

## Estimação da razão entre a massa precipitada e número de descargas elétricas atmosféricas para o sudeste brasileiro

**João V. C. Garcia**

INPE - Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (CAP),  
12227-010, São José dos Campos, SP  
E-mail: sawamano@gmail.com,

**Stephan Stephany**

INPE - Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC),  
12227-010, São José dos Campos, SP  
E-mail: stephan@lac.inpe.br,

**Augusto B. d'Oliveira**

UMC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica,  
08780-210, Mogi das Cruzes, SP, e  
CPTEC/INPE - Divisão de Satélites Ambientais  
15630-000, Cachoeira Paulista, SP  
E-mail: abdoliveira@yahoo.com.br.

**Resumo:** *Vários estudos tentam relacionar estatisticamente ocorrências de descargas elétricas atmosféricas com a taxa de precipitação em eventos convectivos. Uma abordagem empregada é a razão entre a massa precipitada e o número de descargas elétricas atmosféricas, a qual permite estimativas da taxa de precipitação a partir de dados de descargas, conforme expresso pelo modelo de Tapia. O presente trabalho estima essa razão para eventos convectivos observados no sudeste do Brasil utilizando dados de radares meteorológicos e de uma rede de detecção de descargas elétricas atmosféricas. Entretanto, propõe uma abordagem nova para seu cálculo e automatiza a seleção de eventos. Os resultados foram condizentes com aqueles encontrados na literatura da área.*

**Palavras-chave:** *descargas elétricas atmosféricas, radar meteorológico, atividade convectiva*

### 1 Introdução

O interesse em se melhor entender o funcionamento de sistemas de precipitação convectiva levou vários autores a procurar o relacionamento entre descargas elétricas atmosféricas (DEA) e pluviosidade. Uma melhor compreensão do funcionamento de sistemas de atividade convectiva severa pode levar a uma melhor estimativa da pluviosidade em regiões onde a cobertura de radar é insuficiente, e pode ser útil para se obter dados para tomada de decisão e alimentar modelos meteorológicos.

A atividade convectiva severa, caracterizada pela presença de ventos fortes, intensa atividade elétrica atmosférica e precipitação elevada, é um tipo de sistema de precipitação convectiva de particular interesse. As DEA são mais intensas em nuvens de alta convectividade; conforme a eletrificação aumenta com a altitude das nuvens convectivas, as cumulonimbus mais altas podem produzir atividade elétrica mais intensa [8].

Estudos foram realizados com o intuito de estimar o volume precipitado diretamente a partir da observação de descargas nuvem-solo. Zipser [12] usou a razão da precipitação mensal pelo

número de descargas elétricas diários para estudar a precipitação em sistemas convectivos severos para a região do oeste africano. Petersen e Rutledge [7] utilizaram a massa total precipitada e a densidade de descargas nuvem-solo para examinar o relacionamento desses dados em um grande número de escalas espaciais e temporais diferentes para várias partes do mundo [8].

O relacionamento entre DEA e precipitação pode variar significativamente, dependendo em características da massa de ar e microfísica das nuvens, mas estudos anteriores apresentaram indícios positivos de um relacionamento entre DEA e a média de precipitação em uma região [10], e sobre a taxa total de DEA e precipitação convectiva [1].

O relacionamento entre precipitação e DEA é geralmente expresso em termos da razão precipitação-descargas, ou RLR (Rainfall-Lightning ratio), um estimador para o volume precipitado em relação ao número de descargas nuvem-solo. O RLR depende de características térmicas e microfísicas dos eventos de atividade convectiva severa estudados, assim como sua localização, climatologia local e regime convectivo [5], e pode variar bastante. De acordo com Kempf e Kridder [4] em um estudo utilizando radares como estimador de precipitação, o RLR teve variação de  $38$  a  $72 \cdot 10^6$  kg/descarga por descarga para eventos de atividade convectiva severa isolados (Sudeste e centro dos Estados Unidos, Florida, França e Espanha). Molinie [6] encontrou valores tão baixos quanto  $3 \cdot 10^6$  kg/descarga (Pirineus), enquanto Williams et al [11] encontrou máximos de até  $500 \cdot 10^6$  kg/descarga (Austrália).

