

## DEFINIÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS NO TOCANTE ÀS TENDÊNCIAS EM SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA MÁXIMA: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

*Aline de Araújo Nunes*<sup>1\*</sup>; *Eber José de Andrade Pinto*<sup>2</sup>; *Márcio Benedito Baptista*<sup>3</sup>

**Resumo** – Eventos climáticos extremos têm emergido como uma das principais manifestações de mudança climática, apresentando grandes variações espaciais e temporais. A aplicação de ajustes propostos para remover as não-homogeneidades pode ser apropriada para estudos regionais, mas constitui um problema para comparar estações individuais. Nesse contexto, a presente pesquisa pretende identificar e quantificar tendências nas precipitações diárias máximas anuais na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), buscando utilizar a espacialização das eventuais tendências observadas para a definição de regiões homogêneas. Na primeira etapa do trabalho foi realizada a espacialização das tendências associadas às séries temporais, por meio da variação linear do parâmetro de posição da distribuição GEV, e assim definidas as regiões homogêneas. Posteriormente foi verificado o ajuste de três modelos não-estacionários ao conjunto de dados de cada região. Considerando os resultados obtidos, observou-se que não há uma homogeneidade associada aos dados analisados. As séries foram divididas em duas sub-regiões, sendo que a parte sudeste manteve o modelo com tendência linear, e as demais estações apresentaram um melhor ajuste ao modelo com tendência linear a partir de 1997. Os resultados são indicativos de que o pressuposto de estacionariedade de séries de extremos de precipitação não é verificado em toda a RMBH.

**Palavras-Chave** – Não estacionariedade, mudanças climáticas, heterogeneidade pluviométrica.

## DEFINITION OF HOMOGENEOUS REGIONS REGARDING TO TRENDS IN SERIES OF MAXIMUM DAILY PRECIPITATION: CASE STUDY IN THE METROPOLITAN REGION OF BELO HORIZONTE

**Abstract** – Extreme climatic events have emerged as one of the main consequences of climate change, presenting large spatial and temporal variations. The application of some adjustments to remove non-homogeneities may be appropriate for regional studies, but it is a problem to compare individual stations. In this context, the research intends to identify and quantify trends in annual maximum daily precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), seeking to use the spatialisation of possible trends observed to define homogeneous regions. In the first stage of the work, it was performed the spatialization of the trends associated with time series, by the linear variation of the position parameter of GEV distribution, thus defining the homogeneous regions. Subsequently, the adjustment of three non-stationary models to the dataset of each region was verified. Considering the results obtained, it was observed that there is no homogeneity associated with the analyzed data. The series were divided into two subregions, with the southwestern part maintaining the model with a linear trend, and the other stations presented a better fit to the model with a linear trend from 1997. The results are indicative that the assumption of stationarity of extreme precipitations is not verified throughout the RMBH.

**Keywords** – Non-stationarity, climate changes, rainfall heterogeneity.

<sup>1\*</sup>Eng<sup>a</sup> Agrícola e Ambiental, Mestre em Engenharia Agrícola, Prof. Msc. PUC Minas - Depto. Engenharia Civil, CEP 30640-070 Belo Horizonte-MG. Correio eletrônico: alinedearajoununes@gmail.com

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Civil, Prof. Dr. UFMG - Depto. Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, CEP 31270-901 Belo Horizonte-MG. Correio eletrônico: eber@ehr.ufmg.br

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Civil, Prof. Dr. UFMG - Depto. Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, CEP 31270-901 Belo Horizonte-MG. Correio eletrônico: marcio.baptista@ehr.ufmg.br

## INTRODUÇÃO

O aumento da frequência de precipitações extremas, assim como alterações diversas no ciclo hidrológico são esperados no século 21, como resultado do aumento da temperatura média global (IPCC, 2007). Tais alterações podem gerar grande impacto sobre o ambiente e infraestrutura do meio urbano, especialmente no que se refere a chuvas de alta intensidade, uma vez que existem limitações nos sistemas de drenagem urbana existentes (Olsson *et al.*, 2009).

