Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbge

Eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o estado de São Paulo. Parte II: aspectos mensais e frequências em múltiplas escalas

Ana Paula Paes dos Santos¹, Osmar Pinto Júnior², Everaldo Barreiros de Souza³, Rodrigo Azambuja⁴, Francisco José Lopes de Lima⁵, Sérgio Rodrigo Quadro dos Santos⁶

¹ Doutoranda no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. ana.santos@inpe.br (autor correspondente). ² Pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. osmar@dge.inpe.br. ³ Pesquisador Associado no Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belém-PA. everaldo.barreiros.souza@itv.org. ⁴ Doutorando no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. rodrigoaza@gmail.com. ⁵ Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. francisco.lopes.lima@gmail.com. ⁶ Doutorando no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP. sergiosantos@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 08/08/2016 e aceito em 27/09/2016

RESUMO

Em virtude da atual preocupação em relação ao aumento na frequência de eventos de descargas atmosféricas, dado aos impactos que este fenômeno pode causar, o presente trabalho apresenta a segunda parte da identificação de eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo, composto pela escala mensal e revela a conclusão da frequência de eventos extremos em múltiplas escalas de tempo. Para isso, foram utilizados dados da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) compreendendo o período de 16 anos (1999 a 2014). Os eventos extremos foram determinados a partir da aplicação da técnica dos percentis. Além disso, também foi avaliada a variabilidade espacial e a tendência da incidência de descargas. Por meio da análise mensal foi possível identificar peculiaridades da escala sazonal, como a mudança do padrão espacial de alta concentração de descargas entre a estação de maior e menor atividade elétrica, que ocorre em maio e outubro/novembro. De todas as estações, o outono foi a única que apresentou tendências crescentes em todos os meses analisados. O estudo apontou também que, a frequência dos eventos extremos de descargas vem aumentando nos últimos anos, com aproximadamente 60% dos casos entre os anos de 2009 e 2014, sugerindo que descargas atmosféricas, está mais suscetível à ocorrência de eventos climáticos extremos.

Palavras-chave: eventos extremos, descargas atmosféricas, São Paulo.

Extreme climatic events of lightning in the state of São Paulo. Part II: monthly aspects and frequencies at multiple scales

ABSTRACT

Given the current concern about the increase in the frequency of lightning events, due to the impact that this phenomenon can cause, this paper presents the second part of the identification of extreme events of lightning in the State of São Paulo, composed of the monthly scale and shows the completion of the analysis of the frequency of extreme events in multiple time scales. For this, we used data from the Integrated National Lightning Detection Network (RINDAT) and the Brazilian Lightning Detection Network (BrasilDAT) for the period of 16 year, from 1999 to 2014. The extreme events were determined using the technique of Percentiles. Furthermore, it was also evaluated the spatial variability and the trend in the discharge incidence. Through monthly analysis it was possible to identify peculiarities of the seasonal scale, as the spatial pattern change of high concentration of discharges between the highest and lowest electrical activity season, which takes place in May and October/November. Of all seasons, the fall was the one that showed increasing trends in all months. The study also pointed out that the frequency of extreme events of discharges has increased in recent years, with approximately 60% of cases between the years 2009 and 2014, suggesting that lightning is very sensitive to the occurrence of extreme climatic events.

Keywords: lightning, extreme events, São Paulo.

Introdução

Do ponto de vista meteorológico e climatológicos, grandes desvios de um estado climático normal, denominados por “eventos

extremos”, ocorrem em escalas que podem variar de dias até milênios. No entanto, merecem foco, em termos das atividades humanas, os eventos de curto

(relacionados à meteorologia) e médio prazo (relacionados à climatologia) dado ao potencial de impactos que estes podem causar (Marengo, 2009).

No último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (da sigla em inglês: IPCC), o AR5, chama a atenção em relação ao aumento dos eventos extremos de tempestades para diversas regiões do globo.