## 2 Dados meteorológicos e seu pré-processamento

O presente trabalho apresenta o cálculo do RLR para o sudeste Brasileiro no período de maio a dezembro de 2009. Todos os eventos detectados pelos instrumentos foram utilizados para realizar os cálculos, utilizando um algoritmo detector de atividade convectiva severa apresentado na Seção 3.2. A região de estudo do é delimitada pelo alcance das observações dos dois radares do IPMet utilizados na estimação de precipitação. Os radares estão situados aos arredores das cidades de Bauru e Presidente Prudente, estado de São Paulo. O radar de Bauru está localizado em latitude de  $22^{\circ}21'30''S$  e longitude  $49^{\circ}1'42''W$ , com altitude de 640 metros; o radar de Presidente Prudente está em latitude  $22^{\circ}10'30''S$  e longitude  $51^{\circ}22'30''W$ , com altitude de 493 metros. Ambos radares operam banda S, que engloba frequências de 2,0 a 4,0 GHz, encobrendo UHF e SHF até a 3,0 GHz. Os dados de radar foram obtidos no formato CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) do IPMet tem resolução espacial de 1 km e altitude 3000m, cobrindo uma área correspondente a um círculo de raio 150 km com centro em cada radar, limite imposto pela confiabilidade das medidas para fins de estimação de precipitação, com uma fração dessa área sendo amostrada com sobreposição pelos dois radares.

Radares meteorológicos medem a energia retroespalhada pelos hidrometeoros, em dBZ. A taxa de precipitação local é estimada pela relação Z-R apresentada na Equação 1 abaixo, onde  $Z_r$  é o fator de refletividade,  $R$  é a taxa de precipitação ou pluviosidade ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) e, finalmente,  $A$  e  $b$  são constantes empíricas, sendo no caso adotadas os valores  $A = 32$ ,  $b = 1,65$  referentes aos radares utilizados [2].

$$Z_r = A \cdot R^b \quad (1)$$

Como  $R$  é expresso em  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  e assumindo-se que a taxa de precipitação seja constante no intervalo de 7,5 minutos ( $1/8$  de hora) correspondente à resolução temporal do radar, pode-se aproximar  $R$  como sendo  $Z/8$ .

A rede de detecção de DEA RINDAT é composta por uma rede de sensores que detectam a radiação eletromagnética emitida pelas descargas na faixa de 10-300kHz. Os sensores cobrem a região sudeste do Brasil, possuindo alcance de cerca de 650 km e eficiência de detecção acima de 50%. Informações de tempo são providas pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS). Um software específico filtra os dados adquiridos pelos sensores e faz o processamento referente à localização das descargas, que tem uma precisão média de 500 metros, e gera uma lista de

descargas no formato UALF (Universal Ascii Lightning Format), em que cada registro/linha corresponde a um *stroke*, distinguindo o tipo de descarga (nuvem-nuvem ou nuvem-solo), bem como sua polaridade.

### 3 Metodologia

Neste trabalho adotou-se o modelo de Tapia, descrito a seguir, como estimador para o cálculo do RLR. Isto requer selecionar um conjunto de eventos de atividade convectiva severa, para os quais possa-se medir as correspondentes taxas de precipitação (a partir de dados de radar meteorológico) e ocorrência de DEA (a partir de dados de uma rede de detecção). Diferentemente de trabalhos anteriores, em que estimativas de RLR são feitas para o conjunto de descargas de cada evento convectivo, este trabalho estima um valor de RLR para cada descarga. Entretanto, torna-se também necessário identificar as descargas associadas a cada evento convectivo. A seleção de eventos convectivos é normalmente manual, demandando muito tempo. Neste trabalho, assumiu-se que o evento convectivo possa ser associado a um agrupamento de descargas e desenvolveu-se um algoritmo específico para identificação automática desses agrupamentos, detalhado na seção 3.2. Finalmente, o cálculo da razão de massa precipitada por descarga (RLR) é apresentado na seção 3.3.

#### 3.1 O modelo de Tapia

O modelo apresentado por Tapia [10], estima a distribuição espaço-temporal da precipitação através da ocorrência de DEA, e é bastante útil para se estimar precipitação em regiões com cobertura insuficiente de radar, porém com cobertura de uma rede de detecção de DEA. O modelo é representado pela Equação 4 abaixo.

