



Eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o estado de São Paulo. Parte I: Aspectos anuais e sazonais

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

^{1,4,6}Doutorandos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos-SP; Autor correspondente: ¹E-mail: ana.santos@inpe.br ²Pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos-SP. ³Pesquisador Associado no Instituto Tecnológico Vale (ITV) – Belém-PA. ⁵Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos-SP.

Artigo recebido em 28/06/2016 e aceito em 27/08/2016

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 uma análise da identificação dos eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo, nas escalas anual e sazonal. 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. A dinâmica espacial revelou que no período de maior atividade elétrica, as descargas tendem a se concentrar no centro-leste do Estado e no período de menor atividade elétrica, sobre o sudoeste. Na escala anual e nas estações de verão e outono, os eventos extremos ocorreram principalmente a partir do ano de 2009, com tendências de aumento da incidência de descargas, com significância estatística acima de 90%.

Palavras-Chave: Eventos Extremos, Descargas atmosféricas, São Paulo.

Extreme weather events of lightning on the state of São Paulo. Part I: Annual and seasonal aspects

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 an analysis using the identification of extreme climatic events of lightning on the State of São Paulo, for the annual and seasonal 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. The spatio-dynamical analysis revealed that during period of greatest electrical activity, discharges tend to be concentrated in the center-east of the state, and for the period of lower electrical activity on the southwest. At the annual scale and the summer and autumn seasons, extreme events occurred mainly from 2009 onwards, with increasing trends in the incidence of lightning with statistical significance above 90%.

Keywords: Lightning, extreme events, São Paulo.

Introdução

O termo “extremo” é usado em vários contextos da ciência climática. Refere-se a eventos que apresentam uma incidência rara, com

desvios superiores ou inferiores ao comportamento habitual de uma dada área e período analisado, tais como a ocorrência de um máximo diário de temperatura que excede o

percentil 90 da variabilidade diária, obtido a partir de uma base climatológica (Zwiers et al., 2012).

Uma característica dos extremos, é que eles são observados dentro de um contexto temporal, podendo ser de longo prazo, i.g. anual, sazonal, ou simplesmente de curto prazo como um acúmulo diário de precipitação. Certos fenômenos, como ciclones tropicais que foram classificados na escala Saffir-Simpson, ou tornados que foram classificados na escala Fujita, são considerados como uma classe extrema (Zwiers et al., 2012).

A definição geral de extremos que foi adotada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (da sigla em inglês: IPCC) em seu relatório especial sobre Extremos, o define como a ocorrência de um valor de uma variável de tempo ou de clima acima (ou abaixo) de um valor limiar, próximo da parte superior (ou inferior) de extremidades do intervalo de valores observados (Field et al., 2012; Zwiers et al., 2012).

Atualmente, há 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).

O interesse em estudar as descargas atmosféricas deve-se ao grande poder de destruição ocasionado por este fenômeno. Embora grande parte 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), causando prejuízos à sociedade estimados em 500 milhões de dólares por ano (Pinto Jr., 2009).

Além disso, os relâmpagos podem matar, sendo a segunda maior causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta, de acordo com estatísticas mundiais (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, apresentando 29% do total (Cardoso, 2011; Cardoso et al., 2013).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe contribuir com os estudos das descargas

atmosféricas no Estado de São Paulo, por meio da identificação de eventos extremos, a partir da análise climatológica da ocorrência deste fenômeno. A importância da elaboração deste tipo de estudo para São Paulo é reforçada pelo Estado apresentar os maiores índices de urbanização e grande da importância no cenário econômico e social do País. As conclusões obtidas poderão embasar a construção e o aperfeiçoamento de sistemas de alerta, em médio e longo prazo, permitindo assim, que o planejamento de ações preventivas seja tomado 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 $[VAR(S)]$, 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:

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

(Eq.3)

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

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

(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 $x_i - Q_i$. 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 (anuais e sazonais), 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

A Figura 1 apresenta a densidade média anual da ocorrência de descargas NS sobre o

Estado de São Paulo. Observa-se um padrão de maior concentração de descargas ocorrendo na região centro-leste do Estado, com valores máximos acima de $8,5 \text{ descargas.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, sobre a capital e em áreas da região metropolitana de São Paulo (RMSP), e valores mínimos, em torno de $1,0 \text{ descarga.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, no noroeste do Estado. Um fato a se destacar é que se optou por mostrar os valores da Figura 1 sem correções devido à eficiência de detecção das redes, pois a mesma depende de diferentes modelos, visto que as medidas foram feitas por diversas tecnologias ao longo do período.

