

Evandro Moimaz Anselmo

# **Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul**

São Paulo - SP

2014

Evandro Moimaz Anselmo

# **Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul**

Tese ao departamento de Ciências Atmosféricas, realizada como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo - SP

2014

*Tese*

## **AGRADECIMENTOS**

## **RESUMO**

Resumo

Palavras-chave: relâmpagos, tempestades, monitoramento.

## **ABSTRACT**

Abstract

Key-words: lightning, storms, tracking.

## LISTA DE FIGURAS

## **LISTA DE TABELAS**

3	Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus. . . . .	25
---	--	----

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>1 METODOLOGIA</b>	<b>11</b>
1.1 O SATÉLITE TRMM . . . . .	11
1.1.1 Radar de Precipitação . . . . .	11
1.1.2 Imageador de relâmpagos . . . . .	12
1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho . . . . .	12
1.1.4 Radiômetro de microondas . . . . .	12
1.2 FONTE DE DADOS . . . . .	13
1.3 RAIOS COM DIFERENTES TAXAS DE DESCARGAS DE RETORNO .	13
1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS . . . . .	14
1.5 A TAXA DE RAIOS POR TEMPESTADE ELÉTRICA . . . . .	15
1.6 DENSIDADES ESPACIAIS DE RAIOS E SISTEMAS . . . . .	15
1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA 3D DA PRECIPITAÇÃO . . . . .	18
1.7.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos . . . . .	19
<b>2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL</b>	<b>21</b>
2.1 CICLO DIURNO E CICLO ANUAL . . . . .	21
2.2 DENSIDADES ESPACIAIS . . . . .	26
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>30</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCFAD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude
CCFTD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura
CFAD	Diagrama de Contorno de Frequência por Altitude
CFTD	Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
MCS	Sistemas Convectivos de Meso-escala
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
PR	<i>Precipitation Radar</i>
SACZ	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SAMS	Sistema de Monção da América do Sul
TMI	<i>TRMM Microwave Imager</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
VIRS	<i>Visible and InfraRed Scanner</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Área da tempestade elétrica
$FT$	Taxa de raios por tempo [ <i>raios minuto</i> <sup>-1</sup> ]
$FTA$	Taxa de raios por tempo por área [ <i>raios dia</i> <sup>-1</sup> <i>km</i> <sup>-2</sup> ]
$N_{fl}$	Número de flashes
$VT_m$	Tempo médio de visada do LIS
$Z_c$	Fator de refletividade corrigida por atenuação, produto TRMM 2A25
$\mathbf{VT}_{lis}$	Matriz do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície
°C	Grau Celcius
$f_{cdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade cumulativa com duas variáveis
$f_{pdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade com duas variáveis

## 1 METODOLOGIA

Consiste fundamentalmente na construção de um subconjunto de dados provindos das observações dos sensores VIRS, LIS, PR e TMI abordo do satélite TRMM, que estiveram em órbita planetária entre 1998 e 2011.

Foram investigadas 68,230 órbitas do TRMM, juntamente com dados em 17 níveis de pressão das reanálises II do NCEP.

As informações dos diferentes sensores foram combinadas de maneira à identificar sistemas denominados como Tempestades Elétricas.

Para melhor entender as implicações que envolvem a construção de uma base de dados de sistemas individualmente a partir das observações do TRMM, inicialmente descreve-se algumas das principais características operacionais do satélite TRMM.

### 1.1 O SATÉLITE TRMM

O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) faz parte de uma missão conjunta entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration - EUA*) a JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) (SIMPSON et al., 1988). Os instrumentos a bordo do TRMM são; radar de precipitação (PR), radiômetro de microondas (TMI), radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), sistema de energia radiante da terra e das nuvens (CERES) e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS) (KUMMEROW et al., 1998).

Esse satélite possui uma órbita de aproximadamente 320 Km de altura e inclinação de 30°-35° para que possa visitar uma mesma região duas vezes ao dia, em horários distintos, sobre a região tropical do planeta Terra (SIMPSON et al., 1988).

#### 1.1.1 Radar de Precipitação

O PR (*Precipitation Radar*) é um radar que opera na frequência de 13,8 GHz e possui uma resolução horizontal entre 4,3-5 km, 250 m de resolução vertical e uma varredura

215 km. Uma de suas características mais importantes é a capacidade para fornecer a estrutura tridimensional dos hidrometeoros de nuvens, desde a superfície até uma altura de 20 km (KUMMEROW et al., 1998). Para esta pesquisa serão utilizados os dados 2A25 que apresentam o fator de refletividade do radar corrigido por atenuação da chuva (NASA, 2009).

### 1.1.2 Imageador de relâmpagos

O LIS (*Lightning Imaging Sensor*) é um sensor óptico capaz de detectar e localizar relâmpagos em tempestades individuais, analisando a emissão óptica resultante da dissociação, excitação e recombinação dos constituintes atmosféricos, em resposta a ocorrência de descargas atmosféricas. Este sensor CCD<sup>1</sup>, que trabalha no comprimento de onda de 772 nm, identifica descargas nuvem-solo e intranuvens, tanto no período diurno quanto noturno, a partir da amostragem de 500 imagens por segundo. Combinado com a velocidade do satélite (11 km/s) e abertura da CCD, o sensor LIS possui um campo de visão que permite a observação de um ponto na Terra por 80 a 90 s, tempo suficiente para a estimativa da taxa de raios de uma tempestade no momento da observação (CHRISTIAN et al., 1992; NASDA, 2001).

### 1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho

O VIRS (*Visible and InfraRed Scanner*) é um radiômetro passivo que realiza medidas de radiância em 5 bandas espectrais, com comprimentos de onda de 0,63  $\mu\text{m}$ , 1,61  $\mu\text{m}$ , 3,75  $\mu\text{m}$ , 10,8  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ . Sua resolução horizontal atinge 2,11 km no nadir e 720 km de varredura (NASDA, 2001).

Nesta pesquisa, utilizamos apenas o canal 10,8  $\mu\text{m}$ , para estimativa da temperatura de topo de nuvens.

### 1.1.4 Radiômetro de microondas

O TMI (*TRMM Microwave Imager*) é um radiômetro passivo multicanal, 10,65 GHz, 19,35 GHz, 21,3 GHz, 37 GHz, e 85,5 GHz, com dupla polarização. Possui uma varredura cônica combinada com movimento de rotação de sua antena, a qual observa regiões elipsoidais quando projetadas na superfície (KUMMEROW et al., 1998). Sua resolução

<sup>1</sup>Um dos dispositivos eletrônicos utilizados para registro de imagens em câmeras digitais.

horizontal varia entre 6-50 km, dependendo do ângulo entre o feixe e o nadir, e varredura de 760 km (NASDA, 2001).