Tapia supõe que a precipitação é uniformemente distribuída temporalmente em um intervalo de tempo  $\Delta t$  centrado no instante de ocorrência da descarga, conforme a Equação 2. Seu trabalho também apresenta um valor  $\Delta t = 5$  minutos baseado em experimentos.

$$f(t, T_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } |t - T_i| < t + \frac{\Delta t}{2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

A variação da correlação espacial entre DEA e precipitação sugere o uso de uma distribuição uniforme para a massa precipitada. No modelo proposto por Tapia, a precipitação é distribuída em um círculo de  $\Delta x$  de diâmetro centrado no local de ocorrência da descarga, conforme a Equação 3. Tapia utiliza  $\Delta x = 10$  km.

$$g(x, X_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } |x - X_i| < \frac{\Delta x}{2} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

O modelo de Tapia é expresso por:

$$R(t, x) = C \sum_{t=1}^{N_t} Z f(t, T_i) g(x, X_i) \quad (4)$$

$R(t, x)$  taxa de precipitação no instante  $t$  e na posição  $x$  ( $\text{mmh}^{-1}$ ),

$N_t$  número de descargas até o instante  $t + \frac{\Delta t}{2}$ ,

$T_i$  instante de ocorrência da  $i$ -ésima descarga,

$X_i$  local de ocorrência da  $i$ -ésima descarga,

$Z$  O RLR (razão precipitação/descarga) para o evento convectivo (kg por descarga),

$C$  fator de conversão de unidades,

f distribuição temporal da precipitação dada uma descarga, descrita pela Equação 2,

g distribuição espacial da precipitação dada uma descarga, descrita pela Equação 3.

Assim, o modelo de Tapia pode ser utilizado para estimar a taxa de precipitação a partir de dados de uma rede de detecção de DEA, desde que o RLR seja conhecido e também as distribuições espaciais e temporais da precipitação em relação a cada descarga [10].

### 3.2 Esquema de agrupamento de descargas

Tipicamente, para se selecionar manualmente eventos convectivos que permitam estimar o RLR, é preciso fazer uma busca exaustiva em dados de radar meteorológico e também em dados de descargas, procurando aqueles que sejam correspondentes aos eventos no espaço e no tempo. Dado o grande volume desses dados meteorológicos e à ausência de um padrão nos formatos dos mesmos, a seleção manual torna-se bastante lenta e dispendiosa, o que limita a maioria dos trabalhos na área a uma quantidade relativamente pequena de eventos investigados. A abordagem deste trabalho é buscar agrupamentos de descargas e depois estimar a precipitação em torno de cada descarga. Neste escopo, outra contribuição deste trabalho foi adaptar um algoritmo de grafos para identificar automaticamente agrupamentos de descargas.

O processo consiste em um algoritmo de construção de árvores mínimas em grafos utilizando regras baseadas em características da distribuição de DEA em eventos de atividade convectiva severa. Seja  $G = (V, E)$  o grafo da ocorrência de DEA, onde  $V$  é o conjunto da ocorrência de descargas e  $E$  é o conjunto de arestas que indicam relacionamento entre as descargas.  $V$  é gerado considerando a ocorrência de cada descarga como um nó  $V(i) = v_i = (t_i, x_i)$  do grafo, onde  $t_i$  é o instante de ocorrência da  $i$ -ésima descarga e  $x_i$  é o local de sua ocorrência. A regra para a criação de uma aresta  $E(v_a, v_b) = e_{a,b}$  entre os vértices  $v_a$  e  $v_b$  é dada pela Equação 5:

$$e_{a,b} = \begin{cases} \text{Existe} & \text{se } (|t_a - t_b|, |x_a - x_b|) \leq (\Delta t_G, \Delta x_G) \\ \text{Não existe} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