Muitos estudos ilustram a variabilidade espacial das tendências de extremos de precipitação nas últimas décadas. Haylock e Goddard (2004) relataram um aumento na ocorrência de dias de chuvas intensas (definido como o número de dias com total precipitado acima do percentil 90) no norte da Europa durante o inverno, e uma diminuição no sul da Europa. Schmidli e Frei (2005) estudaram 12 índices de precipitações extremas para caracterizar registros de chuva na Suíça e encontram tendências igualmente variáveis. Em particular, o número de dias de chuvas intensas no inverno diminuiu no nordeste da Suíça e aumentou na região Sudeste.

Toreti *et al.* (2010), em estudo realizado para a região costeira do Mediterrâneo, identificaram tendências variáveis na ocorrência de eventos extremos, com uma tendência negativa significativa encontrada em 6 dos 20 locais estudados. Ainda na região do Mediterrâneo, Alpert *et al.* (2002) mostraram que a precipitação diária extrema da Espanha para Israel aumentou no período de 1951 a 1990, apesar da precipitação total ter diminuído.

No Brasil, Minuzzi e Caramori (2011) analisaram o comportamento sazonal e anual da chuva e de veranicos em 21 estações hidrológicas localizadas no estado do Paraná. O teste de Regressão Linear e o teste de Kendall mostraram que, nas últimas décadas, a quantidade de chuva anual tem aumentado, principalmente na primavera, entre 16 e 42 mm/década, na metade leste do Paraná. A mesma tendência foi observada na intensidade dos eventos extremos diários de chuva. O número de tendências significativas (predominantemente negativas) é menor para os veranicos, com duração de 5 a 10 dias, com quantidade acumulada inferior a 10 mm, porém, mais perceptível na primavera e na escala anual.

Em estudo feito para a região metropolitana de Belo Horizonte, Alexandre *et al.* (2010) encontraram uma possível tendência de aumento de precipitação no período mais seco do ano (abril-setembro), em contraposição a uma tendência de diminuição de chuvas no período mais chuvoso (outubro-março), apesar de, tanto o regime anual quanto os totais mensais máximos da região, não apresentarem evidências de mudanças em suas séries.

As variações espaciais e temporais são muitas e não podem ser ignoradas. A aplicação de alguns ajustes propostos para remover as não-homogeneidades pode ser apropriada para estudos regionais, mas é um problema para comparar estações individuais. Estes ajustes não diminuem a heterogeneidade dos dados em um local individual e podem ainda introduzir incertezas adicionais (Pielke *et al.*, 2002). À luz dessas considerações, a presente pesquisa pretende contribuir para a avaliação das mudanças no regime de chuvas da Região Metropolitana de Belo Horizonte, buscando identificar e quantificar, especificamente, tendências nas precipitações máximas anuais, uma vez que há uma crescente preocupação com um potencial aumento da ocorrência destes eventos na região. Objetiva-se, ainda, verificar a espacialização das eventuais tendências observadas, como parâmetro para definição de regiões homogêneas, uma vez que Nunes *et al.* (2015) observaram que as tendências associadas aos índices de precipitação recomendados pelo Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices – ETCCDMI na região não são regionais.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

A área de estudo é a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sendo sua escolha fundamentada no fato de que grande parte desta região está sendo afetada, direta ou indiretamente, pelas consequências relacionadas a eventos extremos de chuva e, também, pela ausência de estudos relacionados à tendência de ocorrência de eventos extremos de precipitação, principalmente no que se refere a eventos diários, na região.

A RMBH, drenada pelos rios das Velhas e Paraopeba, afluentes do rio São Francisco, está localizada entre as latitudes 19°00' e 20°30' sul e longitudes 43°15' e 44°45' oeste, na região central do Estado de Minas Gerais. De acordo com o censo demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a RMBH constitui a terceira maior aglomeração urbana do Brasil, abrangendo uma área de 9.468 km<sup>2</sup>, sendo formada por 34 municípios, com uma população estimada em 5,8 milhões de habitantes para o ano de 2014, dos quais 2,5 milhões vivem na capital, Belo Horizonte.