## 1.2 FONTE DE DADOS

A fonte de dados foi obtida utilizando a infra-estrutura de rede do IAG-USP, aonde os dados foram transferidos a partir do servidor de FTP da NASA (<ftp://disc2.nascom.nasa.gov>) e do NCEP (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>).

Foram baixados os dados de temperatura em altura geopotencial em 17 níveis de pressão das reanálises II do NCEP e os arquivos orbitais do TRMM na versão 7, produtos 1B01, 2A25 e 1B11 para o período entre 1998 e 2011. Nesta etapa um conjunto de *scripts* foi desenvolvido para download e verificação de integridade dos dados baixados. No total o volume de dados atingiu 28 TB.

Os dados do LIS de *flash*, *group*, *events* e *view time* foram concedidos pela pesquisadora Albrecht (2010), quem já possuía essa base de dados no Brasil.

Como as observações globais do PR, LIS, VIRS e TMI entre 1998-2011 representam um volume de aproximadamente 30 TB, a região de estudo foi limitada entre 10N-40S e 91W-30W. Portanto foi feito um recorte nos dados orbitais apenas para esta região que cobre toda a América do Sul, o que reduziu bastante o volume de dados a serem utilizados e tornou o processamento possível perante a infraestrutura computacional do IAG-USP.

## 1.3 RAIOS COM DIFERENTES TAXAS DE DESCARGAS DE RETORNO

O estudo da Morfologia das tempestades foi iniciado pela construção de um algoritmo que fez a extração de perfis verticais do fator de refletividade corrigida por atenuação ( $Z_c$ ), produto 2A25 (IGUCHI et al., 2009), nos pontos de grade onde ocorreram descargas atmosféricas (*flashes*) observadas pelo LIS.

Após a extração dos perfis verticais de  $Z_c$  orientada pela ocorrência de raios, foi constituída uma base de dados com as seguintes características:

- Para cada raio observado pelo LIS existia um perfil vertical de refletividade do radar.
- Além dos 80 níveis verticais de cada perfil de refletividade do radar, temos também a classificação do tipo de chuva identificada pelo produto TRMM 2A25 (convectiva, estratiforme, etc).

- Cada raio (*flash*) possui o seu respectivo número de eventos (pixels da CCD iluminados), número de grupo (grupos de *pixels* iluminados na CCD que compõem o raio), e tempo de duração em milisegundos.

A morfologia da estrutura 3D da precipitação observada pelo PR foi estudada para diferentes classes de perfis separados conforme o número de descargas de retorno (*groups*) de cada raio (*flash*).

Nesta etapa foi investigada se a taxa de descargas de retorno representa maior definição de precipitação em altitude principalmente na região de fase mista, entre 5 e 7 km de altitude.

#### 1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS

Após uma análise ponto a ponto, buscando associar cada raio com um perfil de refletividade do PR, partimos para uma análise de grupo, buscando identificar quais as tempestades elétricas que representam maior intensidade convectiva.

Técnicas numéricas de mudança de eixo ordenados foram utilizadas para projetar as observações orbitais do VIRS, PR e LIS em uma grade regular com  $0,05^\circ$  de resolução, a qual foi utilizada para verificar regiões com medidas coincidentes entre os sensores.

A equação de Planck foi aplicada nos dados de radiância espectral do produto 1B01, canal 4 do VIRS ( $10,8\ \mu\text{m}$ ), e áreas com temperaturas de corpo negro em infravermelho mais frias do que 258 K delimitaram os *clusters* de nuvens. Após, o algoritmo verifica se houve raios detectados pelo LIS na mesma área da nuvem. Havendo pelo menos um raio, o sistema era classificado como uma tempestade elétrica.

Desta forma, cada tempestade elétrica foi armazenada na forma de um arquivo HDF contendo medidas coincidentes do VIRS, LIS e PR. Os arquivos de tempestades elétricas são compostos pelas seguintes informações contidas nos produtos do TRMM:

- VIRS: 1B01 – *latitude*, *longitude*, *Radiance channel 4* ( $10,8\ \mu\text{m}$ )
- PR: 2A25 – *latitude*, *longitude*, *Corrected Z-factor*, *Rain Type*
- LIS: *latitude and longitude of*, *flashes*, *groups*, *events and View Time*

Foram identificadas 154,189 tempestades elétrica e devido a varredura do PR ser

menor do que a do VIRS, apenas 96,281 tiveram pelo menos um perfil de chuva válido observado pelo radar a bordo do satélite.

## 1.5 A TAXA DE RAIOS POR TEMPESTADE ELÉTRICA

A taxa de raios no tempo (FT), foi definida como a razão entre o número de flashes ( $N_{fl}$ ) e o tempo médio ( $VT_m$ ) em que o sensor LIS observou a tempestade elétrica, da mesma forma como foi calcula para as *precipitation features* (CECIL et al., 2005; NESBITT et al., 2000).

A taxa de raios no tempo também foi normalizada pela área da tempestade elétrica ( $A_t$ ), obtendo também o índice da taxa de raios no tempo por área (FTA).

$$FT = \frac{N_{fl}}{VT_m} 60 \text{ [raios minuto}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

$$FTA = \frac{N_{fl}}{VT_m A_t} 86400 \text{ [raios dia}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

Para cada sistema foram calculados os dois índices que podem estar associados com a severidade de tempo, o FT e FTA, conforme mostra as equações 1 e 2 .

## 1.6 DENSIDADES ESPACIAIS DE RAIOS E SISTEMAS

Neste trabalho, buscamos identificar espacialmente as regiões mais eficientes nos processos de eletrificação, as quais possuem pouca densidade de sistemas porém alta densidade de raios em comparação com as demais regiões da América do Sul.

O que se torna fundamental na construção destes mapas é considerar quantas vezes, ou qual o tempo em que o satélite ficou observando cada parte da região de estudo. Qualquer análise de densidade espacial com dados do TRMM que não considere o número de passagens ou tempo em que o sensor observou a região projetada na superfície, será tendenciosa.

Mesmo que o satélite TRMM visite o mesmo lugar do globo duas vezes por dia em função de sua órbita inclinada 35° e velocidade, entre 1998 e 2011, o satélite passou 10,000 vezes mais sobre a região extra-topical do que na região tropical, como mostra a figura 1b, com todas as órbitas e as varreduras do VIRS projetadas e acumuladas sobre a América do Sul.

Fazendo o acumulado do tempo de visada do LIS na superfície, como mostra a figura 1a, observa-se que em 14 anos o LIS passou 10 dias a mais na latitude -34°S do que em 0°.

Na figura 1, estão representadas duas matrizes que correspondem aos pontos de uma grade igualmente espaçada (grade regular), com  $0,25^\circ$  de resolução, projetada sobre a América do Sul. A matriz ( $\mathbf{VT}_{lis}$ ) do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície e a matriz ( $\mathbf{VT}_{virs}$ ), do número de vezes que o satélite passou conforme o tamanho da varredura do radiômetro VIRS na superfície.