onde  $\Delta x_G$  é uma distância e  $\Delta t_G$  é um intervalo de tempo, ambos definidos antes da aplicação do algoritmo, mas não relacionados com os parâmetros de nome similar de Tapia, apesar de os parâmetros do modelo de Tapia serem boa estimativa. As descargas associadas com uma descarga  $i$  ocorreram em instantes de tempo posteriores à sua ocorrência. A fim de simplificar o processamento, se dois vértices são nós-folha de uma mesma árvore (ou seja, a raiz da árvore é igual para dois nós-folha), a aresta não é estabelecida. O procedimento é então repetido para o próximo nó em ordem de ocorrência. Se esse nó não estiver conectado a nenhuma árvore, ele se torna raiz de uma nova árvore. Se a criação de uma aresta ocorrer entre duas árvores, a raiz mais antiga passa a ser a raiz da nova árvore. O processo se repete até que todas as DEA sejam ou raízes ou nós-folha de alguma árvore. A Figura 1 exemplifica esse comportamento como se as descargas fossem ocorrendo em tempo real, com cada imagem sendo separada da outra por aproximadamente  $\Delta t_G$  e com  $\Delta x_G$  sendo a distância de quadrados adjacentes: 1A mostra a ocorrência da primeira descarga em  $v_0 = (x = (3, 3), t = A)$ ; 1B indica a ocorrência de 3 novas descargas  $v_1 = (x = (1, 3), t = B)$ ,  $v_2 = (x = (4, 4), t = B)$ ,  $v_3 = (x = (6, 1), t = B)$ , e da criação da aresta  $e_{0,2}$ ; 1C e 1D continuam mostrando a formação de árvores.

Finalmente, a cada uma das descargas de cada árvore é então associada a precipitação correspondente, estimada a partir dos dados de radar definidos espacial e temporalmente conforme a janela definida pelas Equações 2 e 3.

### 3.3 Cálculo da razão da massa precipitada por descarga elétrica atmosférica

O ponto central do presente trabalho é justamente estimar a razão entre a massa precipitada e o número de descargas DEA (RLR). O modelo de Tapia permite estimar a taxa de precipitação

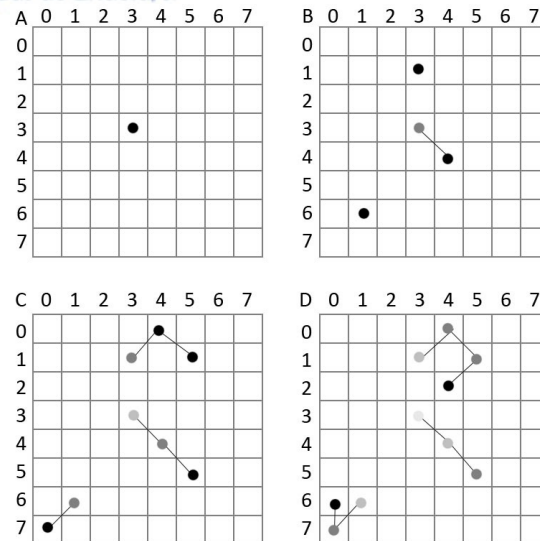


Figura 1: Esquema ilustrativo do algoritmo de grafos proposto para agrupamento de descargas.

a partir do número de descargas. Para se determinar o próprio RLR de uma dada região e período do ano, a metodologia proposta por Tapia [10] utiliza um conjunto de eventos convectivos selecionados, para os quais a taxa de precipitação foi estimada a partir de dados de radar e o número de descargas medido por uma rede de detecção. A Equação 4 é então empregada para cada evento, expressa em função da taxa de precipitação e número de descargas correspondentes (ambos conhecidos). Isso permite obter uma série de valores de RLR específicos correspondentes a esse conjunto de eventos, a partir dos quais estima-se o RLR desejado. No caso, para um conjunto de 22 eventos convectivos selecionados, Tapia [10] encontrou uma grande variação nos valores de RLR de cada evento (de 24 até  $365 \cdot 10^6$  kg/descarga). Assim, Tapia optou por estimar o RLR pela mediana desses valores.

O RLR depende da climatologia local e também do tipo de evento convectivo. Varia também conforme o ciclo de vida de um dado evento convectivo [9]. No presente trabalho, optou-se por uma abordagem ligeiramente diferente. Em vez de calcular o RLR para cada evento convectivo, optou-se por calcular o RLR para cada descarga, conforme abaixo:

$$\text{RLR}_i = \frac{Cf(t, T_i) g(x, X_i)}{R(t, x)} \quad (6)$$

O  $\text{RLR}_i$  é o RLR calculado para a  $i$ -ésima descarga, utilizando como  $R(t, x)$  a taxa de precipitação estimada a partir dos dados de radar limitados em um círculo de diâmetro  $\Delta x$  centrado na posição  $x$ , num intervalo de tempo  $\Delta t$ , centrado no instante de ocorrência  $t$  da descarga, anteriormente descrito pelas Equações 3 e 2. Os valores numéricos de  $\Delta x$  e  $\Delta t$  são os mesmos utilizados no modelo de Tapia apresentado na seção 3.1. Sist [9] apresenta um estudo mais aprofundado no que diz respeito à posição e instante da ocorrência da descarga não estar exatamente no centro dos intervalos  $\Delta t$  e  $\Delta x$ .