Com as perspectivas de mudanças climáticas, cientistas, lideranças comunitárias e governantes do mundo todo estão dedicando esforços para compreender a natureza, bem como os efeitos que estas alterações que ocorrerão no século XXI e posterior a ele podem causar a população e aos sistemas socioeconômicos.

Dentre estas mudanças, tem-se uma grande preocupação em relação ao aumento da densidade de descargas atmosféricas no Brasil, visto que, o País se destaca como uma das principais regiões com maior incidência de raios no mundo, com cerca de 50 milhões por ano (Pinto Jr., 2009).

A preocupação se dá, devido ao grande poder de destruição ocasionado por este fenômeno. Apesar de que grande parte das descargas atmosféricas ocorra no céu, isto é, sem o contato com a superfície da Terra (Rakov; Uman, 2003), a parte que atinge o solo é numerosa o suficiente para provocar danos consideráveis em estruturas construídas pelo homem, principalmente nas grandes cidades, i.g. desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, avarias em torres de telecomunicações, em edifícios, queima de equipamentos eletrônicos, entre outros (Pinto Jr., 2005; Santos et al., 2016), causando prejuízos à sociedade estimados em 500 milhões de dólares por ano (Pinto Jr., 2009).

De acordo com estatísticas mundiais, os relâmpagos são a segunda maior causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta (Cardoso et al., 2013). No Brasil, ocorrem em torno de 132 mortes por ano, segundo os dados provenientes de um levantamento de mortes por raios entre 2000 e 2009. Na década passada, 1.321 pessoas morreram atingidas por raios, merecendo destaque com maior número de fatalidades a Região Sudeste, que apresentou 29% do total (Cardoso, 2011; Cardoso et al., 2013).

Desta forma, o presente trabalho propõe contribuir com os estudos das descargas atmosféricas no Estado de São Paulo, por meio da continuidade da identificação de eventos extremos, a partir da análise climatológica da ocorrência deste fenômeno em escala mensal, dado que as escalas anual e sazonal foram apresentadas na parte I desta pesquisa.

O desenvolvimento deste tipo de estudo para São Paulo evidencia-se com grande relevância

devido ao Estado apresentar os maiores índices de urbanização e grande importância no cenário econômico e social do País. As conclusões obtidas poderão embasar a construção e o aperfeiçoamento de sistemas de alerta, em médio prazo, permitindo assim, que o planejamento de ações preventivas sejam tomadas para minimizar impactos causados por este fenômeno (Santos et al., 2016).

Material e métodos

Os dados de descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo (NS) utilizados neste trabalho são provenientes da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) para o Estado de São Paulo, no Sudeste do Brasil. Foram considerados 16 anos de dados, correspondentes ao período de 1999-2014, dos quais, os dados de 1999-2010 são da rede RINDAT e os dados de 2011-2014 são da rede BrasilDAT. A série temporal foi analisada visando identificar padrões climatológicos de densidade de descargas, em uma resolução espacial de 5 x 5 km.

Para análise da tendência dos dados observados, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall. Este método foi utilizado devido o mesmo não necessitar que a série de dados apresente uma distribuição normal (gaussiana) a qual, é uma característica dos dados de descargas atmosféricas, e devido também ao seu resultado ser menos influenciado por valores *outliers*, visto que seu cálculo é baseado no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores da variável.