A maior densidade de descargas observada no centro-leste de São Paulo pode ser associada à topografia do Estado, composta por cadeias de montanhas, favorecendo o desenvolvimento de convecção orográfica. Gijben (2012) em estudo climatológico compreendendo o período de cinco anos, entre 2006 e 2010, também associou os maiores valores de incidência de descargas, às regiões mais elevadas da África do Sul. Soula et al. (2016) também associaram valores elevados de densidade de descargas sobre regiões da bacia do Congo a áreas montanhosas, com valores máximos acima de $12,86 \text{ descargas.km}^{-2}$ no ano de 2013, em altitudes que excedem 3000 metros.

A máxima concentração de descargas observada sobre a capital e RMSP, no entanto, pode ser associada ao tipo de cobertura de superfície, caracterizada por apresentar a maior região de área construída do Estado, favorecendo o efeito de ilha de calor urbana, conforme relatado por Farias et al., (2012) e Santos et al., (2016). Steiger et al., (2002) também encontraram valores de densidade de descargas elevados, em torno de $6,0 \text{ descargas.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ sobre a área urbana de Houston, no Texas.

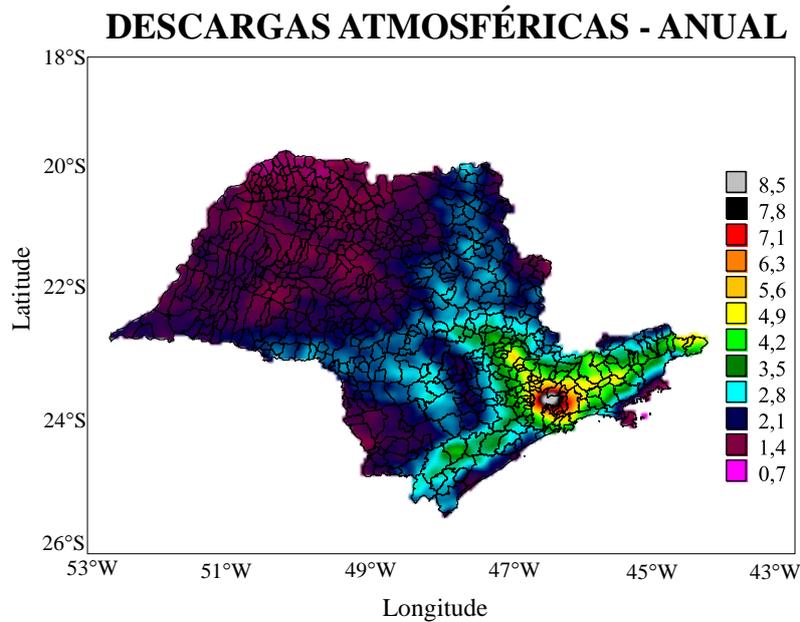


Figura 1 – Padrão médio anual de densidade de descargas NS (descargas.km⁻².ano⁻¹) para o Estado de São Paulo no período de 1999-2014, com resolução espacial de 5x5 km.

Na análise da dinâmica temporal anual das descargas (Figura 2), observa-se que, ocorreu um aumento da incidência de descargas NS sobre o Estado de São Paulo nos últimos anos, com picos máximos de atividade elétrica nos anos de 2009 e 2012. No entanto, apesar do elevado número de descargas registrado nos últimos anos, vale destacar que 2011 apresentou valores abaixo da média anual.