### Aquisição e análise preliminar dos dados de precipitação diária da RMBH

Os dados de precipitação diária da RMBH foram selecionados com o auxílio das bases georreferenciadas da Agência Nacional de Águas (ANA) e das séries hidrológicas disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas da ANA - Hidroweb. Os critérios que nortearam essa seleção dos registros de precipitação total diária para a RMBH foram: séries com, pelo menos, 30 anos de registros e a uniformidade na distribuição espacial das estações pluviométricas na região.

Foram selecionadas trinta e oito estações pluviométricas (Figura 1), com período de dados entre 1983 e 2015. Considerando, ainda, a importância de se caracterizar os índices pluviométricos da região, a Figura 2 apresenta a distribuição do total anual de precipitação na área de estudo, sendo possível observar que a distribuição da precipitação ao longo da área é bastante heterogênea, com totais anuais variando de 1170 mm a 1947 mm. Nota-se, também, que a região sudeste apresenta um maior acúmulo de estações com índices pluviométricos anuais elevados (estações inseridas no polígono elipsoidal da Figura 2).

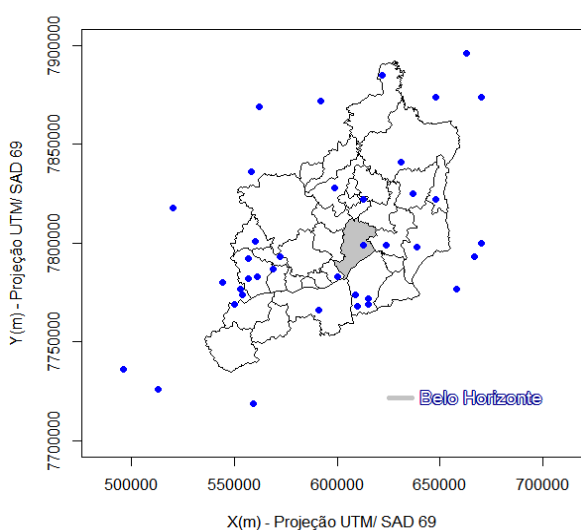


Figura 1 - Localização das estações pluviométricas selecionadas na RMBH.

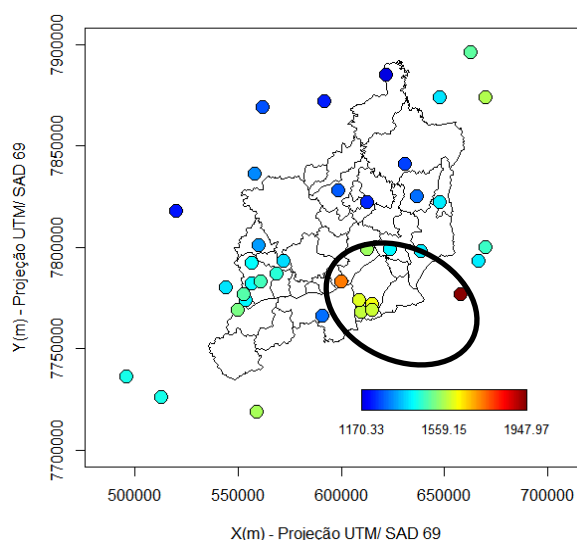


Figura 2 – Distribuição da precipitação total anual na RMBH.

## Definição de regiões homogêneas e análise de tendências nas séries de precipitação diária máxima anual

Uma vez coletadas as informações necessárias, a definição de regiões homogêneas foi realizada por meio de uma identificação preliminar das tendências nas séries de precipitação diária máxima anual, a partir da análise estatística dos dados. Primeiramente, para modelar a distribuição estatística dos dados, utilizou-se a distribuição GEV, em sintonia com a Teoria dos Valores Extremos (Coles 2001). No caso estacionário, a função de distribuição cumulativa dos dados é dada por (Coles, 2001; Katz et al., 2002):

$$(x; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left( 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right\} & \text{se } \xi \neq 0, \text{ considerando } 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} > 0, \\ \exp \left\{ - \exp \left( - \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\xi$  são os parâmetros de posição, escala e forma, respectivamente, e  $x$  a precipitação diária máxima anual.

