

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIAS NOS DIAS DE INÍCIO, PICO E FIM DA ESTAÇÃO CHUVOSA NO DISTRITO FEDERAL**

*Tayline Alencar Marques Serafim<sup>1</sup> & Carlos Henrique Ribeiro Lima<sup>2</sup>*

**RESUMO** – A previsibilidade do início e do fim da estação chuvosa de uma região é de grande relevância na gestão de recursos hídricos. Entretanto, o primeiro desafio de tais estudos é a definição de uma metodologia robusta para delimitar o período chuvoso. No presente trabalho, utilizou-se o modelo estocástico baseado em regressão logística e séries de Fourier para delimitar a estação chuvosa na região do Distrito Federal (DF) no período compreendido entre 1971 e 2008. A partir da obtenção das séries históricas dos dias de início, pico e fim da estação chuvosa, analisou-se a existência de tendências temporais nas respectivas séries anuais. Verificou-se então tendências monotônicas de atraso no início da estação assim como de diminuição da duração da estação chuvosa no período analisado. Todas as tendências foram estatisticamente significantes ao nível de significância de 5%. A magnitude dessas tendências foi de aproximadamente 3 dias de atraso no início e 3 dias de redução na duração da estação chuvosa em 10 anos. Na média do período, obteve-se as datas de 30 de outubro, 08 de janeiro e 19 de março como os dias de início, pico e fim da estação chuvosa para a região, respectivamente.

**ABSTRACT** – The predictability of the onset and end of the rainy season of a region is very relevant for the water resources management. The first challenge in such studies is, however, the definition of a sound methodology to estimate the rainy season timings. In this study we apply a stochastic model based on logistic regression and Fourier series to estimate the rainy season timings in the region of Distrito Federal (DF) for the period 1971-2008. Once we found the onset, peak and end days of the rainy season, we proceeded with an analysis of temporal trends in the historical series. We observed then statistically significant monotonic trends of delayed onsets and reduced durations in the rainy season during the analyzed period. The magnitude of those trends were approximately 3 days in 10 years. Over the period, the average days of onset, peak and end of the rainy season were found as October 30, January 8 and March 19, respectively.

**Palavras-Chave** – Estação Chuvosa, Variabilidade Interanual, Modelo Estocástico.

### **INTRODUÇÃO**

A variabilidade sazonal e interanual da precipitação exerce grande influência nas atividades sociais e econômicas de uma região. No Brasil, os setores agrícola, pecuarista e de energia, por exemplo, são bastante afetados por atrasos no início das chuvas. Cabe ressaltar também, a crescente

---

1) Estudante de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. E-mail: [tayl.sera@gmail.com](mailto:tayl.sera@gmail.com)

2) Professor adjunto do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. E-mail: [chrlima@unb.br](mailto:chrlima@unb.br)

preocupação relacionada à crise hídrica em diversos locais do território brasileiro, entre os quais inclui-se a região do presente estudo, o Distrito Federal (DF). Nesse contexto, portanto, informações antecipadas sobre atrasos ou antecipações nos dias de início e fim do período chuvoso são de grande importância na gestão dos recursos hídricos.

Na literatura há diversos estudos cujos esforços consistiram em alcançar melhor compreensão dos padrões de circulação atmosférica e/ou oceânica responsáveis pela variabilidade da estação chuvosa em diferentes regiões brasileiras (ex: Marengo *et al.*, 2001; Liebmann e Marengo, 2001; Gan e Moscati, 2003; Gan *et al.*, 2004; Lima e Lall, 2009a). O primeiro desafio desses estudos sobre início e fim da estação chuvosa foi a utilização de uma metodologia para delimitar o período chuvoso, já que não existe um método padrão. Portanto, há uma diversidade de metodologias e critérios usados, baseados na precipitação, nos ventos, na Radiação de Onda Longa (ROL), dentre outros.

Apesar dos grandes avanços do conhecimento dos sistemas atmosféricos responsáveis pela precipitação nas regiões do Brasil, a região Centro-Oeste (composta pelos estados Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, mais o Distrito Federal), ainda é uma região com baixa previsibilidade climática. Isso ocorre devido à variedade e variabilidade dos sistemas meteorológicos que atingem a região (Sampaio e Dias, 2014), o que dificulta, portanto, o desenvolvimento de modelos de previsão que forneçam datas mais precisas do início e do fim da estação chuvosa.