Por meio do teste de Mann-Kendall, foi possível identificar uma tendência positiva da ocorrência de descargas, com significância estatística de 90%. O método Sen, revelou uma estimativa de inclinação da reta de tendência com magnitude de +11498 descargas/ano.

Orville e Huffines (2001), também observaram um aumento no número de descargas NS sobre os Estados Unidos, para a (também) primeira década de operação da Rede Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (na sigla em

inglês NLDN). No primeiro ano de análise (1989), os registros de descargas eram em torno de 14 milhões e no último ano (1998), de aproximadamente 28 milhões. Os autores atribuíram este aumento a fatores naturais, decorrentes da ocorrência de tempestades e extensas inundações que ocorreram no País a partir do ano de 1993, e a fatores operacionais, como um “*upgrade*” na rede de detecção nos anos de 1994 e 1995.

Embora a tendência crescente observada sobre o Estado de São Paulo possa ser, em parte, devido às diferenças na eficiência de detecção das redes, o fato de que, o aumento verificado em 2009 ter sido observado a partir de dados da RINDAT e o aumento em 2012 a partir de dados da BrasilDAT, sugere que os mesmos não sejam devidos as diferentes redes.

Os resultados da aplicação do método dos percentis mostraram que os eventos extremos ocorreram nos anos de 2009, 2010 e 2012.

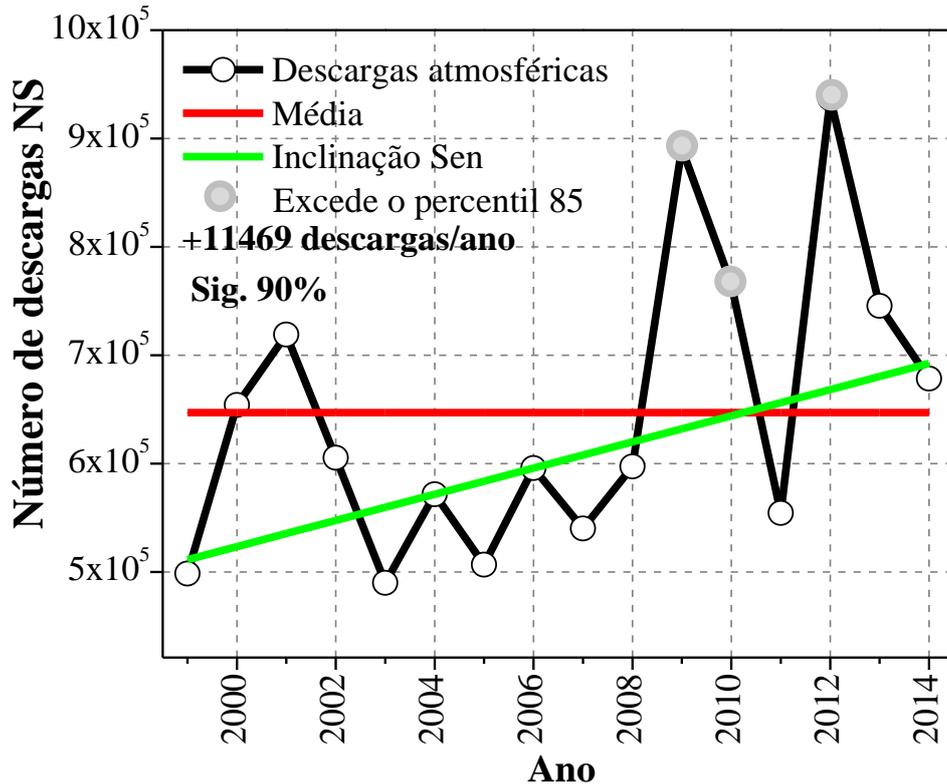


Figura 2 – Variabilidade temporal dos totais anuais de descargas NS no Estado de São Paulo, no período de 1999-2014, apresentando a média anual, a inclinação e magnitude da tendência pelo método Sen, significância estatística pelo teste de Mann-Kendall e os eventos extremos.