Originalmente criado por Mann (1945) e reformulado por Kendall (1948), o teste consiste em comparar cada valor da série de dados com os valores seguintes, calculando o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado. O teste não paramétrico é usado para analisar a existência de uma tendência monotônica crescente ou decrescente e é o método mais apropriado para analisar alterações climáticas em séries de dados climatológicos (Goossens e Berger, 1986). O teste estatístico de Mann-Kendall é determinado da seguinte forma:

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

(Eq.1)

em que,

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

(Eq.2)

Em que x_j e x_k são valores (anuais/sazonais/mensais) nos anos j e k (para $j > k$), respectivamente; n é o tamanho da série de dados; e a função sign é a variância de S , denotada por $[\text{VAR}(S)]$, assume o valor de 1 quando $x_j - x_k > 0$; 0 quando $x_j - x_k = 0$; e -1 quando $x_j - x_k < 0$, e é definida por:

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

(Eq.3)

E quando há repetições de dados, a variância assume a expressão:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$$

(Eq.4)

onde g é o número de grupos com dados repetidos e t_p é o número de dados no p -ésimo grupo. Para análise da tendência utiliza-se o valor de Z , no qual, o valor positivo ($Z > 0$) refere-se a uma tendência crescente e o valor negativo ($Z < 0$) refere-se a uma tendência decrescente.

Estimou-se também a inclinação e magnitude da tendência dos dados observados das descargas atmosféricas, utilizando o método não paramétrico de Sen (Sen, 1968; Sneyers, 1975). O método utiliza um modelo linear para estimar a inclinação da tendência e da variância dos resíduos, sendo constante no tempo. O teste foi utilizado por ser insensível aos valores de *outliers*, provendo uma medida mais realística das tendências em uma série temporal de dados, o que o torna mais rigoroso que a usual regressão linear. O método é determinado por:

$$f(t) = Qt - B$$

(Eq.5)

onde Q é o valor referente a inclinação da reta e B é uma constante.

Para obter a estimativa de inclinação Q , primeiro calculam-se as inclinações de todos os pares de dados, definidos por:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

(Eq.6)

para $j > k$.

Caso a série temporal seja composta por n valores x_j , obtêm-se $N=n(n-1)/2$ estimativas de inclinação Q_i . Deste modo, a inclinação estimada pelo método Sen é a mediana dos valores N de Q_i , os quais são classificados em ordem crescente e a estimativa Sen é dada por:

$$Q = Q_{[(N+1)/2]}$$

se N for ímpar, e

$$Q = \frac{1}{2} (Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]})$$

se N for par.

(Eq.7)

Para obter uma estimativa de B na Eq. 5, são considerados n valores da diferença $x_i - Q_{ti}$.

Outros trabalhos que também utilizaram os métodos de Mann-Kendall e da estimativa de inclinação Sen foram Fan e Wang (2011), Silva e Derecznski (2014), Santos et al., (2016).

Na análise dos casos extremos, realizada com o objetivo de caracterizar os eventos com maior ocorrência de descargas, foi utilizada a técnica dos percentis (quantis) proposta por Pinkayan (1966). Amplamente utilizada por Xavier (2001), esta técnica baseia-se na distribuição da frequência acumulada, sendo que a aproximação da função densidade de probabilidade que descreve o fenômeno é tanto melhor quanto maior é o número de observações disponíveis. Os intervalos de cada percentil representam as probabilidades ou frequências esperadas para cada um dos eventos que podem ocorrer na sequência da série temporal de uma variável x . Esta metodologia consiste estritamente na distribuição em ordenamento crescente de uma série amostral contínua. Neste trabalho a série está constituída pelos totais de descargas NS (mensais), sendo atribuída uma

probabilidade p univocamente a cada valor amostral (Xavier, 1999; Xavier et al., 2002). Assim, a série temporal pode ser distribuída sob a forma $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, na qual x_1 representa o menor valor e x_n o maior valor da série. O índice n , portanto, representa o tamanho da amostra. Por fim, são calculados os quantis sendo que, neste caso em particular, percentis, visto que a divisão considera em cem partes. A seguir, são obtidas as ordens quantílicas e a classificação em grupos propriamente dita (Santos et al., 2016). Este trabalho utilizou a ordem quantílica Q0,85 para estabelecer a classe “extrema” em relação aos valores observados (x_i) de descargas NS.