Com as mesmas dimensões e resolução de grade que o tempo de observação e o número de passagens do satélite foram acumulados em duas matrizes, os raios foram acumulados na matriz ( $\mathbf{FL}_{lis}$ ) e todos os pixels do VIRS com radiância espectral associada com temperaturas de brilho inferiores a 258 K e que definiram as áreas das tempestades elétricas, foram acumulados na matriz ( $\mathbf{P}_{te}$ ) que representa os locais com maior cobertura de nuvens de tempestades elétricas.

A matriz  $\mathbf{FL}_{lis}$  projeta sobre a América do Sul está representada na figura 2a e a matriz  $\mathbf{P}_{te}$ , na figura 2b. Principalmente na figura 2b é notável o alto número de sistemas na região Sul da AS, com mesma ordem de magnitude do que em locais ao Norte aonde atua a Zona de Convergência Intertropical. Mas esse máximo no Sul da AS não indica maior ocorrência de tempestades elétricas e sim maior frequência de passagem do satélite TRMM.

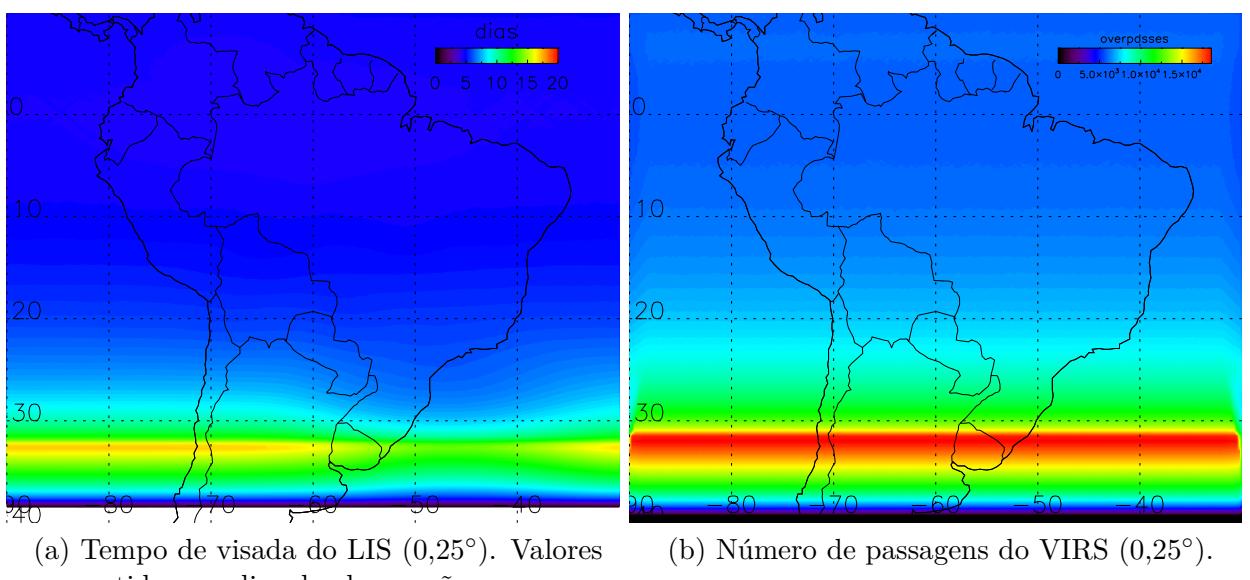


Figura 1: Observações do TRMM sobre a América do Sul.

Mesmo que as matrizes representem pontos em uma grade com espaçamento angular regular, as áreas de cada ponto da grade não são iguais, pois o comprimento de arco de  $0,25^\circ$  na direção zonal depende da latitude da região. Assim a matriz que corresponde à área da grade regular ( $\mathbf{A}_g$ ) foi calculada e considerada nos cálculos de densidades espaciais.

Portanto, a densidade espacial de raios ( $\mathbf{DE}_{fl}$ ) é calculada conforme a equação 3. Note que a razão de  $\mathbf{FL}_{lis}$  por  $\mathbf{VT}_{lis}$  e  $\mathbf{A}_g$  é multiplicada por  $24 \times 60 \times 60 \times 365,25$ , o que converte o tempo de observação do LIS de segundos para anos. Então as densidades espaciais de raios, possuem dimensões de número de [raios] por [tempo] por [quilômetro quadrado].

No mesmo caminho as densidades espaciais de tempestades elétricas ( $\mathbf{DE}_{te}$ ) foram obtidas conforme a equação 4. Porém a constante de conversão de tempo na equação 4 é diferente da equação 3, pois o tempo que o VIRS observou a AS, foi estimado a partir do número de vezes que o satélite passou sobre a AS e considerando que cada ponto da grade na órbita foi observado por 90 segundos.

Portanto ao converter a matriz  $\mathbf{VT}_{virs}$  para segundos de observação, temos um fator de 90 no denominador, que está implícito na equação 4.

$$\mathbf{DE}_{fl} = \frac{\mathbf{FL}_{lis}}{\mathbf{VT}_{lis}\mathbf{A}_g} 31557600 \text{ [raios ano}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (3)$$

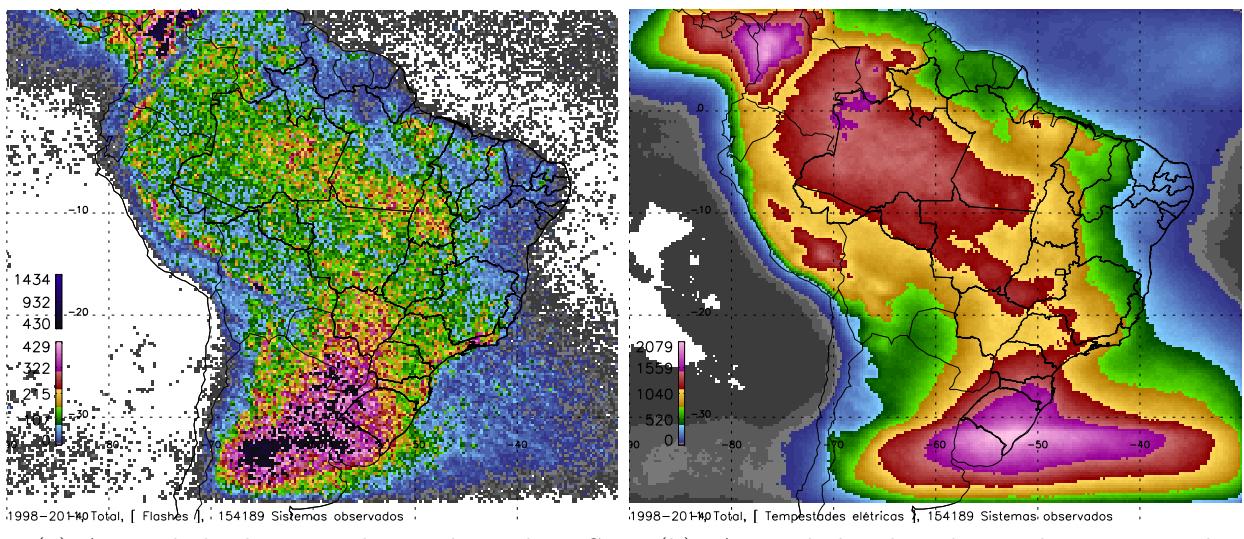


Figura 2: Acumulados dos raios e áreas das 154,189 tempestades elétricas identificadas.