No caso não-estacionário, os parâmetros da distribuição GEV variam com o tempo (anos). O parâmetro de posição é assumido como sendo uma função  $\mu(t)$ , enquanto os parâmetros de escala e forma são constantes. Em primeiro lugar, considerou-se uma tendência linear (eg [Katz *et al.*, 2002], [Blanchet *et al.*, 2016]) para  $\mu(t)$ , buscando verificar se a região apresenta uma tendência homogênea que justifique o ajuste de um único modelo para a área. O modelo não-estacionário com tendência linear pode ser representado pela equação:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (2)$$

Assim, para cada série verificou-se se o modelo não-estacionário (tendência linear) deveria de fato ser preferido ao modelo estacionário. Para tanto, utilizaram-se os critérios Akaike e Bayesian Information (respectivamente AIC, [Akaike, 1974] e BIC, [Schwarz, 1978]).

Considerando a distribuição espacial das eventuais tendências lineares observadas nas séries de precipitação diária máxima anual, e ainda a possibilidade de que essa distribuição não seja homogênea ao longo de toda a região, optou-se por utilizar essa espacialização para a definição de possíveis regiões com comportamentos homogêneos. Uma vez definidas essas regiões, ou até mesmo considerando a possibilidade de que o conjunto de estações formassem uma única região homogênea, foram, então, testados três modelos não estacionários para  $\mu(t)$ : a mesma tendência linear (equação 2); uma tendência linear a partir do ano  $t_0$  (Blanchet *et al.*, 2016), apresentada na equação 3; e uma tendência linear antes do ano  $t_0$  (Blanchet *et al.*, 2016), apresentada na equação 4.

Tendência linear a partir do ano  $t_0$ :

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0, & t \leq t_0 \\ \mu_0 + \mu_1(t - t_0), & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

Tendência linear antes do ano  $t_0$ :

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0 + \mu_1(t - t_0), & t \leq t_0 \\ \mu_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4)$$

Considerando que as séries consistem no período de 1983 a 2015, e que as décadas de 80 e 90 representam um período de forte expansão urbana para a RMBH, serão considerados entre 1983 e 2002 possíveis anos de mudança ( $t_0$ ). Todos os modelos foram ajustados pela máxima verossimilhança (Coles, 2001).

Em primeiro lugar, foi selecionado qual dos modelos não-estacionários se ajusta melhor aos dados em escala regional (estações que compõem a região homogênea), sendo a primeira evidência obtida comparando-se a verossimilhança média dos diferentes modelos dentro das regiões (o valor médio da verossimilhança considerando o conjunto de estações de cada região homogênea). Uma vez selecionado o modelo não-estacionário com melhor ajuste para a região (menor média dos valores de verossimilhança), foram utilizados os critérios Akaike e Bayesian Information para verificar se o modelo não-estacionário selecionado, para cada série, deveria de fato ser preferido ao modelo estacionário.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a verificação inicial do ajuste das estações ao modelo não-estacionário com tendência linear, a fim de que a distribuição espacial desse ajuste fosse utilizada como critério para definição de regiões homogêneas, as Figuras 3 e 4 apresentam as séries com tendência linear significativa no parâmetro de posição da distribuição GEV (triângulos coloridos), assim como a magnitude dessas tendências. As magnitudes das tendências são relativas às médias dos máximos anuais de precipitação de cada estação (os pontos brancos são para "nenhuma tendência", ou seja, melhor ajuste com modelos estacionários).

