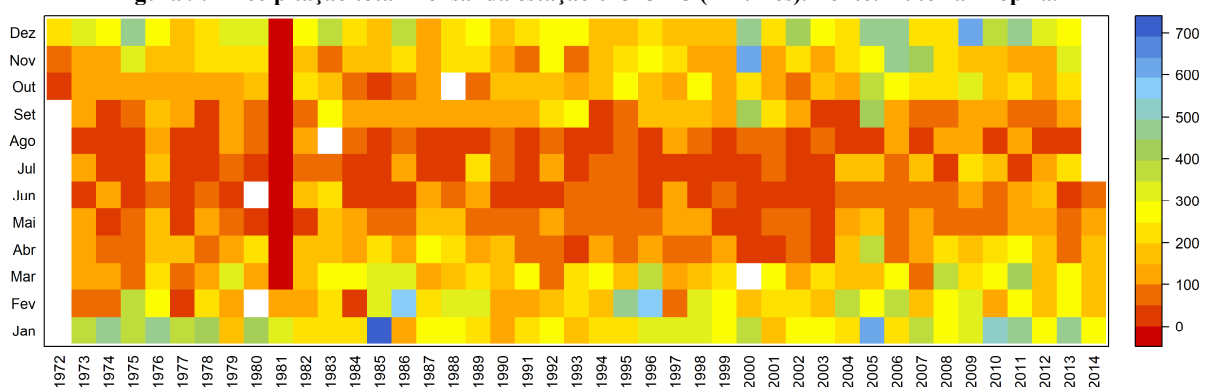


Figura 9: Precipitação total mensal da estação 02345175 (mm/mês). Fonte: Autoria Própria.



CONCLUSÕES

Os resultados da análise de tendência e de magnitude da variável precipitação, ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, foram significativos em 34 das 220 estações estudadas. Dessas destacaram-se, devido à queda da precipitação, as estações de Fazendinha e do Alto S. do Mar B. Mato Limpo ambas no estado de São

Paulo. Nessas os índices pluviométricos se mantiveram baixos a partir de 1990, em especial nos meses de inverno, onde não há tanta ocorrência de chuvas.

Entre as estações pluviométricas em que foi notado o aumento da chuva, destacou-se a estação de Colônia do Piagui (cód.02245021) em Guaratinguetá-SP, onde a precipitação aumentou cerca de 0,18 mm/mês, ou seja, cerca de 180 mL/m².mês.

Mesmo que o número de estações com tendência de aumento sendo igual que o de estações com tendência de diminuição da precipitação, foi possível, por meio da espacialização da variação em mm/mês da chuva (obtidos pelo estimador de Sen), concluir que no geral o módulo da diminuição da precipitação é maior do que a de aumento. Ainda nesse contexto, a região do comitê do rio Paraíba do Sul foi aquela com a maior ocorrência de áreas com diminuição da precipitação. Além dessa, destacou-se a região sobre o reservatório de Funil em que a precipitação diminui na ordem de 0,072 a 0,028 mm/mês.

Por fim, os resultados alcançados neste trabalho podem servir de auxílio a gestores de recursos hídricos que atuam na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Graduação da Universidade Federal de Juiz de Fora (PROGRAD/UFJF).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. P., MELO RIBEIRO, C. B., SOUZA LIMA, R. N. Modelagem dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir de imagens MODIS e um modelo de sub-regiões. *Revista brasileira de cartografia*, v.68, n.5, p. 965-978, abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). Relatório de situação trienal bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (2010/2011/2012). 2012. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/conteudo/relsituacao20102012.pdf>>. Acesso em: 10 de março de 2018.

CHATTERJEE, S., KHAN, A., AKBARI, H., & WANG, Y. SOUMENDU et al. Monotonic trends in spatio-temporal distribution and concentration of monsoon precipitation (1901–2002), West Bengal, India. *Atmospheric Research*, v. 182, p. 54-75, jul. 2016.

CHEN, Z., CAI, J., GAO, B., XU, B., DAI, S., HE, B., XIE, X. Detecting the causality influence of individual meteorological factors on local PM 2.5 concentration in the Jing-Jin-Ji region. *Scientific Reports*, v. 7, p. 40735, jan. 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). NOTA TÉCNICA DIGAT/INEA nº 01-A/2014. Disponível em: <<http://inea.rj.gov.br>>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2018.

MARENGO, J. A., ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 215-226, jan. 2005.

MARENGO, J. A., NOBRE, C. A., SELUCHI, M. E., CUARTAS, A., ALVES, L. M., MENDIONDO, E. M., OBREGÓN, G., SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, n. 106, p. 31-44, sep. 2015.

NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., SELUCHI, M. E., CUARTAS, L. A., & ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, n. 02, p. 252, feb. 2016.

SAGARIKA, S., KALRA, A., AHMAD, S. Evaluating the effect of persistence on long-term trends and analyzing step changes in streamflows of the continental United States. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 36-53, sep. 2014.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, p.1379-1389, dec. 1968.

YUE, S., WANG, C. Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, v. 38, n. 6, jun. 2002.



ZHAO, N., YUE, T., LI, H., ZHANG, L., YIN, X., LIU, Y. Spatio-temporal changes in precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Atmospheric Research, v. 202, p. 156-168, dec. 2018.