A Figura 3 apresenta a contribuição percentual média de cada trimestre para o total anual de descargas sobre o Estado de São Paulo. Verifica-se que o maior percentual representativo da atividade elétrica ocorre no trimestre de DJF (verão), com contribuição de 52,87%. No trimestre de MAM (outono), nota-se que este percentual decresce consideravelmente para 17,50%, e na estação de menor atividade convectiva no Hemisfério Sul, o inverno (JJA), o percentual é de 4,36%. Já no trimestre de SON (primavera) a contribuição percentual de descargas volta a crescer, com 25,27% do total anual.

Os maiores percentuais observados nos trimestres de DJF e SON associam-se ao

favorecimento da atividade convectiva sobre a região, através da atuação de sistemas meteorológicos de grande escala, que atuam nesta época do ano, e.g. a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais, além da influência de padrões de circulação de mesoescala (Cavalcanti, 2009). Nos trimestres que apresentaram menor contribuição ao total anual de descargas, os sistemas frontais atuam de forma esporádica, e a convecção geralmente tem caráter local. No inverno, a menor atividade convectiva está associada ao posicionamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pois nesta estação a ASAS ocupa sua posição mais oeste, influenciando a região Sudeste do Brasil (Reboita, 2010).

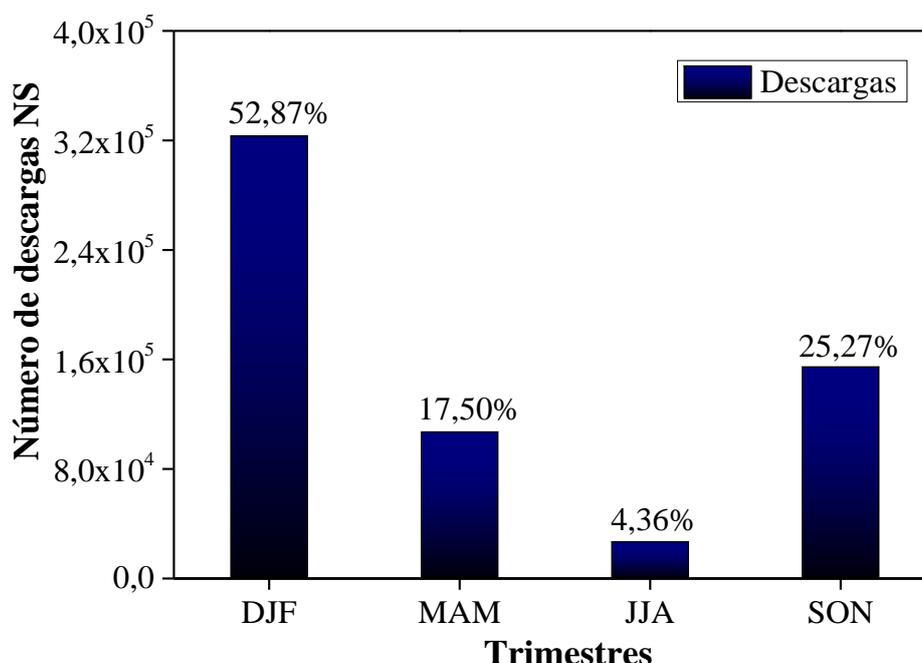


Figura 3 – Contribuição percentual média de cada trimestre para o total anual de descargas atmosféricas NS para o Estado de São Paulo durante o período de 1999-2014.

A Figura 4 mostra o padrão médio de densidade de descargas NS na escala sazonal. No trimestre de DJF – verão (Figura 4a), conforme apresentado na Figura 3 contribui com mais da metade do total anual de descargas, e desta forma, o padrão espacial desta estação é similar ao observado no padrão anual (Figura 1) de maior densidade de descargas ocorrendo no centro-leste do Estado, e máximos sobre a capital e região metropolitana de São Paulo. Todavia, o pico máximo de densidade sobre a RMSP neste trimestre é superior a 5,5 descargas.km⁻².ano⁻¹.