Por fim, o RLR final é obtido da maneira que Tapia [10] originalmente propôs, ou seja, calculando a mediana dos valores de  $\text{RLR}_i$ .

## 4 Resultados

A metodologia proposta exposta na seção anterior foi empregada para estimar a razão entre massa precipitada e descargas (RLR) para o sudeste brasileiro. Selecionou-se o período de maio a dezembro de 2009 e uma área que tivesse cobertura dos radares meteorológicos em questão, centrada no oeste do estado de São Paulo. O algoritmo de agrupamento de descargas identificou

643 grupos de descargas. Analisando as correspondentes imagens de radar meteorológico, notou-se que não havia uma correspondência unívoca entre grupos e eventos convectivos, mas que um dado evento convectivo era composto de vários grupos de descargas. Assim, na área e nos espaço de tempo abrangido por um evento convectivo pode-se notar várias focos em que a concentração de descargas é maior, correspondente aos grupos de descargas, sendo a densidade de ocorrência de descargas menor entre esses focos. Dessa forma, a metodologia proposta de estimar o RLR individualmente para cada descarga parece mais adequada, pois, em oposição à abordagem proposta originalmente por Tapia [10], leva em conta a taxa de precipitação associada a cada descarga, não considerando a precipitação dissociada da ocorrência de descargas. Isso teria que ser melhor avaliado testando-se o RLR obtido para o sudeste brasileiro de maneira mais extensiva, ou seja, verificando se as taxas de precipitação observadas correspondem àquelas estimadas pela Equação 4.

A mediana dos valores de RLR obtidos para cada descarga foi de  $40,54 \cdot 10^6$  kg/descarga, valor condizente com outros trabalhos da área. O valor máximo para o RLR foi de  $242,87 \cdot 10^6$  kg/descarga, enquanto o mínimo foi  $0,12 \cdot 10^6$  kg/descarga, com média  $55,59 \cdot 10^6$  kg/descarga, valores também condizentes com a literatura. A Figura 2 mostra o gráfico de dispersão das medidas de massa precipitada por hora e do número de descargas por hora. Considerando-se que cada ponto corresponda a um agrupamento de descargas que faz parte de um determinado evento convectivo, pode-se notar que houve mais agrupamentos com poucas descargas e baixa massa precipitada, embora não seja possível ver uma correlação clara entre ambas.

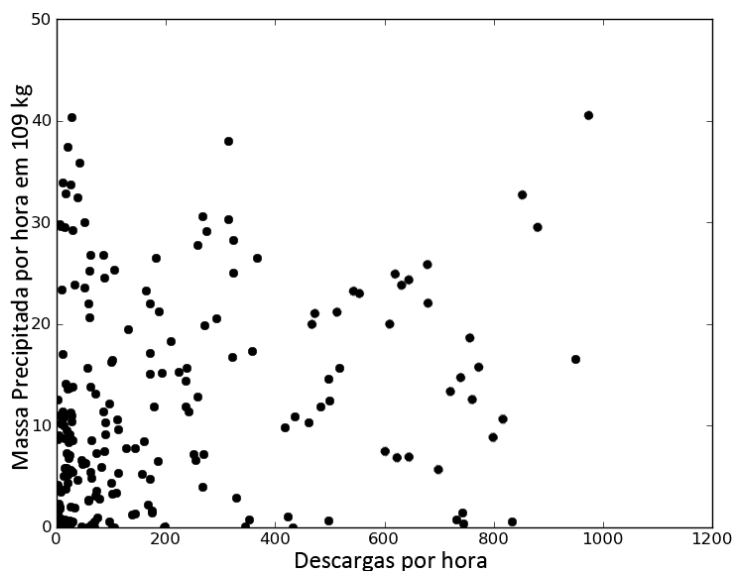


Figura 2: Gráfico de dispersão horária da massa precipitada e do número de descargas.