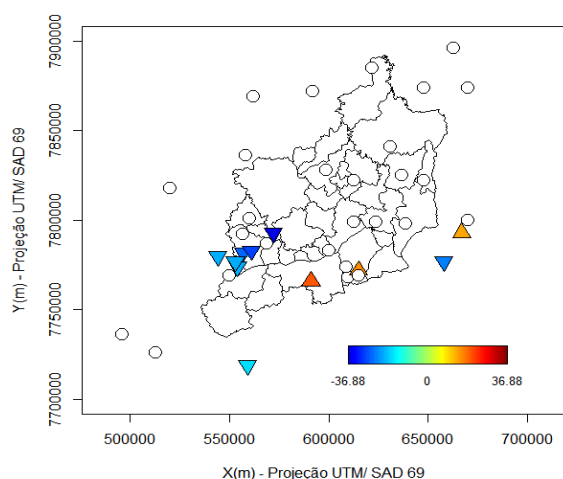


Figura 3 – Tendência linear na precipitação máxima anual (% de incremento na magnitude), considerando o AIC.

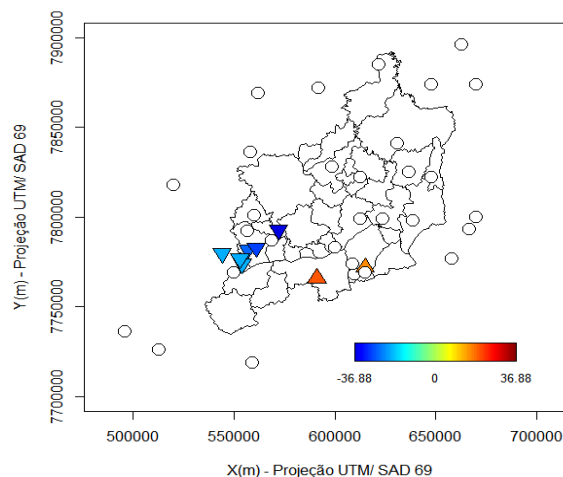


Figura 4 – Tendência linear na precipitação máxima anual (% de incremento na magnitude), considerando o BIC.

Considerando os resultados da aplicação dos critérios de AIC e BIC, apresentados nas Figuras 3 e 4, observa-se que as disposições espaciais das séries com tendências lineares são bastante semelhantes. A região sudeste apresenta as maiores tendências positivas, com aumentos nos últimos 33 anos atingindo até 37% da média dos máximos anuais de precipitação. O oposto acontece na região sudoeste, na qual são identificadas tendências com diminuições na mesma proporção.

Dessa forma, é possível inferir que existem tendências diferentes na RMBH, apontando ainda uma espacialização semelhante à distribuição da precipitação total anual na região (Figura 2). Assim, para que se possa pensar no planejamento e gestão dos recursos hídricos na região, sob a hipótese de não-estacionariedade, foi analisada a divisão da área em duas sub-regiões com comportamentos mais homogêneos. A Região 1 foi definida com as estações localizadas na parte sudeste da bacia, e a Região 2 foi ajustada com as demais estações.

Após a definição das regiões homogêneas, foi selecionado qual dos modelos não-estacionários se ajusta melhor aos dados de cada região, sendo a primeira evidência obtida a partir da menor média do log dos valores de verossimilhança dos diferentes modelos. A Figura 5 representa a média regional

do log dos valores de verossimilhança dos modelos não-estacionários, em função do ano de mudança (considerando que o modelo linear não tem ano de mudança, o mesmo é representado com a linha horizontal) para cada região. Dessa forma, a linha preta representa a tendência linear contínua, a linha vermelha a tendência linear a partir de um certo ano ( $t_0$ ) e a linha verde a tendência linear antes de determinado ano ( $t_0$ ). Cada ano de mudança apresenta uma média de 12 valores de verossimilhança associados aos dados de precipitação da Região 1 (Fig. 5a) e 26 valores de verossimilhança associados às estações da Região 2 (Fig. 5b).