A partir dessas considerações, o presente estudo tem como objetivo delimitar a estação chuvosa na região do Distrito Federal (DF) a partir do modelo estocástico proposto por Lima e Lall (2009a), e analisar as tendências nas séries anuais dos dias de início, pico e fim, bem como da duração da estação chuvosa. Os resultados apresentados fazem parte de um estudo mais aprofundado que está sendo desenvolvido para a região Centro-Oeste do Brasil e que tem como objetivo alcançar melhor compreensão dos fatores intervenientes na variabilidade interanual da estação chuvosa nessa região.

## **METODOLOGIA**

### **Dados climáticos**

Foram utilizados dados diários de chuva provenientes de 60 estações pluviométricas localizadas nas proximidades e dentro do DF, obtidos no período de 01/08/1971 a 31/07/2009. As estações pluviométricas analisadas são de responsabilidade de diferentes instituições, sendo elas: Agência Nacional de Águas (ANA), Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na Figura 1 é apresentada a distribuição espacial das estações pluviométricas analisadas.

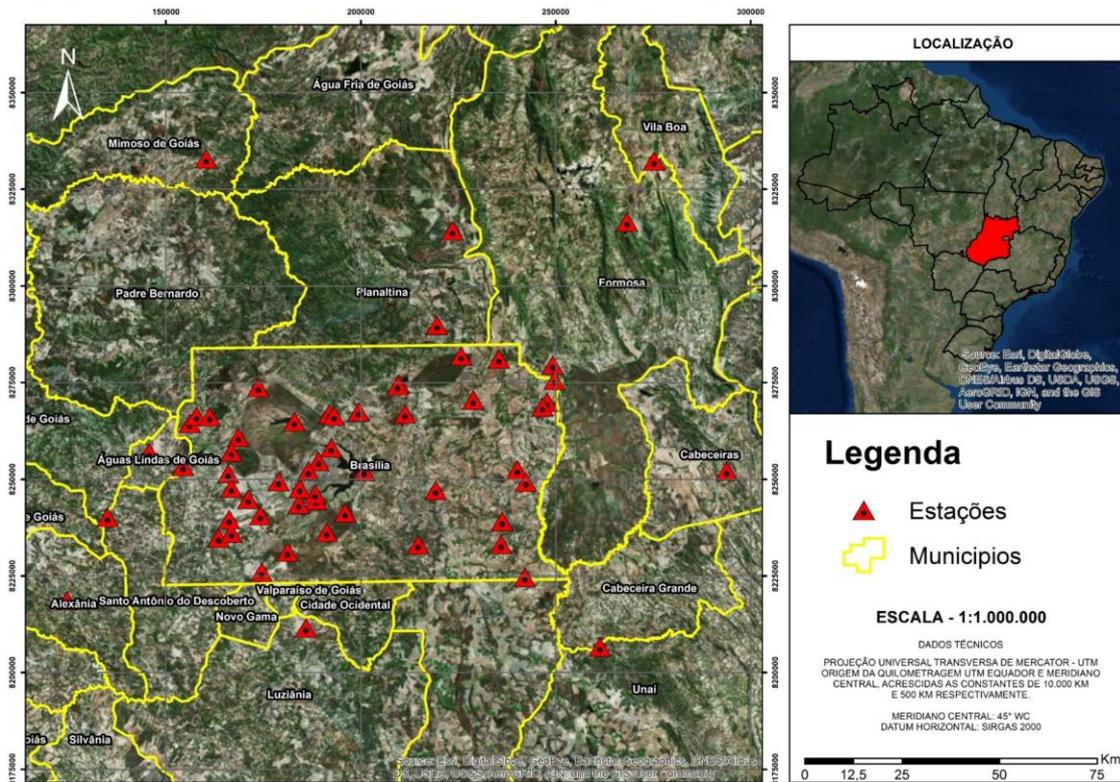


Figura 1 – Distribuição espacial das estações pluviométricas analisadas

## Modelo estocástico

O modelo estocástico proposto por Lima e Lall (2009a), baseado em regressão logística e séries de Fourier, foi empregado para obtenção dos dias de início, pico e fim da estação chuvosa. O modelo consiste na definição da variável aleatória  $y_{st}(n)$ , que segue uma distribuição não-homogênea de Bernoulli, assumindo o valor 1 para estado chuvoso e o valor 0 para estado seco. Assumiu-se estado seco quando a quantidade de chuva em determinado dia é menor ou igual a 0,254 mm e estado chuvoso quando é maior que 0,254 mm. Além disso, assume-se independência espacial e temporal para a distribuição abaixo:

$$y_{st}(n) \sim \text{Bernoulli}(p_{st}(n)) \quad (1)$$

onde  $p_{st}(n)$  é a probabilidade de chuva para a estação pluviométrica  $s$  no dia  $n$  do ano  $t$ . O ano  $t$  corresponde ao período de 12 meses, que se inicia no mês de agosto do ano  $t$  e termina no mês de julho do ano  $t + 1$ , objetivando garantir que o período analisado contenha o início da estação chuvosa.

Como a região do DF apresenta regime sazonal bem definido, assume-se que  $p_{st}(n)$  segue um ciclo anual e, portanto, a probabilidade de chuva é modelada a partir da inversa da função logística representada abaixo:

$$p_{st}(n) = \text{Logit}^{-1}(a_{st} + b_{st} \sin(\omega n) + c_{st} \cos(\omega n)) \quad (2)$$

onde,  $a_{st}$ ,  $b_{st}$  e  $c_{st}$  são os coeficientes de Fourier e  $\omega$  é a frequência angular do ciclo anual, dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{365} = 0,0172 \quad (3)$$

Os coeficientes de Fourier obtidos anualmente para cada estação pluviométrica foram estimados a partir do Método da Máxima Verossimilhança em um contexto de Modelos Lineares Generalizados (McCullagh e Nelder, 1989), como realizado no trabalho de Lima e Lall (2009b).

Uma vez que os coeficientes de Fourier são estimados, obtém-se uma curva de probabilidade de chuva diária para cada ano e para cada estação pluviométrica. Os dias de início e fim da estação chuvosa são definidos como sendo os dois pontos de inflexão dessa curva, que são os pontos onde ocorrem mudanças de concavidade (Thomas, 2009). O dia de pico da estação chuvosa é definido como sendo o dia associado à probabilidade máxima de ocorrência de chuva.

Para exemplificar, na Figura 2 é mostrado o ajuste do modelo (linha preta contínua) para uma das estações pluviométricas analisadas no ano de 2001 (período compreendido a partir de 01/08/2001 até 31/07/2002). Os pontos correspondem aos dados diários de chuva provenientes da estação pluviométrica, que receberam valor de ocorrência de chuva igual a 0 ou igual a 1. As duas linhas azuis tracejadas representam os dias de início e fim da estação chuvosa, as linhas vermelhas contínuas vertical e horizontal representam o dia de ocorrência do pico da estação chuvosa e a probabilidade de chuva associada a esse dia, respectivamente.

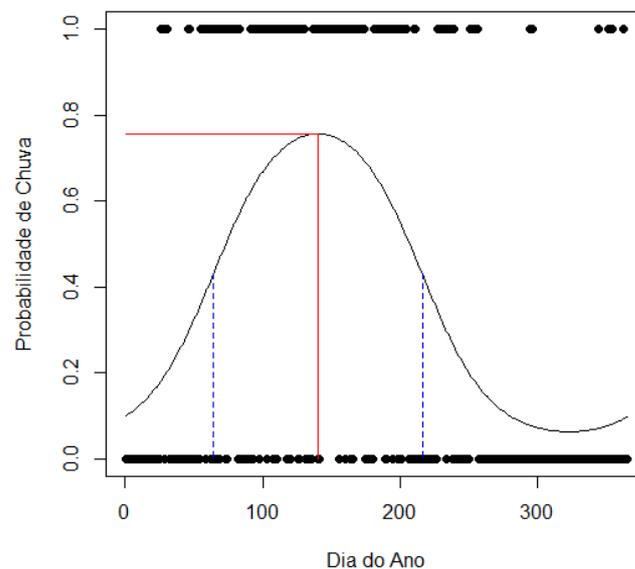


Figura 2 – Dias de início, fim e pico da estação chuvosa para uma das estações pluviométricas analisadas no ano de 2001

Ainda utilizando o ajuste do modelo apresentado na Figura 2, como o dia 1 corresponde à data 01/08/2001 e o dia 365 corresponde à data 31/07/2002, é possível determinar as datas exatas de início, fim e pico da estação chuvosa. Na Tabela 1 são apresentadas essas datas, bem como a duração (dias) e a probabilidade máxima de chuva.