$$\mathbf{DE}_{te} = \frac{\mathbf{P}_{te}}{\mathbf{V}\mathbf{T}_{virs}\mathbf{A}_g} 350640 \text{ [sistemas ano}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (4)$$

## 1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA 3D DA PRECIPITAÇÃO

O estudo para descrever a morfologia da precipitação foi realizado com base nas observações do PR, buscando avaliar como a precipitação está distribuída nos níveis de altitude e como os perfis de  $Z_c$  estão associados com os processos de crescimento de hidrometeoros e de eletrificação.

A partir dos perfis de  $Z_c$  selecionados pelo algoritmo de identificação de tempestades elétricas, foi estudada a probabilidade de ocorrência de  $Z_c$  por altitude. Desta forma, foram obtidos Diagramas de Contorno de Frequência por Altitude, os CFADs.

Conforme descrevem Yuter e Houze Jr. (1995), primeiramente obteve-se uma função de densidade de probabilidade com duas variáveis ( $f_{pdf}(x, y)$ ), cuja a dimensão  $x$  correspondeu à valores de  $Z_c$  e  $y$  os nível de altitude do PR. A função  $f_{pdf}(x, y)$ , foi representada numericamente por uma matriz bidimensional com a granularidade de 1 dBZ para cada 250 m de altitude.

Para a obtenção dos diagramas de probabilidade normalizados por nível de altitude, cada nível  $y$  da função  $f_{pdf}(x, y)$  foi normalizado pelo número total de ocorrências de valores de  $Z_c$  distribuídos em  $x$ . Os níveis  $y$  de altitude com número total de ocorrência de  $Z_c$  em  $x$ , menor do que 10% do nível de máxima ocorrência, foram desconsiderados dos contornos de probabilidade em todos os CFADs.

Com base na função de densidade de probabilidade ( $f_{pdf}(x, y)$ ) que definiu cada CFAD, foi calculada a função densidade de probabilidade cumulativa ( $f_{cdf}(x, y)$ ) de  $Z_c$  por altitude, que originaram os Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude (CCFAD).

Os CCFADs auxiliam a investigar quais as diferenças entre os perfis de  $Z_c$  associados à diferentes quantis da amostra de probabilidade, elucidando ainda mais as informações contidas nos CFADs.

### 1.7.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos

Em Fabry e Zawadzki (1995), é mostrado que processos como a agregação, acreção e colisão coalescência, podem ser estudados em função da espessura da camada de derretimento e flutuações nos valores do fator de refletividade no perfil atmosférico.

Pois, sendo o fator de refletividade do radar proporcional ao diâmetro das gotas no volume iluminado elevado a 6 potência, os processos de crescimento de flocos de neves, granizo e gotas, são marcados por aumentos abruptos no fator de refletividade do radar.

E considerando um regime de precipitação estratiforme, o qual é muito mais governado por processos de agregação do que acreção, será observado um aumento acentuado no fator de refletividade do radar em torno da isotermia de 0 °C associado ao derretimento de flocos de neve. Como o índice de refração de micro-ondas no gelo é de ~0,1 e na água líquida de ~0,9, a transição de fase sólida para líquida representa um aumento de 7 dBZ na potência do sinal do radar.

Em um ambiente de precipitação convectiva a transição de fase é perturbada por correntes ascendentes e os processos de agregação, acreção e colisão coalescência, os quais são os maiores responsáveis pelo aumento do diâmetro dos hidrometeoros de nuvem, tornam-se mais eficientes.

A mudança do índice de refração da água não ocorre em torno de 0 °C, pois no ambiente convectivo teremos água super-resfriada em temperaturas de -15 °C, o que intensifica o processo de acreção podendo gerar gelo sólido que cai até a superfície.

Portanto, quanto maior a espessura da camada de derretimento, podemos pressupor que, o ambiente terá maior intensidade convectiva, pois terá processos de crescimento de granizo mais ativos.

Consequentemente, a taxa de raios associa-se com a intensidade convectiva devido a acreção<sup>2</sup> ser o processo mais eficiente de eletrificação de nuvens, principalmente quando há presença de flocos de neve embebidos na região de fase mista (TAKAHASHI, 1978; TAKAHASHI; MIYAWAKI, 2002).

Então, objetivando uma análise dos processos de crescimento de hidrometeoros no perfil atmosférico e na mesma óptica de trabalhos como Takahashi (1978), Saunders et al. (1999), Takahashi e Miyawaki (2002), Ávila et al. (2009), ou seja, em função de

<sup>2</sup>A acreção é o processo de *rimming* descrito no trabalho de Takahashi (1978).

diferentes condições de temperatura, nesta pesquisa construímos o diagrama denominado como Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD), .

Nos CFTDs, os níveis de temperatura não correspondem as condições controladas em laboratório, e sim às variações de temperatura do perfil atmosférico.

Foram utilizados os dados de reanálises II do NCEP entre 1998 e 2011, mais especificamente os dados em 17 níveis de pressão, de altura geopotencial e temperatura (KANAMITSU et al., 2002).

Os perfis de altura geopotencial e temperatura mais próximos ou coincidentes com cada região de tempestade elétrica observada pelo TRMM, foram extraídos. Utilizando interpolação de dados, os 80 níveis de altitudes referentes as observações do PR, foram convertidos em 80 níveis de temperatura.

Desta maneira, obteve-se a função  $f_{pdf}(x, y)$ , cuja a dimensão  $x$  correspondeu à valores de  $Z_c$  e  $y$  os nível de temperaturas estimados a partir das reanálises II do NCEP. A função  $f_{pdf}(x, y)$  de  $Z_c$  por temperatura, foi representada por uma matriz bidimensional com a granularidade de 1 dBZ para cada 2 °C. Nos CFTDs, os níveis superiores e inferiores foram definidos para temperaturas entre 20° C e -50° C.

Também foi calculada a função  $f_{cdf}(x, y)$  de  $Z_c$  por temperatura, que originaram os Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura (CCFTD).