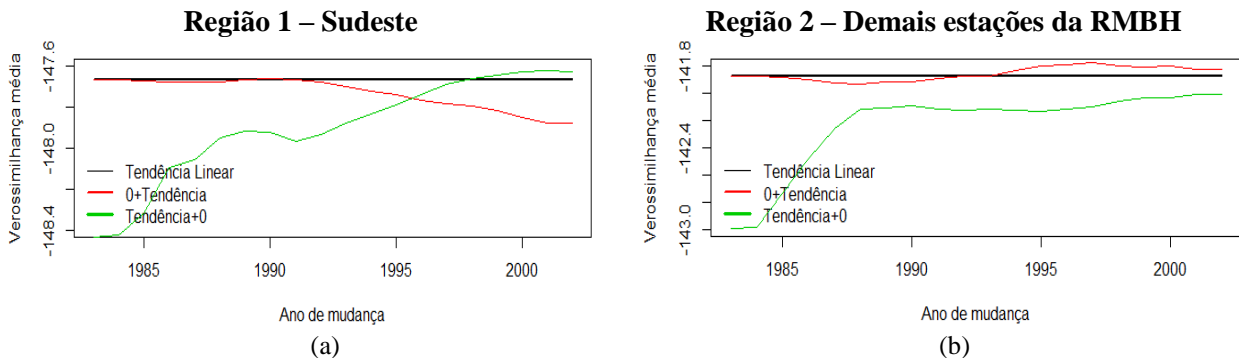


Figura 5 – Média do Log dos valores de verossimilhança para os três modelos não-estacionários em relação ao ano de mudança para a Região 1 (a) e Região 2 (b).

Considerando a Figura 5a, observa-se que os modelos não-estacionários se cruzam em vários pontos ao longo dos anos de mudança, sendo, então, de difícil definição o modelo mais apropriado para essa região. Nesse contexto, optou-se por definir o modelo linear para a Região 1. Por outro lado, para a Região 2, os modelos com tendência linear contínua (linha preta) e com tendência linear a partir de um certo ano ( $t_0$ ) (linha vermelha) apresentaram melhor ajuste às estações em todos os anos de mudança considerados, se comparados com o modelo com tendência linear antes de determinado ano ( $t_0$ ) (linha verde). Dessa forma, para a Região 2, considerando que nos anos de mudança da década de 90 o modelo não-estacionário com tendência linear a partir de  $t_0$  apresentou melhor ajuste, foi definido o modelo com tendência a partir do ano de 1997.

As Figuras 6 e 7 apresentam o mapeamento das séries com tendência significativa para as Regiões 1 (tendência linear) e 2 (tendência linear a partir de 1997), respectivamente. Foram considerados os critérios AIC e BIC (os pontos brancos são para "nenhuma tendência").