O método dos percentis permite selecionar de forma objetiva e rápida os eventos climáticos anômalos e de interesse para estudo em um determinado período. Ressalta-se que, no cálculo do trimestre DJF do primeiro ano em estudo, 1999, foram considerados apenas os meses de janeiro, fevereiro, uma vez que os dados de descargas registrado em dezembro de 1998 não constava na base de dados. Na análise dos resultados ficou evidente que o uso de dois meses apenas, não alterou o resultado da classe para este trimestre, já que para 1999 o número de descargas desse trimestre ficou bem próximo daquele observado nos anos seguintes.

Resultados e discussão

Uma vez já identificados e analisados os padrões climatológicos, tendências e eventos extremos das descargas atmosféricas em escala anual e sazonal (parte I), torna-se relevante o estudo dos mesmos em escala mensal, visto que, esta representa uma abordagem mais detalhada, visando investigar quais meses apresentam maior representatividade para elevação ou redução nos totais anuais e sazonais de incidência de descargas. Deste modo, a Figura 1 ilustra a contribuição relativa mensal ao total anual de descargas atmosféricas no Estado de São Paulo.

Através desta figura, nota-se que as maiores contribuições observadas nos meses do verão, ocorreram principalmente em janeiro, com percentual de 21,01%, seguido de fevereiro com 17,46% e dezembro com 14,65%. Conforme discutido na parte I, referente à análise sazonal, os percentuais mais elevados nesta estação estão associados a maior atividade convectiva sobre a região, derivada da atuação de sistemas meteorológicos como a ZCAS, Frentes Frias e circulação de brisa (Cavalcanti, 2009).

Nesta figura, também se evidencia o início do período de menor atividade convectiva (meses do outono e do inverno), com contribuições

percentuais aproximadamente abaixo de 10%, com meses de menores contribuições percentuais compostos por junho e julho, com 1,24% e 1,27%, respectivamente. Após esse período de baixa incidência de descargas atmosféricas, têm-se um aumento gradual, em virtude dos meses da primavera, estação pela qual aumenta a incidência de descargas, quando comparada aos trimestres anteriores.

Figura 1. Contribuição percentual média de cada mês para o total anual de descargas atmosféricas NS para o Estado de São Paulo durante o período de 1999-2014.

A Figura 2 apresenta o padrão médio mensal de densidade de descargas NS (descargas.km⁻².ano⁻¹) no Estado de São Paulo. Destaca-se que, a escala foi organizada por estações do ano, para ser possível identificar de forma nítida, peculiaridades da distribuição espacial das descargas atmosféricas, em todos os meses.

Conforme discutido na análise sazonal, no verão, a maior concentração de descargas ocorre na região centro-leste do Estado. No entanto, através da análise mensal, verifica-se que no mês de janeiro (Figura 2b) há uma maior densidade de descargas atmosféricas também ocorrendo na região oeste do Estado, quando comparado com os meses de dezembro (Figura 2a) e fevereiro (Figura 2c). Em dezembro e fevereiro (este último com maior diâmetro que em dezembro), a máxima densidade de descargas concentra-se sobre região a RMSP. Já em janeiro, os valores máximos se prolongam em direção noroeste (sentido Campinas) e nordeste (sentido Vale do Paraíba), tomando como referência a capital. Ainda é possível observar a ocorrência de núcleos de máxima densidade de descargas (em torno de 1,12 descargas.km⁻².ano⁻¹) sobre os municípios de Miracatu e Sete Barras, no sul do Estado. Esses municípios também apresentaram valores elevados em dezembro e fevereiro, todavia, não de máxima densidade.

Nos meses do outono, verifica-se que, em março (Figura 2d) e abril (Figura 2e) a maior concentração de descargas prevalece na região centro-leste do Estado. Porém, em maio (Figura 2f) este padrão se modifica, tanto em caráter espacial como quantitativo, passando a apresentar maior concentração de descargas no sudoeste e em quantidades inferiores (com máximo de $1,0 \text{ descarga.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) ao observado nos meses de março e abril.