Uma vez que, este padrão se assemelha ao da escala anual, os valores máximos de densidade de descargas são associados aos mesmos daquela escala, ou seja, em relação à topografia no centro-leste do Estado e ao efeito de ilha de calor sobre a capital paulistana. Estes fatos justificam a intensificação da convecção sobre estas áreas, no entanto, os fatores climáticos que podem estar associados ao favorecimento da nebulosidade neste período do ano, é a atuação da ZCAS, Sistemas Frontais, e a influência de padrões de circulação de mesoescala (Cavalcanti, 2009) conforme mencionado anteriormente. Rodriguez et al., (2010) discutiram a respeito da alta incidência de descargas atmosféricas sobre a capital paulistana, associando-a a convergência do escoamento pré-frontal de noroeste com a brisa marítima na cidade, onde estes dois escoamentos tendem a favorecer a ocorrência de tempestades elétricas de verão.

No trimestre de MAM – outono (Figura 4b) verifica-se que a variabilidade espacial das descargas NS é semelhante aquela observada no padrão anual e no verão (Figura 1 e Figura 4a, respectivamente), de maior concentração de descargas ocorrendo na região centro-leste do Estado, com valores máximos sobre a capital e RMSP, no entanto, com valores inferiores, com máximos em torno de 2,0 descargas.km⁻².ano⁻¹ sobre a capital, e valores mínimos em torno de 0,1 descarga.km⁻².ano⁻¹, no oeste do Estado.

Já no trimestre de JJA – inverno (Figura 4c) observa-se que o padrão de descargas é diferente do observado no verão e no outono. Nesta estação, a maior concentração de descargas (acima de 0,23 descarga.km⁻².ano⁻¹) ocorre no sudoeste e diminui à medida que se aproxima do norte do Estado (mínimos de 0,01 descarga.km⁻².ano⁻¹). Isso pode estar associado ao padrão de nebulosidade nesta época do ano, em que, há uma redução da atividade convectiva no sentido sudeste-noroeste do Brasil (Cavalcanti, 2009), influenciando o setor norte-nordeste do Estado de São Paulo. Além disso, como mencionado anteriormente, durante este período, há uma menor formação de nuvens, também associado à atuação da ASAS, que nesta estação alcança sua posição mais oeste, favorecendo a inibição da convecção sobre São Paulo. A convecção nesta região ocorre quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem prevalecer sobre a ASAS (Reboita et al., 2010), no entanto, não se propagando para latitudes mais baixas. Logo, a nebulosidade mais representativa

concentra-se sobre o sul-sudoeste de São Paulo, favorecendo assim, na maior densidade de descargas sobre esta região.

No trimestre de SON – primavera (Figura 3d), verifica-se que a maior concentração de descargas ocorre no sudoeste e nordeste do Estado, com valores máximos de densidade acima de 1,0 descarga.km⁻².ano⁻¹, a noroeste a capital, São Paulo. No sudoeste, a maior densidade de descarga observada pode ser associada ao padrão

de nebulosidade já observado no trimestre anterior (JJA). Sobre parte do norte e no nordeste do Estado os valores máximos de incidência de descargas podem estar associados ao início da atuação da ZCAS, que ocorre entre o final do mês de setembro e início de outubro e se prolonga até o início de março (Cassarín e Kousky, 1986; Kousky e Cavalcanti, 1988).