Tabela 1 – Data de início, de fim e do pico, a duração (dias) e a probabilidade máxima da estação chuvosa para uma das estações pluviométricas no ano de 2001

Data de início	Data de fim	Duração	Data do pico	Probabilidade máxima de chuva
03/10/2001	04/03/2002	153	18/12/2001	0,76

### Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é um método não-paramétrico bastante utilizado para detecção de tendências monotônicas em séries temporais de variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas. Por se tratar de um teste estatístico não-paramétrico, não existe a necessidade de supor que os dados sigam alguma distribuição de probabilidades, como a distribuição normal, que é geralmente requerida em testes paramétricos. Assim, o teste é vantajoso quando aplicado a variáveis hidrometeorológicas (Yue *et al.*, 2002; Naghettini e Pinto, 2007). O teste de Mann-Kendall assume, como hipótese nula  $H_0$ , a ausência de tendências monotônicas na série temporal em estudo.

Como apresentado, por exemplo, por Yue *et al.* (2002), dada uma amostra de  $n$  variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid), a estatística  $S$  do teste de Mann-Kendall é obtida por meio de:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sinal}(X_j - X_i), \quad j > i \quad (4)$$

onde,  $X_i$  e  $X_j$  representam os dias de início (ou de pico, fim) ou a duração da estação chuvosa nos anos  $i$  e  $j$ ,  $n$  é a quantidade de valores na série temporal. O termo  $\text{Sinal}(X_j - X_i)$  pode assumir os valores: 1 ( $X_j > X_i$ ), 0 ( $X_j = X_i$ ) e -1 ( $X_j < X_i$ ).

A estatística  $S$  segue aproximadamente uma distribuição normal para  $n \geq 8$ , com média  $E(S)$  e variância  $\text{Var}(S)$  dadas por:

$$E(S) = 0 \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (6)$$

sendo  $t_i$  a quantidade de repetições de extensão  $i$ .

A hipótese nula  $H_0$  é rejeitada ou não tendo como base a estatística  $Z_{MK}$ , que segue uma distribuição normal com média zero e variância unitária para  $n \geq 10$ , sendo obtida a partir de:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & se \quad S > 0 \\ 0 & se \quad S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & se \quad S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Trata-se de um teste bilateral, portanto,  $H_0$  é rejeitada se  $|Z_{MK}| > Z_{\alpha/2}$ , onde  $Z_{\alpha/2}$  é o quantil associado à probabilidade de excedência  $\alpha/2$  e é obtido a partir da distribuição normal padrão. Além disso,  $Z_{MK} > 0$  ( $Z_{MK} < 0$ ) indica que a série temporal apresenta tendência crescente (decrescente). No presente estudo, o nível de significância  $\alpha$  adotado foi de 5% e, portanto,  $H_0$  é rejeitada se  $|Z_{MK}| > 1,96$ .

### Estimativa da inclinação das tendências

O teste de Mann-Kendall não fornece a magnitude das tendências detectadas nas séries temporais analisadas, portanto, como complemento, foi utilizado o estimador proposto por Sen (1968). Tal como apresentado, por exemplo, por Wagesho *et al.* (2012), a estatística  $Q_{ij}$  é dada por:

$$Q_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i}, \quad j > i \quad (8)$$

onde,  $X_i$  e  $X_j$  representam os dias de início (ou de pico, fim) ou a duração da estação chuvosa nos anos  $i$  e  $j$ . Se a estatística  $Q_{ij}$  é positiva (negativa), a tendência é crescente (decrescente). No total são  $n(n-1)/2$  pares estimados de  $Q_{ij}$ , sendo que  $n$  é a quantidade de valores na série temporal analisada. O estimador de Sen ( $b$ ) corresponde à mediana de  $Q_{ij}$ , como representado abaixo:

$$b = \text{mediana} \left( \frac{X_j - X_i}{j - i} \right) \quad (9)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são mostradas as séries temporais dos dias de início, pico e fim, assim como a duração da estação chuvosa na região do DF no período 1971-2008. Os valores mostrados são a média espacial obtida a partir dos valores das 60 estações avaliadas. A região cinza representa os intervalos de confiança anuais de 95%. No presente estudo, não foi feita uma análise dos possíveis padrões

espaciais de variabilidade da quadra chuvosa existentes na região do DF, visto ser uma área relativamente pequena para afetar tais padrões. Dessa forma, a estimativa dos intervalos de confiança para os dias de início, pico e fim, assim como para a duração da estação chuvosa, permitiu a visualização da dispersão dos valores obtidos a partir do modelo estocástico para cada estação pluviométrica em torno da média amostral. Verifica-se que o tamanho dos intervalos de confiança não foi elevado, indicando pouca variabilidade espacial nessas variáveis.

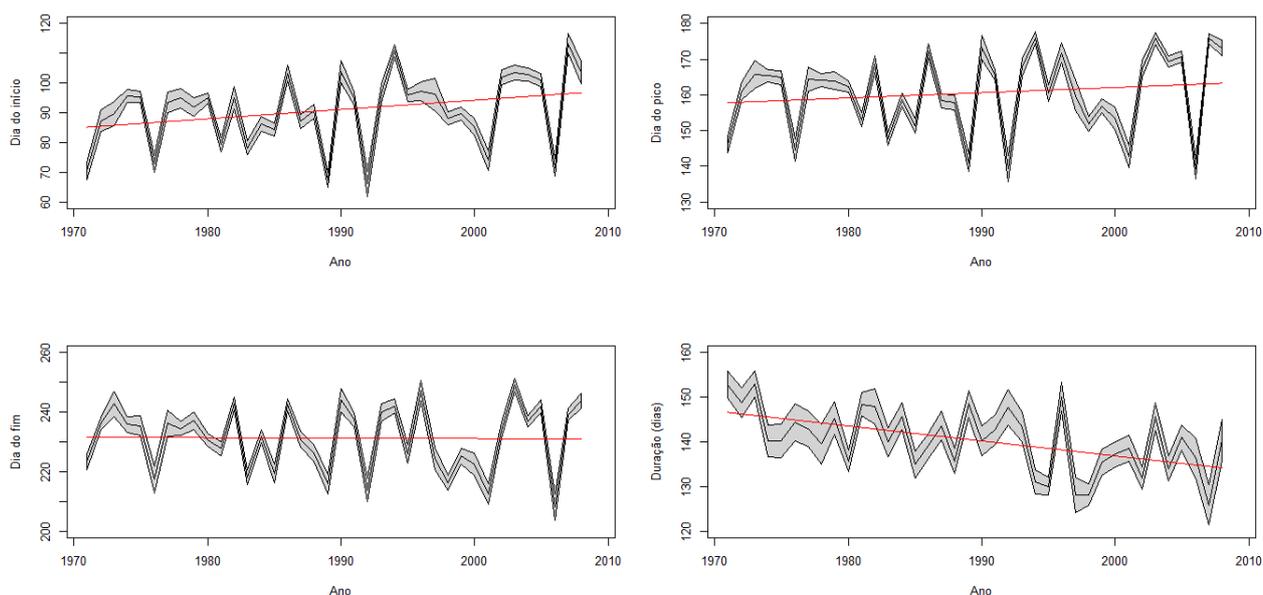


Figura 3 – Séries temporais (média espacial) dos dias de início, pico e fim, e da duração (dias) da estação chuvosa para a região do Distrito Federal. A região cinza representa o intervalo de confiança de 95%. A linha vermelha representa o ajuste de uma tendência linear.

Na Tabela 2 são mostradas as datas médias de início, pico e fim, assim como a duração da estação chuvosa no DF. Essas datas foram obtidas calculando-se a média do período de 1971 a 2008 e objetivou-se obter o período mais provável de chuva para a região a partir da metodologia utilizada.