Seguindo o padrão observado em maio, os meses do inverno (Figura 2g, h e i) também apresentam maior concentração de descargas na região sudoeste do Estado de São Paulo. Todavia, no mês de julho (Figura 2h) há mais ocorrência de descargas se prolongando nas demais regiões do Estado, com máximos em torno de $0,12 \text{ descarga.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ em áreas do centro de São Paulo.

Na primavera, esse padrão de maior ocorrência de descargas na região sudoeste só é observado no mês de setembro (Figura 2j). Em outubro (Figura 2k), observa-se grande concentração de descargas tanto na região sudoeste como em áreas do centro-leste, mais especificamente ao redor da RMSP. Em novembro (Figura 2l) o padrão de maior concentração de descargas observado na região sudoeste do Estado nos meses anteriores, já não se configura, e os máximos de descargas são observados somente no centro-leste de São Paulo, caracterizando este mês por apresentar um padrão de densidade de descargas mais próximo do observado na estação de maior atividade elétrica, o verão.

Sendo assim, conclui-se que, nos meses do verão e outono o padrão de maior densidade de descargas configura-se sobre a região centro-leste do Estado, exceto no mês de maio, onde passa a configurar-se de sudoeste. Este padrão espacial perdura por toda a estação de menor atividade elétrica (inverno) até a metade da primavera, onde se passa a observar um padrão espacial mais próximo do observado no verão e outono. Desta forma, tem-se que os meses da primavera podem ser considerados como meses de transição entre a estação de maior e de menor atividade elétrica.

A Figura 3 apresenta a série temporal dos totais mensais de descargas atmosféricas NS no Estado de São Paulo. Assim como na anterior, as escalas desta figura foram organizadas por estações do ano, para melhor se observar a variabilidade temporal em cada mês.

Observou-se que no verão, o mês de dezembro (Figura 3a) destacou-se por apresentar o evento mais significativo de toda a série de dados mensais analisada, ao qual ocorreu no ano de 2012,

com registro de 325.929 descargas. Este evento, juntamente com os que ocorreram nos anos de 2002 e 2009 foram classificados como eventos extremos do mês de dezembro. Apesar disto, dezembro foi o único mês desta estação a apresentar tendência de decréscimo, com magnitude de -1245 descargas/ano.

Já o mês de janeiro (Figura 3b) destaca-se pela maior variabilidade dos eventos em torno da média, em relação aos demais meses desta estação. Neste mês, foi observada uma pequena tendência de aumento na incidência de descargas de +174 descargas/ano. Os eventos extremos ocorreram nos anos de 2001, 2010 e 2014. Tendência crescente também foi observada no mês de fevereiro (Figura 3c), com magnitude superior a observada em janeiro, de +677 descargas/ano. Neste mês, os eventos extremos ocorreram nos anos de 2001, 2012 e 2013. Este último, destaca-se por seu elevado valor de 280.232 descargas.

De todas as estações do ano, o outono foi à única que apresentou tendência crescente em todos os meses, com menor magnitude em maio (+31 descargas/ano). No mês de março (Figura 3d), foram observados os maiores desvios em torno da média, e eventos extremos nos anos de 2006, 2010 e 2013. Evidencia-se que abril foi o mês que apresentou a maior magnitude de tendência desta estação, com +1434 descargas/ano (Figura 3e). Os eventos extremos deste mês concentraram-se entre os anos de 2007 e 2010 (2007, 2008 e 2010). Em maio (Figura 3f), os eventos extremos podem ser facilmente identificados na distribuição temporal, devido ao elevado número de descargas, quando comparado aos demais eventos. Estes eventos ocorreram nos anos de 2004, 2009 e 2013.