## 2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL

O Marco das tempestades elétricas descreve os locais e quando estes sistemas ocorrem na América do Sul. Determina-se a sazonalidade, o ciclo diurno, a distribuição espacial de raios e das tempestades elétricas.

### 2.1 CICLO DIURNO E CICLO ANUAL

Utilizando a base de dados de tempestades elétricas construída nesta pesquisa, foi estudada a frequência de ocorrências dos sistemas no decorrer das horas do dia, figura 3a, e meses do ano, figura 3b. Deste modo, obtivemos na figura 3, o ciclo diurno e anual das tempestades elétricas por meio da distribuição de probabilidade de ocorrências.

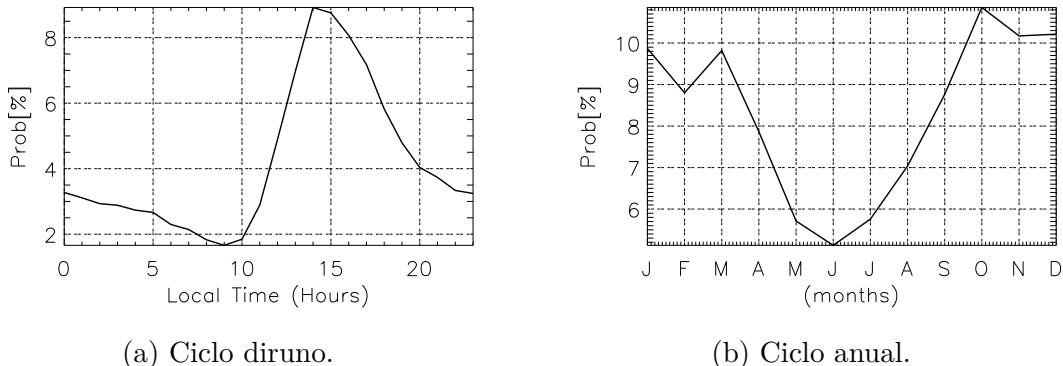


Figura 3: Ciclo diurno e anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 154,189 sistemas identificados.

A figura 3a, mostra que, entre 14h e 15h as tempestades elétricas são mais prováveis, indicando que o aquecimento da superfície do continente e o aumento da camada limite planetária no decorrer do dia são ingredientes que podem aumentar a probabilidade de ocorrência em até 4,6 vezes em relação aos horários de menor fluxo de calor sensível para a atmosfera. Enquanto o TRMM observou 2312 tempestades elétricas às 9h (hora local), às 14h foram observadas 13,877.

No ciclo anual, conforme mostra a figura 3b, observa-se que a estação de tempestades elétricas na América do Sul possui dois picos, um em outubro e outro em março, porém contempla os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março. A maior probabilidade de ocorrência esteve associada ao mês de outubro, que concentrou 16,961 tempestades elétricas observadas em 14 anos.

O ciclo diurno também foi estudado para cada região de 10 por 10 graus, como mostra a figura 4.

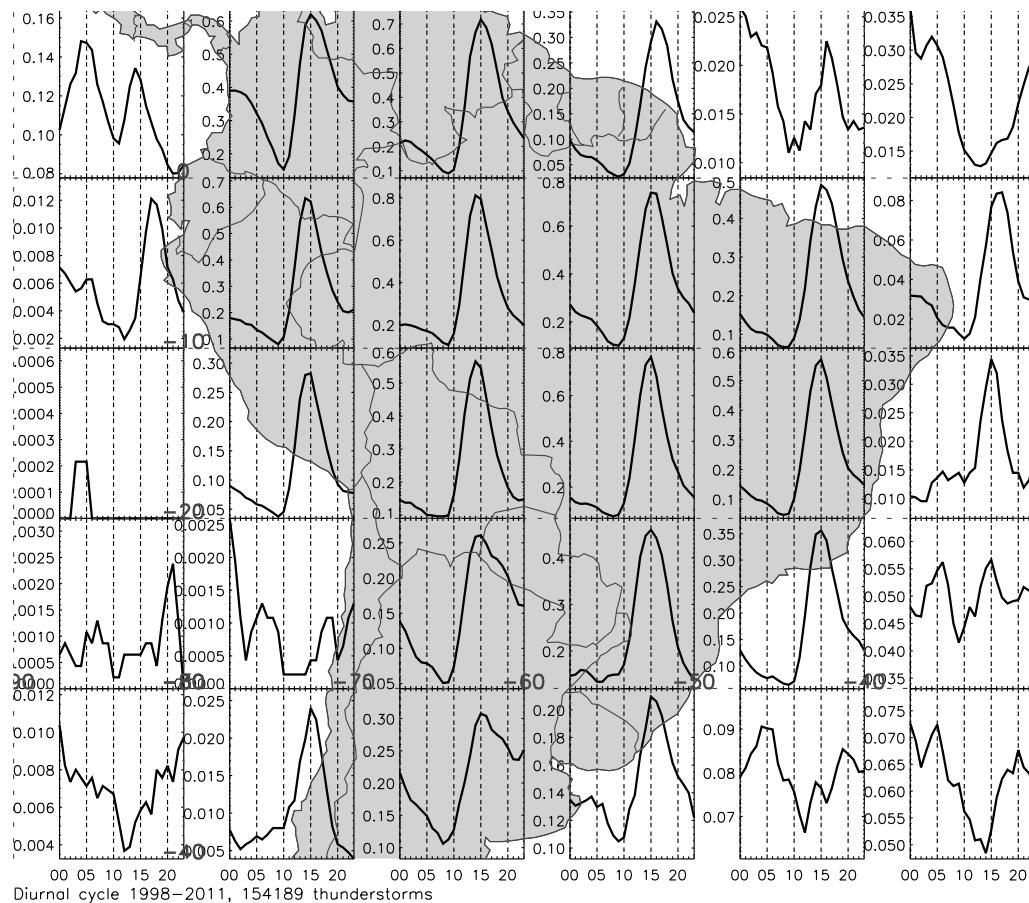


Figura 4: Ciclo diurno em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 154,189 sistemas observados.

Mesmo que em uma análise geral mostre a importância do aquecimento superficial do continente para a ocorrência de tempestades elétricas, sistemas noturnos sobre a Colômbia e Venezuela são bastante frequentes. Na figura 4, entre  $0^{\circ}$ – $10^{\circ}$  Norte e  $80^{\circ}$ – $70^{\circ}$  Oeste, às 0h em hora local, temos o maior valor de probabilidade (0.4%) de tempestades elétricas noturnas da América do Sul, o que representou um número de 617 sistemas observados em 14 anos, apenas entre 0h e 00:59h.

A circulação de vale e montanha associada com a topografia elevada na Colômbia,

principalmente a região do Parque Nacional Natural Paramillo, e o Lago Maracaibo na Venezuela, combinados com a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), promovem condições para o desenvolvimento de tempestades elétricas noturnas de maneira mais eficiente do que as demais regiões.