As datas obtidas foram coerentes com as encontradas em outros estudos realizados na região Centro-Oeste do Brasil (ex: Gan e Moscati, 2003; Gan *et al.*, 2004; Bombardi e Carvalho, 2008), que obtiveram início da estação chuvosa entre setembro-novembro e fim da estação chuvosa entre março-maio para a região. No presente estudo, porém, as datas são mais precisas e focadas numa região específica (DF) do Centro-Oeste brasileiro.

Tabela 2 – Datas médias de início, pico e fim e duração (dias) da estação chuvosa para o DF.

Data do início	Data do pico	Data do fim	Duração
30 de outubro	08 de janeiro	19 de março	141

Os resultados da aplicação do teste de Mann-Kendall e do estimador de Sen às séries temporais de dias de início, pico e fim, bem como da duração média da estação chuvosa (Fig. 3), são apresentados na Tabela 3. Essas séries temporais foram confeccionadas a partir da média dos valores (dia de início, pico, fim ou duração da estação chuvosa) obtidos para as estações pluviométricas em cada ano (a partir de 1971 até 2008).

Tabela 3 – Testes estatísticos aplicados às séries temporais no período 1971-2008 (Fig. 3)

Série temporal	Sen-slope	Mann-Kendall	Valor-p
Dia médio do início da estação chuvosa	0,340	2,150*	0,032
Dia médio do pico da estação chuvosa	0,187	0,930	0,352
Dia médio do fim da estação chuvosa	-0,012	-0,025	0,980
Duração média da estação chuvosa	-0,332	-3,042*	0,002

\*Estatisticamente significante ao nível de significância de 5% (valor-p  $\leq$  0,05)

A série anual do dia de início da estação chuvosa apresentou tendência crescente e estatisticamente significativa ao nível de significância de 5% a partir da aplicação do teste de Mann-Kendall, ou seja, apresentou tendência temporal de atraso do dia de início da estação chuvosa. A série anual do dia médio da ocorrência do pico da estação chuvosa, apesar da leve tendência crescente (atraso do dia da ocorrência do pico), não apresentou resultados estatisticamente significantes ao nível de significância de 5%. Os valores da inclinação de Sen também confirmam esse resultado, portanto, verifica-se que a taxa de atraso do dia de início da estação chuvosa é superior à taxa de atraso do dia da ocorrência do pico. Para a série anual do dia de início da estação chuvosa, a magnitude da tendência foi de aproximadamente 3 dias de atraso em 10 anos. Já a série anual do dia de fim da estação chuvosa apresentou tendência decrescente (antecipação do dia de fim da estação chuvosa), mas foi a série temporal que apresentou maior valor-p dentre as séries analisadas e, portanto, não apresentou tendência estatisticamente significativa. Por fim, a série anual da duração média da estação chuvosa também apresentou tendência decrescente (redução da duração da estação chuvosa) estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%. A magnitude da tendência para a série anual da duração da estação chuvosa foi de aproximadamente 3 dias de redução na duração em 10 anos.

## CONCLUSÕES

A partir do modelo estocástico, baseado em regressão logística e séries de Fourier, foi obtida uma curva de probabilidade anual de chuva diária para diversas estações pluviométricas localizadas na região do DF (período 1971-2008). Os dias de início e fim da estação chuvosa foram definidos

como sendo os dois pontos de inflexão da curva de probabilidade de chuva diária e o dia da ocorrência do pico da estação chuvosa foi definido como o dia em que a probabilidade de chuva é máxima.

A utilização dessa metodologia permitiu a obtenção das séries anuais de início, fim, pico e duração média da estação chuvosa para a região do DF. A obtenção das médias dessas séries no período de 1971 a 2008 forneceu as datas mais prováveis de início, ocorrência do pico e fim da estação chuvosa para essa região como sendo: 30 de outubro, 08 de janeiro e 19 de março, respectivamente. As datas obtidas foram coerentes com as encontradas na literatura.

Observou-se uma tendência temporal crescente e estatisticamente significativa na série anual do dia de início da estação chuvosa, sugerindo que a estação chuvosa na região está iniciando cada vez mais tarde. Em função disso, observou-se uma tendência, também estatisticamente significativa, de diminuição na duração da estação chuvosa no período analisado. A magnitude dessas tendências foi de aproximadamente 3 dias de atraso no início e 3 dias de redução na duração da estação chuvosa em 10 anos. Não se observou tendências significantes nos dias de pico e fim da estação chuvosa.