Nos meses de inverno (junho, julho e agosto) observou-se que ocorreram eventos com grandes desvios em torno da média nos três meses (Figura 3g, h e i). Na análise das tendências, o teste de Mann-Kedall reportou que o mês de junho (Figura 3g) apresentou a maior tendência crescente (+324 descargas/ano), e apesar de julho apresentar tendência crescente, esta obteve valor muito pequeno, de +77 descargas/ano (Figura 3h). Agosto foi o único mês desta estação a apresentar tendência decrescente, com magnitude de -787 descargas/ano (Figura 3i). Os eventos extremos destes meses ocorreram ao longo de toda a série. Em junho, esses eventos foram registrados nos anos de 2005, 2009 e 2012; em julho, ocorreram em 2004, 2007 e 2009; e em agosto, em 2000, 2001 e 2009.

Figura 2. Padrão médio mensal de densidade de descargas NS (descargas.km⁻².ano⁻¹) para o Estado de São Paulo no período de 1999-2014, com resolução espacial de 5x5 km. Observe que a escala é individual para os meses de cada estação do ano.

Os meses da primavera também apresentaram grandes desvios em torno da média. Setembro e outubro obtiveram tendências crescentes e eventos extremos nos anos de 2000, 2009, 2014 e 2005, 2009, 2012, respectivamente.

Novembro foi o único mês desta estação a apresentar tendência decrescente com magnitude de -1130 descargas/ano e eventos extremos nos anos de 2002 e 2009.

Figura 3. Distribuição temporal dos totais mensais de descargas atmosféricas NS para o Estado de São Paulo no período de 1999-2014, apresentando a média anual, a inclinação e magnitude da tendência pelo método Sen, significância estatística pelo teste de Mann-Kendall e os eventos que ultrapassaram o Percentil 85, considerando: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro; (d) março; (e) abril; (f) maio; (g) junho; (h) julho; (i) agosto; (j) setembro; (k) outubro; (l) novembro. As escalas são divididas por meses de cada estação.

Com a finalização das análises das três escalas temporais: anual, sazonal (parte I) e mensal (parte II) pôde-se elaborar um escalograma de frequência dos eventos extremos de descargas atmosféricas ao longo da série de dados analisada, a qual foi dividida em quinquênios, a fim de determinar qual o período apresentou maior ocorrência de eventos

extremos. Ressalta-se que pela série abranger dezesseis anos, o último quinquênio é composto por seis anos, e não cinco (Figura 4).

No primeiro quinquênio, observa-se que ocorreram 09 eventos extremos, no segundo 12 e no terceiro 30, correspondendo aos percentuais de 17,65%, 23,53% e 58,82%, respectivamente.

Ainda que o terceiro quinquênio seja composto por seis anos e visto que, o ano de 2014 apresentou 03 eventos extremos, fica evidente a preponderância dos eventos extremos nos últimos anos, em todas as escalas temporais, principalmente na escala anual, onde todos os eventos se concentraram no último quinquênio. Estes resultados sugerem que as descargas atmosféricas, assim como outras variáveis meteorológicas, conforme descrito por Marengo (2014), está mais suscetível à ocorrência de eventos climáticos extremos.

Marengo (2014) explica que, como estes eventos extremos são associados à variabilidade natural do clima, existem evidências de que eles podem ser ainda mais intensos e frequentes em um clima futuro mais quente, cenário que foi evidenciado no quinto relatório do IPCC (AR5), ao qual foi detectado um aumento na temperatura global, da ordem de 0,9°C desde 1850. Neste relatório, o IPCC AR5 atribuiu o aquecimento global às atividades humanas, com 95% de certeza.

Figura 4. Escalograma de frequência de eventos extremos de descargas atmosféricas no Estado de São Paulo durante o período de 1999-2014. Os tons de cinza ao fundo da imagem representam os quinquênios analisados (cinza claro: 1º quinquênio; cinza: 2º quinquênio; e cinza escuro: 3º quinquênio).