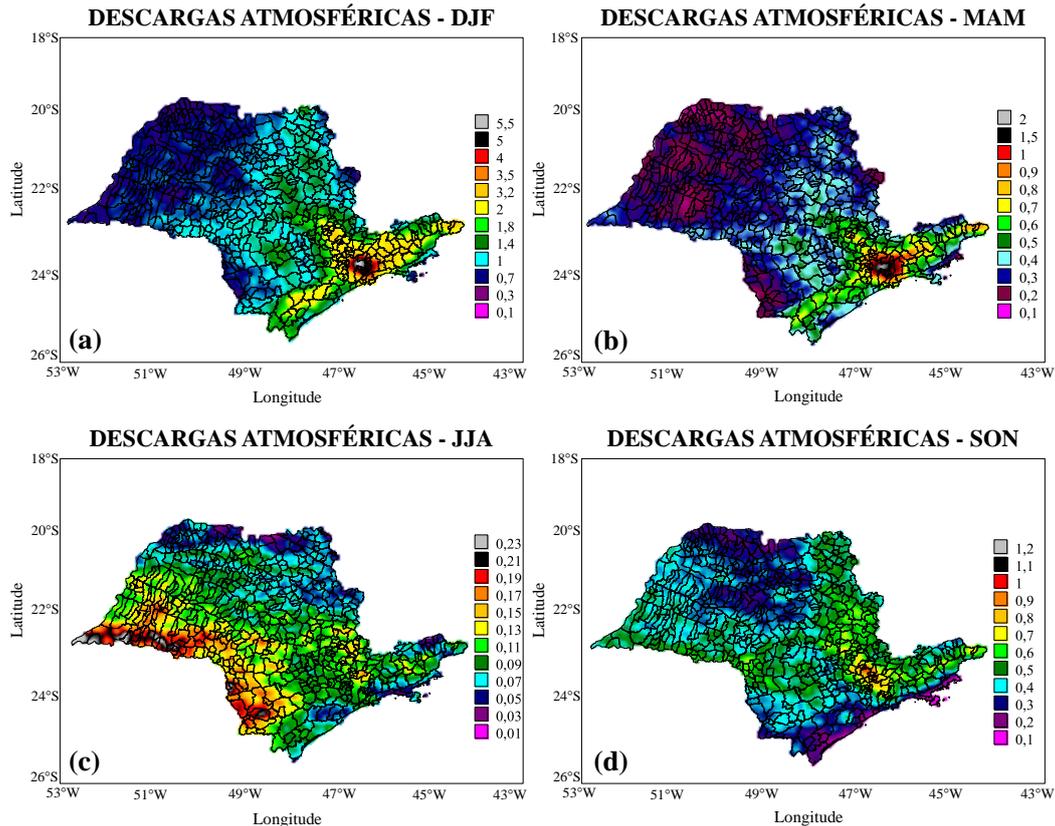


Figura 4 – Padrão médio sazonal de densidade de descargas NS (descargas.km⁻².ano⁻¹) para o Estado de São Paulo no período de 1999-2014, com resolução espacial de 5x5 km, considerando: (a) DJF – Verão; (b) MAM – Outono; (c) Inverno – JJA; e (d) Primavera – SON.

A Figura 5 apresenta a variabilidade temporal dos totais sazonais das descargas atmosféricas NS. No trimestre de DJF – verão (Figura 5a), estação com maior incidência de descargas, observa-se que, os eventos de descargas que ocorreram entre o início da série (ano de 1999) até o ano de 2009, de modo geral, apresentaram valor em torno da média, e os eventos mais representativos ocorreram após deste último ano, com valores expressivos nos anos de 2010 e 2013. A aplicação do método dos percentis identificou estes dois anos e o ano de 2014 como eventos extremos. Estes resultados apontaram para uma tendência de aumento da incidência de

descargas, com magnitude de +6700 descargas/ano, e significância estatística de 90%.

Para o outono – MAM (Figura 5b) observa-se uma grande variabilidade na incidência de descargas ao longo dos anos, com uma evidenciada tendência de aumento, de magnitude de +2829 descargas/ano e significância estatística de 95%. A média de ocorrência de descargas nesta estação foi de 106.996, tendo como eventos extremos os anos de 2004, 2010 e 2013.

Na estação de menor incidência de descargas, o inverno – JJA (Figura 5c), também se observa grande variabilidade ao longo dos anos, no entanto, sem tendência de aumento. A

estimativa Sen indicou tendência negativa de -163 descargas/ano. Como já era de se esperar, a média de 26.677 foi a menor da escala sazonal. Os eventos que ultrapassaram o limiar do percentil 85, classificando-os como extremo ocorreram nos anos de 2001, 2005 e 2009, sendo este último, o maior valor da série.