No presente trabalho também foram realizados testes com outros limiares para definição dos estados chuvoso e seco (valores entre 0,1 e 3 mm). Os resultados dos testes não foram apresentados neste artigo. Constatou-se que, para limiares de até 0,5 mm, os resultados e conclusões apresentados aqui foram os mesmos. Já para limiares entre 1 e 3 mm, ainda que as conclusões sejam as mesmas, a magnitude da tendência na série de duração passou a ser de aproximadamente 2 dias de redução em 10 anos.

Por fim, os resultados apresentados no presente trabalho fazem parte de um estudo mais aprofundado sobre os fatores intervenientes na variabilidade da estação chuvosa na região Centro-Oeste do Brasil. O próximo passo é investigar a influência de forçantes climáticas de larga escala nas tendências detectadas no início e na duração da estação chuvosa na região. O conhecimento dessas influências visa possibilitar o desenvolvimento de modelos de previsão que forneçam datas mais precisas de início e fim da estação chuvosa para a região, o que é benéfico para os diversos setores que dependem dos recursos hídricos, particularmente num local que vivenciou uma grave crise hídrica em 2017-2018 e persiste com uma estrutura hídrica bastante vulnerável à variabilidade climática.

## **AGRADECIMENTOS**

A primeira autora agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Agência Nacional de Águas (ANA) pela concessão de bolsa de Mestrado a partir do projeto intitulado “Impactos das Mudanças Climáticas em Extremos Hidrológicos (secas e cheias)”, edital CAPES/ANA de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos N° 19/2015.

## REFERÊNCIAS

- BOMBARDI, R.J.; CARVALHO, L.M.V.DE. (2008). “Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO<sub>2</sub> usando o modelo MIROC”. Revista Brasileira de Meteorologia 23(1), pp. 58 – 72.
- GAN, M.A.; MOSCATI, M.C.L. (2003). “Estação chuvosa de 2001/2002 na região Centro Oeste do Brasil”. Revista Brasileira de Meteorologia 18(2), 181 – 194.
- GAN, M.A.; KOUSKY, V.E.; ROPELEWSKI, C.F. (2004). “The South America Monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil”. Journal of Climate 17(1), pp. 47 – 66.
- KENDALL, M. G. (1975). *Rank correlation Methods*. Charles Griffin, London.
- LIEBMANN, B.; MARENGO, J.A. (2001) “Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin”. Journal of Climate 14, pp. 4308 – 4318.
- LIMA, C.H.R.; LALL, U. (2009a). “Hierarchical Bayesian modeling of multisite daily rainfall occurrence: Rainy season onset, peak, and end”. Water Resources Research 45(7), pp. 1 – 14.
- LIMA, C.H.R.; LALL, U. (2009b). “Modelagem estocástica e análise temporal da duração e dos dias de início e fim da estação chuvosa no Nordeste” in Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, Nov. 2009.
- MANN, H.B. (1945). “Non-parametric tests against trend”. Econometria 13(3), pp. 245 – 259.
- MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.E.; FILIZOLA, N.P; WAINER, I.C. (2001) “Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin”. Journal of Climate 14, pp. 833 – 852.
- McCULLAGH, P; NELDER, J. A. (1989). *Generalized Linear Models*. Chapman and Hall, London.
- NAGHETTINI, M.C.; PINTO, E.J. (2007). *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte, Brasil.
- SAMPAIO, G.; DIAS, P.L.S (2014). “Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima”. Revista USP (103), pp. 41 – 54.
- SEN, P.K. (1968). “Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s Tau”. Journal of the American Statistical Association 63(324), pp. 1379 – 1389.
- THOMAS, G.B. (2009). *Cálculo: Volume 1*. Pearson Education, São Paulo, Brasil.
- WAGESHO, N.; GOEL, N.K.; JAIN, M.K. (2012). “Investigation of non-stationarity in hydro-climatic variables at Rift Valley lakes basin of Ethiopia”. Journal of Hydrology 444 – 445, pp. 113–133.
- YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. (2002). “Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series”. Journal of Hydrology 259 (1–4), pp. 254 – 271.