No Oceano Pacífico, entre  $0^{\circ}$ – $10^{\circ}$  Norte e  $90^{\circ}$ – $80^{\circ}$  Sul abrangendo o Parque Nacional da Ilha do Coco na Costa Rica e parte das ilhas Galápagos no Equador, foi a região oceânica com a maior probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas. Esta possui um ciclo diurno duplo de tempestades elétricas. Elas ocorrem às 4h, em hora local, e às 14h. A maior probabilidade de ocorrência (0.15%) foi observada às 4h, que correspondeu à 231 sistemas.

No Pacífico Sul, as tempestades elétricas são mais raras do que as demais regiões devido a atuação permanente da subsidência da Célula de Hadley, que modula a Alta Subtropical do Pacífico Sul, responsável também por regiões como o Deserto do Atacama e parte do semi-árido Argentino.

Na região do Atlântico Subtropical, a probabilidade de tempestades elétricas é maior do que no Atlântico Norte. A passagem de sistemas transitantes entre  $40^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Sul e  $50^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Oeste e  $30^{\circ}$ – $20^{\circ}$  Sul e  $40^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Oeste, gera maior número de tempestades elétricas oceânicas do que com a atuação da ITCZ no Atlântico Tropical. Observa-se também que nas regiões oceânicas o ciclo diurno das tempestades elétricas indica maior atividade noturna e não às 14-15h igual no continente.

O pico de atividade de tempestades elétricas durante o ciclo diurno, figura 4, ocorreu entre  $10^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $70^{\circ}$ – $50^{\circ}$  Oeste e  $20^{\circ}$ – $10^{\circ}$  Sul e  $60^{\circ}$ – $50^{\circ}$  Oeste. Em cada uma destas três caixas, observou-se a probabilidade de aproximadamente 0.8% entre as 14h e 15h, mostrando que em toda esta região, o TRMM observou uma média de 3 tempestades elétricas a cada 2 dias para apenas estas duas horas do dia.

Entre  $30^{\circ}$ – $20^{\circ}$  Sul e  $60^{\circ}$ – $50^{\circ}$  Oeste, na figura 4, região de grande atividade de Sistemas Convectivos de Meso-escala (MCS) conforme descrevem Durkee e Mote (2009), encontra-se um máximo durante a tarde e os sistemas noturnos tiveram probabilidade de ocorrência 2.7 vezes menor do que os valores encontrados sobre os vales na Colômbia e Venezuela, mostrando que a ocorrência dos MCS ao Sul da América do Sul com ciclo de vida maior do que 9h ou com formação noturna, não possuem probabilidade de ocorrência que destaca-se em relação as demais regiões continentais, mesmo neste banco de dados composto apenas por tempestades elétricas. Na figura 5, há um máximo de atividade em outubro que antecede a estação de tempestades elétricas entre dezembro e março. O máximo é

observado em janeiro com 1234 sistemas identificados na região.

A tabela 3 mostra os meses de duração das estações de tempestades elétricas com base na estudo mostrado na figura 5. Os períodos em que a probabilidade de ocorrência de sistemas foram superiores à 0.7 do máximo observado na região, foram considerados como os períodos das estações de tempestades elétricas.

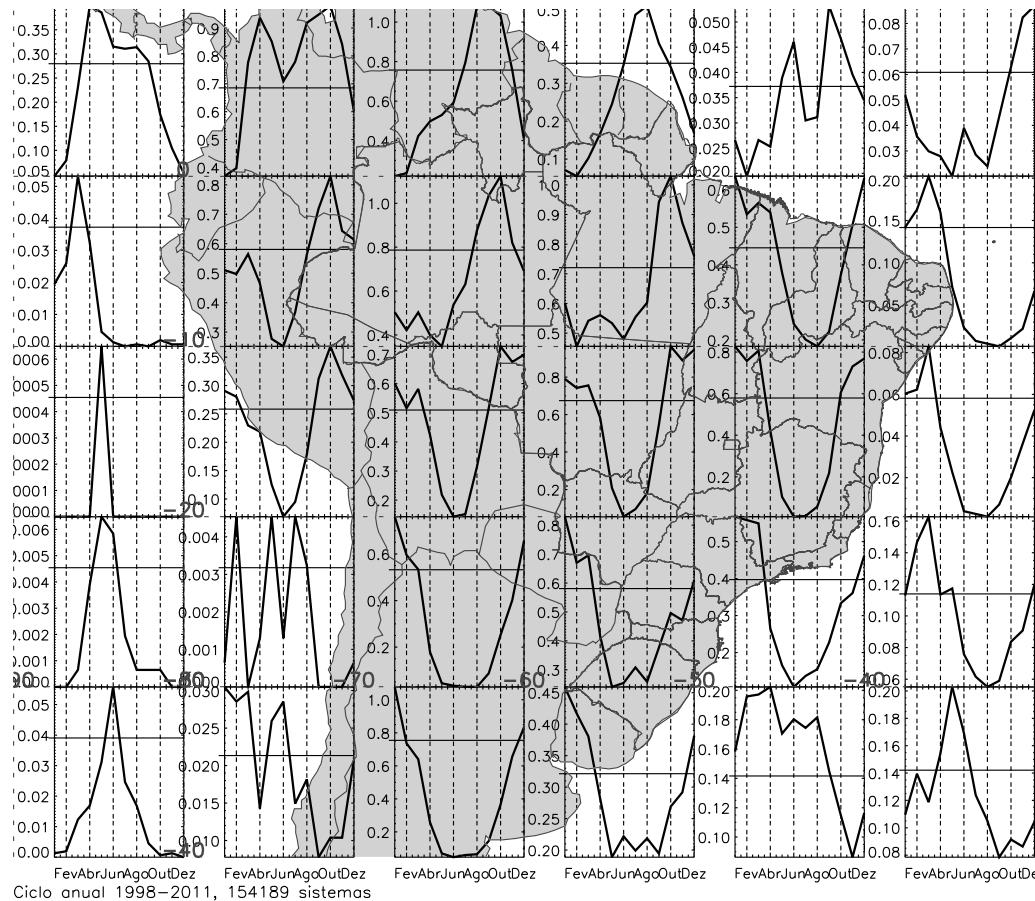


Figura 5: Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 154,189 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, utilizado como limiar para definir o início e fim das estações de tempestades elétricas.

Na região entre o clima semi-árido na Argentina e parte da Bacia do Prata, entre 40°–20° Sul e 70°–60° Norte, figura 5, local das tempestades mais severas e convecção mais profunda da América do Sul como apontam Cecil et al. (2005), Romatschke e Houze (2010), foi encontrada a estação de tempestades elétricas mais curta e bem definida. Entre maio e agosto a probabilidade de ocorrência de sistemas é praticamente 0%, enquanto a estação de tempestades elétricas se define entre dezembro e janeiro.