Assim como no inverno, a primavera – SON (Figura 5d) apresentou tendência decrescente, com magnitude de -955 descargas/ano. Para este trimestre, grande parte

dos eventos ocorreram em torno da média (154.480), e apenas dois eventos se destacaram, um pelo mínimo de incidência de descargas, que ocorreu no ano de 1999, e o outro devido ao máximo de descargas, no ano de 2009. Apesar de menos destacados em relação ao caso de 2009, os anos de 2000 e 2005 também apresentaram grande incidência de descargas, sendo os três classificados como eventos extremos de descargas nesta estação.

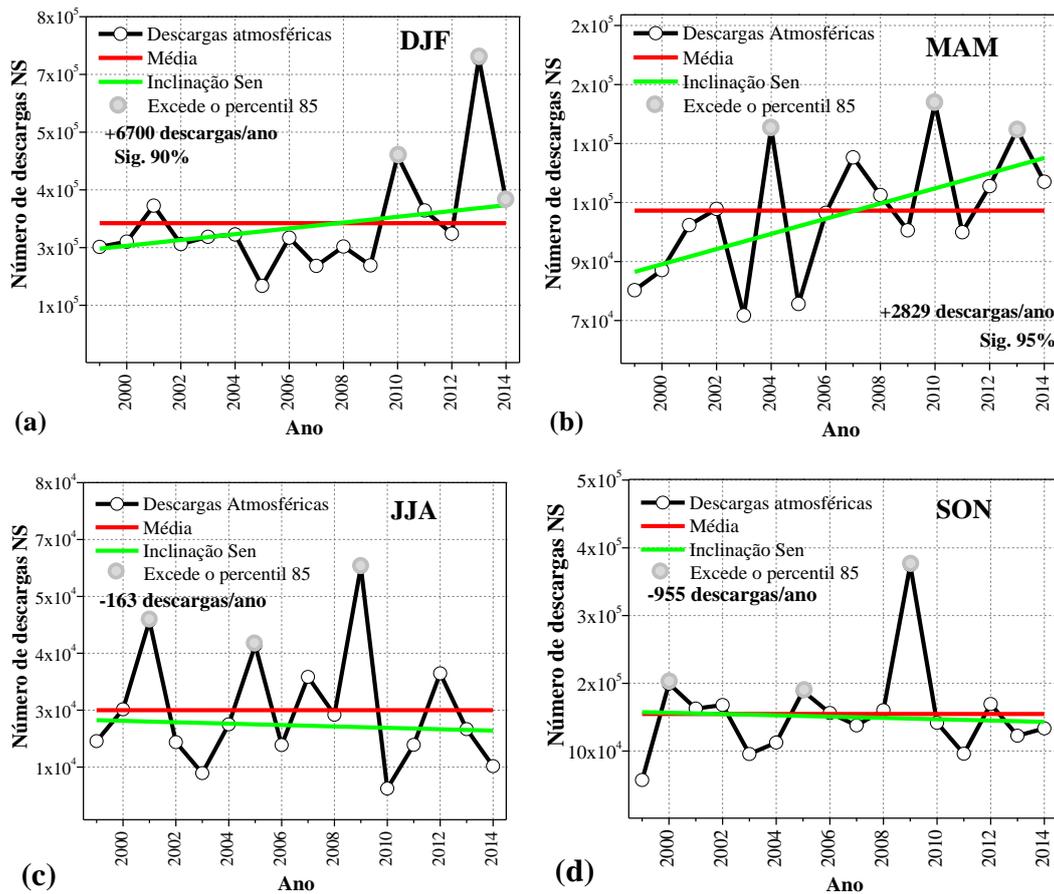


Figura 5 – Variabilidade temporal dos totais sazonais de descargas atmosféricas NS para o Estado de São Paulo durante o período de 1999-2014, apresentando a média anual, a inclinação e magnitude da tendência pelo método Sen, significância estatística pelo teste de Mann-Kendall e os eventos que ultrapassaram o Percentil 85, considerando: (a) Verão – DJF; (b) Outono – MAM; (c) Inverno – JJA; e (d) Primavera – SON. As escalas são individuais para as estações.