Conclusão

O presente trabalho apresentou a identificação dos eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo, compreendendo o período de 1999-2014. Foram feitas análises na escala mensal da variabilidade espaço-temporal e identificado tendências e eventos extremos utilizando os métodos de Mann-Kendall/Inclinação Sen e Percentil, respectivamente.

Os resultados mostraram que por meio da análise nesta escala foi possível identificar peculiaridades da escala sazonal, como a mudança do padrão espacial de alta concentração de descargas entre a estação de maior e menor atividade elétrica, que ocorre em maio e outubro/novembro. De todas as estações, o outono foi à única que apresentou tendências crescentes em todos os meses analisados.

A análise dos eventos extremos em múltiplas escalas de tempo apontou que nos últimos anos a frequência destes eventos vem aumentando, com aproximadamente 60% dos casos entre os anos de 2009 e 2014. Estes resultados sugerem que as descargas atmosféricas, assim como outras variáveis meteorológicas, estão mais suscetíveis à ocorrência de eventos climáticos extremos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE) e ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- Cardoso, I., 2011. Os Números (SURPREENDENTES) de Mortes por Raios no Brasil. Scientific American Brasil [Online]. Disponível: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.06.13.16/doc/os-numeros-surpreendentes-de-mortes-por.html>. Acesso: 24 mai. 2016.
- Cardoso, I., Pinto Jr., O., Pinto, I. R. C. A., Holle, R., 2013. Lightning casualty demographics in Brazil and its implications to safety rules, Atmospheric Research 135, 374-379.
- Cavalcanti, I. F.A., 2009. Tempo e clima no Brasil. Oficina de textos, São Paulo.
- Fan, X., Wang, M., 2011. Change trends of air temperature and precipitation over Shanxi Province, China. Theoretical and applied climatology 103, 519-531.
- Goossens, C., Berger, A., 1986. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. Annales Geophysicae, Berlin 4, 385-400.
- IPCC. Intergovernmental Panel in Climate Change, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, New York.

- IPCC. Intergovernmental Panel in Climate Change, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso: 15 out. 2016.
- IPCC. Intergovernmental Panel in Climate Change, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Acesso: 15 out. 2016.
- Kendall, M.G., 1948. Rank correlation methods, 4 ed. Charles Griffin, London.
- Mann, H.B., 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.
- Marengo, J. A., 2009. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Disponível: <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504>. Acesso: 15 out. 2016.
- Marengo, J. A., 2014. O futuro clima do Brasil. *Revista USP* 103, 25-32.
- Pinkayan, S., 1966. Conditional Probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. *Hydrology Papers*, Fort Collins-Colorado-USA.
- Pinto Jr. O., 2005. A Arte da guerra Contra os Raios. Oficina de Textos, São Paulo.
- Pinto Jr. O., 2009. Lightning in the tropics. Nova Publishers, New York.
- Rakov, V. A., Uman, M. A., 2003. Lightning: physics and effects. Cambridge University, Cambridge.
- Santos, A. P. P., Pinto Jr. O., Souza, E. B., Azambuja, R., Santos, S. R. Q., 2016. Variabilidade espaço-temporal e identificação de eventos extremos de descargas atmosféricas no estado de São Paulo durante o verão. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 346-352.
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379-1389.
- Silva, W., Dereczynski, C. P., 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências* 37, 123-138.
- Sneyers, R., 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale. Monografia. Geneve, OMM.
- Xavier, T. M. B. S., 1999. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no Estado do Ceará através da Técnica dos Quantis: 1964-1998. *Revista Brasileira de Meteorologia* 14, 63-78.
- Xavier, T. M. B. S., 2001. Tempo de Chuva – Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional. ABC Editora, Fortaleza.
- Xavier, T. M. B. S., 2002. A técnica dos quantis e suas aplicações em meteorologia, climatologia e hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras. Thesaurus, Brasília.