As estações de tempestades elétricas se configuraram conforme o Sistema de Monção da América do Sul (SAMS) (ZHOU; LAU, 1998; MARENGO et al., 2012). Na região central

Tabela 3: Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus.

	Localização	Número de sistemas	Estação (meses)	Duração (meses)	Máximo
1	0°–10°N, 90°–80°O	4159	Abr–Set	6	Abr
2	0°–10°N, 80°–70°O	14,047	Mar–Nov	9	Out
3	0°–10°N, 70°–60°O	11,787	Jul–Out	4	Set
4	0°–10°N, 60°–50°O	4868	Jul–Set	3	Ago
5	0°–10°N, 50°–40°O	645	Mai–Jun, Set–Nov	5	Set
6	0°–10°N, 40°–30°O	821	Out–Dez	3	Dez
7	10°–0°S, 90°–80°O	217	Mar	1	Mar
8	10°–0°S, 80°–70°O	9721	Set–Dez	4	Out
9	10°–0°S, 70°–60°O	12,168	Ago–Nov	4	Out
10	10°–0°S, 60°–50°O	12,231	Set–Dez	4	Out
11	10°–0°S, 50°–40°O	7731	Jan–Abr, Nov–Dez	6	Jan
12	10°–0°S, 40°–30°O	1349	Jan–Abr	4	Mar
13	20°–10°S, 90°–80°O	1	–0–	1	Mai
14	20°–10°S, 80°–70°O	4254	Jan–Fev, Set–Dez	6	Out
15	20°–10°S, 70°–60°O	8585	Jan–Mar, Set–Dez	7	Out
16	20°–10°S, 60°–50°O	10,414	Jan–Mar, Out–Dez	6	Out
17	20°–10°S, 50°–40°O	8201	Jan–Mar, Out–Dez	6	Jan
18	20°–10°S, 40°–30°O	611	Jan–Mar	3	Mar
19	30°–20°S, 90°–80°O	32	Mai–Jun	2	Mai
20	30°–20°S, 80°–70°O	32	Fev, Mai, Jul–Ago	4	Fev, Mai, Jul
21	30°–20°S, 70°–60°O	5558	Dez–Mar	4	Jan
22	30°–20°S, 60°–50°O	8676	Dez–Mar	4	Jan
23	30°–20°S, 50°–40°O	5996	Dez–Mar	4	Jan
24	30°–20°S, 40°–30°O	1849	Fev–Mar, Mai, Dez	4	Mar
25	40°–30°S, 90°–80°O	258	Jun	1	Jun
26	40°–30°S, 80°–70°O	370	Jan–Mar, Mai–Jun	5	Jan
27	40°–30°S, 70°–60°O	7638	Dez–Jan	2	Jan
28	40°–30°S, 60°–50°O	5403	Dez–Mar	4	Jan
29	40°–30°S, 50°–40°O	2966	Jan–Set	9	Abr
30	40°–30°S, 40°–30°O	2288	Abr–Jun	3	Mai

da América do Sul, observa-se que com o aumento da temperatura da superfície entre julho e setembro, o máximo de precipitação começa a se deslocar do Hemisfério Norte

para o Hemisfério Sul e desta forma iniciando a estação chuvosa meridional pela região Oeste da Bacia Amazônica (MARENGO et al., 2012; GRIMM, ; REBOITA et al., 2010).

Entre  $10^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $80^{\circ}$ – $60^{\circ}$  Norte, na figura 5, observa-se que o pico da estação de tempestades elétricas ocorreu em outubro, nos primeiros passos da estação chuvosa da América do Sul. Porém o máximo de precipitação nesta região ocorre depois de 4 ou 5 meses.

Em Petersen e Rutledge (2001), o estudo realizado referente a estrutura tridimensional da precipitação observada pelo TRMM sobre a região Central da Amazônia, mostrou que a convecção mais profunda ocorre também na transição do período seco para o chuvoso, exatamente quando começa a reversão sazonal do vento em baixos níveis associado ao SAMS conforme apontam Zhou e Lau (1998).

Com o início do verão, o máximo de precipitação caminha até a região Centro Oeste e Sudeste do Brasil. Em janeiro, o SAMS se configura mais ativamente com a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ) e intensificação do Jato de Baixos Níveis (JBN). A atuação do JBN, principalmente nas regiões abaixo de  $20^{\circ}$  Sul, ativa a estação chuvosa e de tempestades elétricas em sincronismo.

Durante abril e maio, o SAMS vai se desconfigurando e o máximo de chuva começa a retornar para o Hemisfério Norte caminhando de Sudeste para o Nordeste do Brasil e subindo pelo lado Leste da Bacia Amazônica. Neste retorno é que ocorrem os máximos de precipitação em toda a região da Bacia Amazônica, porém o máximo de ocorrência de atividade elétrica ocorreu na vinda da estação chuvosa para o Hemisfério Sul.

Na região Nordeste do Brasil, entre  $10^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $40^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Norte, o máximo de chuva ocorre juntamente com o máximo de ocorrência de tempestades elétricas, depois da atuação da SACZ no continente.

## 2.2 DENSIDADES ESPACIAIS

Considerando o método descrito em 1.6, referente ao cálculo da densidade de tempestades elétricas, equação 4, e densidade de raios, equação 3, nesta subseção será possível avaliar se as regiões aonde ocorrem o maior número de sistemas, correspondem as regiões com maior número de raios.

Na figura 6a, observa-se que as regiões de máxima ocorrência de tempestades elétricas estão situadas sobre a Colômbia e região central da Bacia Amazônica, abrangendo a parte

brasileira, colombiana, venezuelana e peruana.