Conclusões

O presente trabalho dedicou-se a identificação dos eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo, compreendendo o período de 1999-2014. Foram feitas análises nas escalas anual e sazonal da dinâmica espaço-temporal e identificado tendências e eventos extremos utilizando os métodos de Mann-Kendall/Inclinação Sen e Percentil, respectivamente. Os resultados mostraram que há uma alta concentração de descargas na região centro-leste

do estado, com máximo ocorrendo sobre a capital, São Paulo. Os resultados das tendências revelaram que houve uma tendência crescente de +11498 descargas/ano, na escala anual, com significância estatística de 90%. A análise sazonal mostrou que no verão e no outono, o padrão espacial se mantém ao observado na escala anual e que no inverno, o padrão se modifica, e a área de maior concentração de descargas passa a ser de sudoeste. A primavera foi considerada como uma estação de transição de padrões espaciais. A análise das tendências mostrou tendências crescentes no verão e no outono com significâncias estatísticas

de 90% e 95%, respectivamente. Já no inverno e na primavera foram observadas tendências decrescentes. Para ambas as escalas de tempo analisadas, observou-se que os eventos extremos ocorreram principalmente a partir do ano de 2009, com tendências de aumento da incidência de descargas, com significância estatística acima de 90%.

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*, p. 42-45.
- 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*, in press.
- Cassarín, D. P.; Kousky, V. E. , 1986. Anomalias de precipitação sobre o Sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 1, 83-90.
- Cavalcanti, I. F.A. 2009. Tempo e clima no Brasil. Oficina de textos.
- Farias, W.R.G. Pinto, O., Naccarato, K.P., Pinto, I.R.C.A. ,2009. Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. *Atmospheric Research* 91, 485-490.
- Fan, X; Wang, M., 2011. Change trends of air temperature and precipitation over Shanxi Province, China. *Theoretical and applied climatology* 103, 519-531.
- Field, C. B., and Coauthors, Eds., 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Summary for Policymakers. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 19 pp. [Available online at [CrossRef](#).]
- Gijben, M., 2012. The lightning climatology of South Africa. *South African Journal of Science* 108, 44-53.
- Goossens, C.; Berger, A. , 1986. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae* 4, 385-400.
- Kendall, M.G.,1948. Rank correlation methods. 4 ed. London: Charles Griffin.
- Mann, H.B. , 1945 Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 245-259.
- Orville, R. E.; Huffines, G. R. , 2001. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98. *Monthly Weather Review* 129, 1179-1193.
- Pinkayan, S. , 1966. Conditional Probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. *Hydrology Papers*. Colorado State University.
- Pinto Jr, O. , 2005. A Arte da guerra Contra os Raios. São Paulo, Ed. Oficina de Textos.
- Pinto Jr., O. , 2009. Lightning in the tropics, Ed. Nova Publishers, New York.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A., 2003. Lightning: physics and effects. Cambridge: Cambridge University, 687 p. ISBN 0-521-58327-6.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., da Rocha, R. P., & Ambrizzi, T. , 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 2.
- Rodriguez, C. A. M.; Da Rocha, R. P.; Bombardi, R. , 2010. On the development of summer thunderstorms in the city of São Paulo: mean meteorological characteristics and pollution effect. *Atmospheric Research* 96, 477-488.
- Santos, A. P. P., Pinto Jr, O., De Souza, E. B., Azambuja, R., e 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*.
- Soula, S., Kasereka, J. K., Georgis, J. F., & Barthe, C. , 2016. Lightning climatology in the Congo Basin. *Atmospheric Research* 178, 304-319.
- Steiger, S. M., Orville, R. E., & Huffines, G. , 2002. Cloud-to-ground lightning

- characteristics over Houston, Texas: 1989–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107, n. D11.
- 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.
- Zwires, F. W.; Hegerl, G. C. ; Min, S. K.; Zhang. , 2012. *Explaining Extreme Events*.