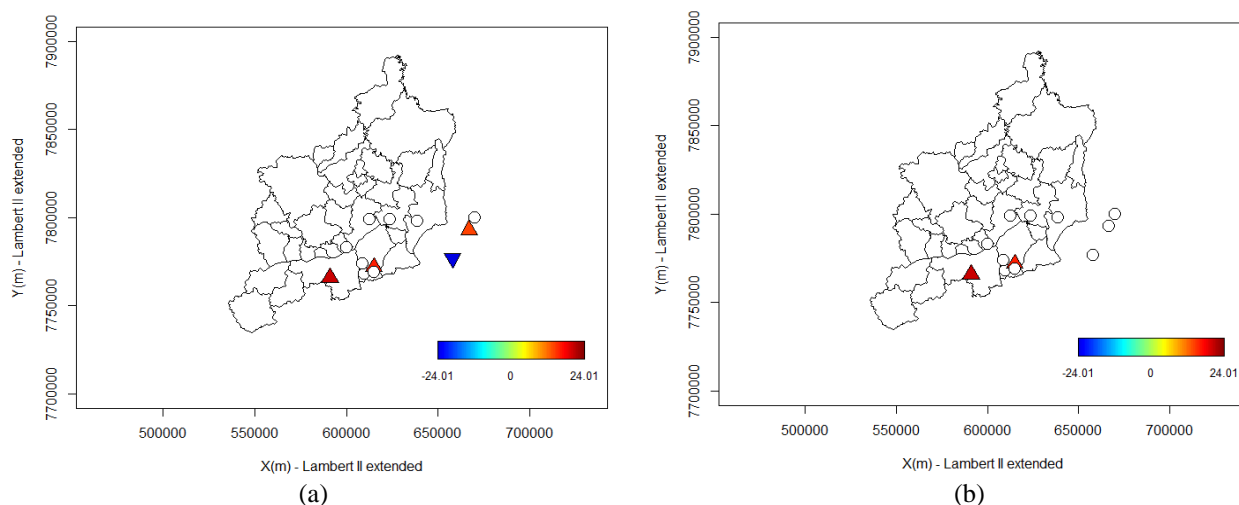


Figura 6 – Tendência linear na precipitação máxima anual (% de incremento na magnitude), considerando os critérios AIC (a) e BIC (b), para a Região 1.

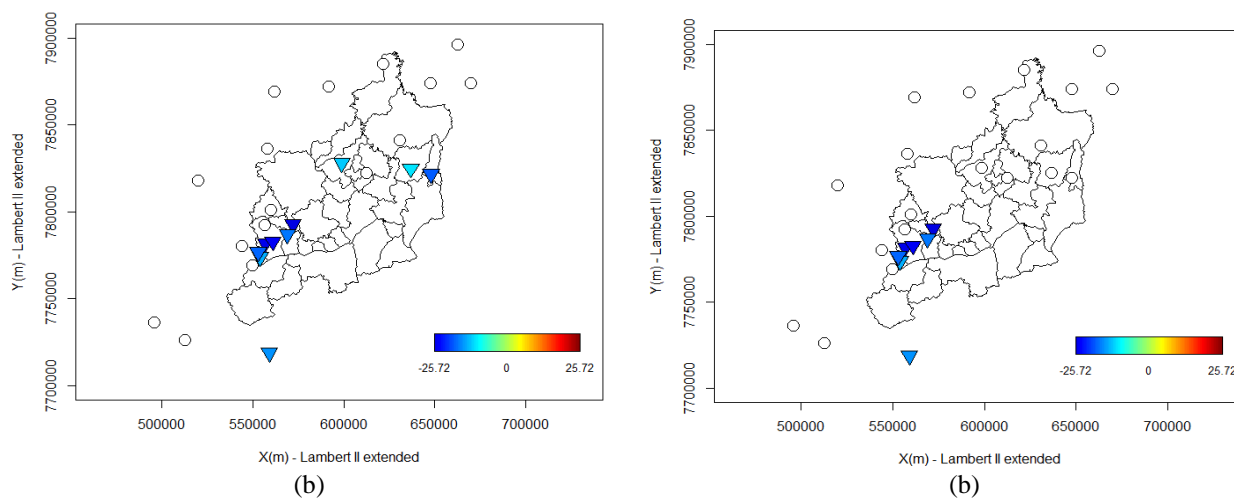


Figura 7 – Tendência linear a partir de 1997 na precipitação máxima anual (% de incremento na magnitude), considerando os critérios AIC (a) e BIC (b), para a Região 2.

Observa-se que as estações que apresentam tendência nas 2 regiões são muito semelhantes às que apresentaram tendência ao considerar o modelo linear para toda a região. No entanto, é importante salientar as principais observações: a Região 1 manteve o modelo não-estacionário com tendência linear, o que torna o mapeamento das tendências idêntico; a Região 2, que apresentou um melhor ajuste ao modelo não-estacionário com tendência linear a partir de 1997, passou a identificar 10 estações com tendência para o critério AIC, enquanto antes apresentava um total de 7 estações (modelo linear). Tal fato aponta que a Região 2 apresenta um comportamento diferente se comparada à Região 1, ou seja, a RMBH parece não ter um mesmo padrão quanto à análise temporal das precipitações máximas anuais. Vale ressaltar que, para a Região 2, a porcentagem de diminuição das precipitações máximas anuais é menor (até 25%), se comparada ao modelo linear (até 37%), uma vez que a tendência teve início apenas no ano de 1997.

## CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, observou-se que não há uma homogeneidade associada aos dados analisados para a região. O ajuste do modelo não-estacionário linear às séries de precipitação máxima anual permitiu a verificação de uma maior ocorrência de eventos extremos nas regiões sudoeste e sudeste, sendo ainda observadas tendências de aumento das chuvas diárias máximas em três estações da região sudeste (até 36%), e tendências de diminuição em sete estações da região sudoeste.

As séries foram divididas em duas sub-regiões com comportamentos mais homogêneos. A Região 1 foi definida com as estações localizadas na parte sudeste da bacia, e a Região 2 foi ajustada com as demais estações. Considerando a análise do ajuste de três modelos não-estacionários ao conjunto de estações que representava cada região, a Região 1 manteve o modelo não-estacionário com tendência linear, o que tornou o mapeamento das tendências idêntico, e a Região 2, que apresentou um melhor ajuste ao modelo não-estacionário com tendência linear a partir de 1997, passou a identificar 10 estações com tendência para o critério AIC.

Os resultados são indicativos de que o pressuposto de estacionariedade das séries de máximos diários de precipitação não é verificado em toda a RMBH, sinalizando para o fato de que algumas localidades poderão sofrer com o aumento das chuvas extremas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e ao FIP/ PUC MINAS pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *Automatic Control*, IEEE Transactions on, v. 19(6), p. 716–723.
- ALEXANDRE, G.R.; BAPTISTA, M.B.; NAGHETTINI, M.C. (2010). Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15(2), p. 115-126.
- ALBERT P.; BEN-GAI T. BAHARAD Y.; BENJAMINI D.; YEKUTIELI M.; COLACINO L.; DIODATO C.; RAMIS C.; HOMAR V.; ROMERO R.; MICHAELIDES S.; MANES A. (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n.11, p. 31-1 – 34-4.
- BLANCHET, J., MOLINIÉ, G., TOUATI, J. (2016). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-016-3122-7.
- COLES, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. *Springer Series in Statistics*. Springer-Verlag, London.
- HAYLOCK, M.; GODDESS C. (2004). Interannual variability of European extreme winter rainfall and links with mean large-scale circulation. *Int. J. Clin. Climatol*, v.24, p.759–776.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change. (2007). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. v.1: The physical science basis; v.II: Impacts, adaptation and vulnerability; v.III: Mitigation of climate change.
- KATZ, R. W., PARLANGE, M. B., NAVEAU, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, v. 25(8-12), p. 1287–1304.
- MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. (2011). Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 58, n.5, p. 593-602, set/out.
- NUNES, A.A.; PINTO, E.J.A.; BAPTISTA, M.B. (2015). *Identification of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods*. Conferência Eaumege: Water, Megacities and Global Change. Paris, 2015.
- OLSSON, J.; BERGGREN, K.; OLOFSSON, M.; VIKLANDER, M. (2009). Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: a case study in Kalmar City, Sweden. *Atm Res.*, v. 92, p. 364–375.
- PIELKE SR, R.A.; STOHLGREN, T.; SCHELL, L.; PARTON, W.; DOESKEN, N.; REDMOND, K.; MONEY, J.; MCKEE, T.; KITTEL TGF. (2002). Problems in evaluating regional and local trends in temperature: an example from eastern Colorado, USA. *International Journal of Climatology*, v. 22, p. 421–434.
- SCHWARZ, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, v. 6(2), p.461–464.
- SCHMIDLI, J., FREI, C. (2005). Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, v.25, p.753–771.
- TORETI A.; XOPLAKI E.; MARAUN D.; KUGLISTSCH F.G.; WANNER H. LUTERBACHER J. (2010). Characterization of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.10, p.1037-1050.