## 5 Comentários finais

O presente trabalho propôs uma nova metodologia para estimar a razão entre a massa precipitada e o número de descargas e a aplicou para a região sudeste brasileira e para o período compreendido entre os meses de maio e dezembro de 2009. Isso demandou calcular as taxas de precipitação, a partir dos dados de radares meteorológicos de banda S localizados nas cidades de Bauru e Presidente Prudente, bem como a obtenção de uma lista de ocorrências de DEA (posição e instante de ocorrência), a partir de dados da rede de detecção RINDAT.

Diferentemente da metodologia anteriormente proposta em Tapia [10], na qual calcula-se um valor de RLR para cada evento convectivo selecionado, este trabalho calcula um valor de RLR para cada descarga. Assim, foi necessário identificar grupos de descargas que possam ser associados a esses eventos. A seleção manual de dados de descargas visando essa identificação

demandaria um tempo excessivo. Visando automatizar esse procedimento, foi desenvolvido neste trabalho um algoritmo de grafos para agrupamento de descargas. Na sequência, definida uma janela espaço-temporal conveniente, calculam-se as taxas de precipitação associadas a cada descarga a partir dos dados de radar.

O conjunto de valores de RLR calculados levou a um RLR de  $40,54 \cdot 10^6$  kg/descarga, estimado pela mediana destes valores, valor coerente com aqueles encontrados por outros autores, levando-se em conta que o RLR varia em função de fatores geográficos e climatológicos e varia também ao longo do ciclo de vida da atividade convectiva. Conforme o modelo de Tapia e à metodologia adotada, isso corresponde à massa precipitada num círculo de 5 km de raio centrado na posição de ocorrência da descarga, assumindo-se que a precipitação tenha ocorrido com taxa constante num intervalo de tempo de 10 minutos centrado no instante de ocorrência.

Trabalhos futuros incluem a validação do RLR obtido por meio de dados de radar e descargas para eventos convectivos observados e a análise da influência dos tipos e polaridades de descargas no próprio RLR. Essas análises devem ser realizadas com suporte de meteorologistas.

## Referências

- [1] D. Buechler, S. Goodman, Echo size and asymmetry: Impact on nexrad storm identification, *Journal of Applied Meteorology*, 29 (1990), 962–969.
- [2] R.V. Calheiros, P.R.P. Tepedino, Daily interval and range stratification in rainfall measurements with the Bauru radar, em “Proceedings of the Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology” 418-421, Barcelona, 2006.
- [3] J. Chèze, H. Sauvageot, Area-average rainfall and lightning activity, *Journal of geophysical research*, 102 (1997), 1707–1715.
- [4] N.M. Kempf, E.P. Krider, Cloud-to-ground lightning and surface rainfall during the Great Flood of 1993, *Monthly Weather Review*, 131 (2003), 1140–1149.
- [5] T. Lang, S. Rutledge, Relationship between convective storm kinematics, microphysics and lightning, *Monthly Weather Review*, 130 (2002), 2492–2506.
- [6] G. Molinie, S. Soula, S. Chauzy, Cloud-to-ground lightning activity and radar observations of storms in the Pyrénées range, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125 (1999), 3103–3122.
- [7] W. Petersen, S. Rutledge, On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall, *Journal of geophysical research* 103 (1998), 14025–14.
- [8] D. Siingh, S. Kumar, A. Singh, Thunderstorms/lightning generated sprite and associated phenomena, *Earth Science India*, 3 (2010), 124–145.
- [9] M. Sist, F. Zauli, D. Melfi, D. Biron, A study about the correlation link between lightning data and meteorological data, em “2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference”, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, Cordoba, 2010
- [10] A. Tapia, J. Smith, M. Dixon, Estimation of convective rainfall from lightning observations, *Journal of Applied Meteorology*, 37 (1998), 1497–1509.
- [11] E.R. Williams, S.A. Rutledge, S.G. Geotis, N. Renno, E. Rasmussen, T. Rickenbach, A radar and electrical study of tropical “hot towers”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49 (1992), 1386–1395.
- [12] E.J. Zipser, Deep cumulonimbus cloud system in the tropics with and without lightning, *Monthly Weather Review*, 122 (1994), 1837–1851.