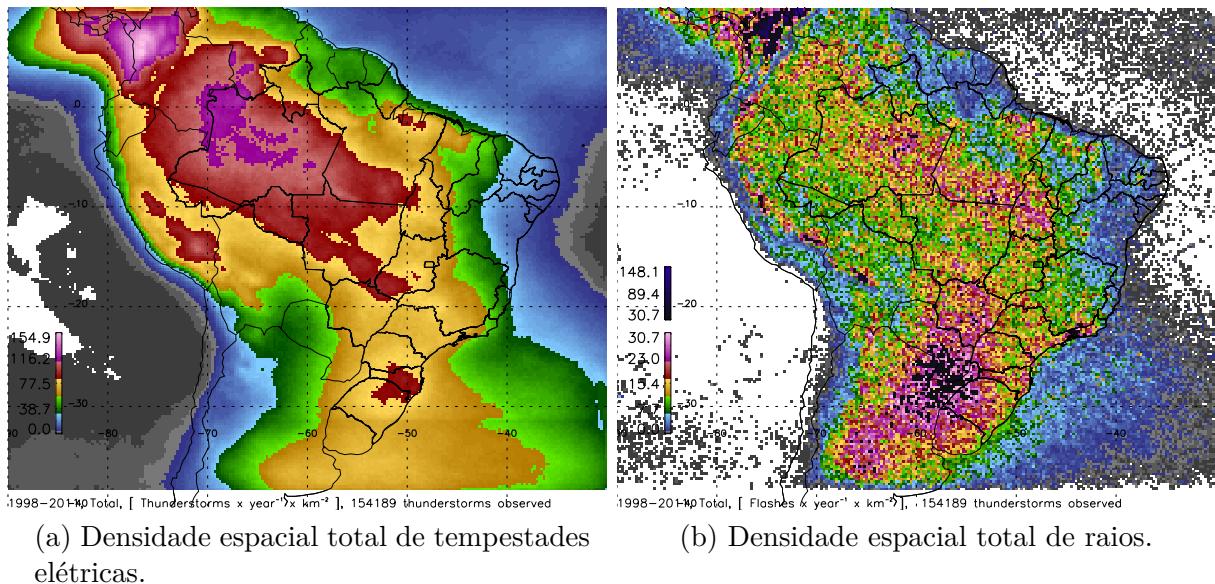


Figura 6: Densidade espacial de tempestades elétricas e raios observados entre 1998 e 2011.

Mesmo que os sistemas com as maiores taxas de raios no tempo observados pelo TRMM, estejam mais concentrados no Sul da América do Sul conforme mostram Cecil et al. (2005), Zipser et al. (2006), as tempestades elétricas são bem mais frequentes à Noroeste da AS.

A ITCZ e os mecanismos de convergência de umidade e liberação de calor latente/- sensível na Floresta Amazônica, associados intimamente com a manutenção da Alta da Bolívia, são os principais propulsores de tempestades elétricas da América do Sul.

As regiões de máxima ocorrência de sistemas correspondem as regiões de máxima precipitação.

aonde atua a ZCIT e ocorre grande fluxo de calor da floresta

As regiões com taxa de flashes superior a  $36\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$  na Amazônia, possuem acima de 150 tempestades elétricas  $\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$ . Na região da Argentina e Paraguai, as mesmas taxas de flashes são atingidas, mas com uma taxa de sistemas em torno de  $60\text{km}^{-2}\text{ano}^{-1}$ .

Na figura 7, o view time foi acumulado para o período de cada estação do ano (DJF, MAM, JJA, SON), para os 14 anos de dados, e a taxa de tempestades elétricas e de flashes foram calculadas em concentração por  $\text{km}^{-2}\text{dia}^{-1}$  para cada estação.

Apesar da figura 3 mostrar que em outubro, novembro e dezembro temos maior probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas sobre o continente, a figura 8d mostra qual

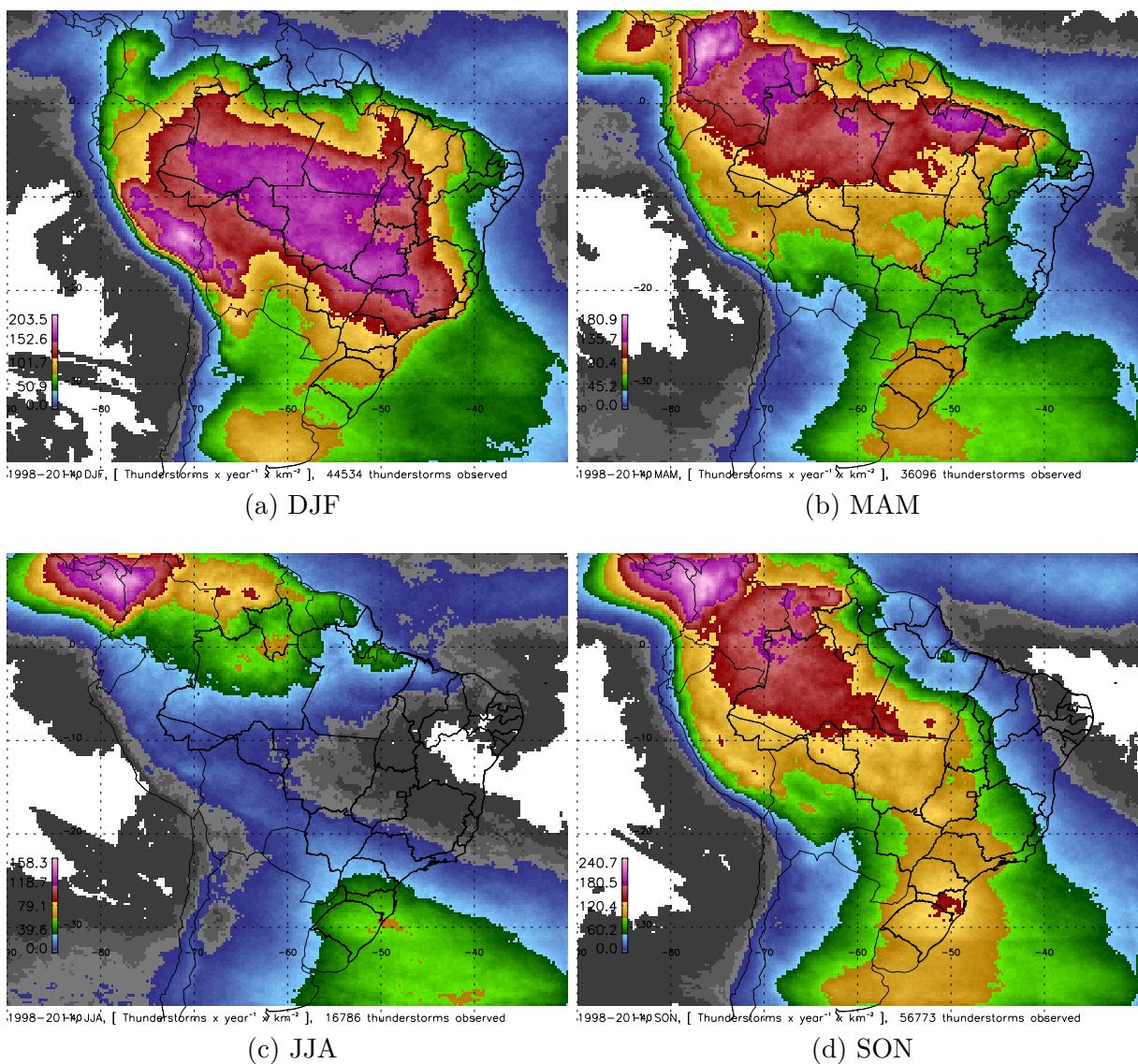


Figura 7: Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas

a distribuição espacial desses sistemas e qual a taxa de raios que os sistemas produziram.

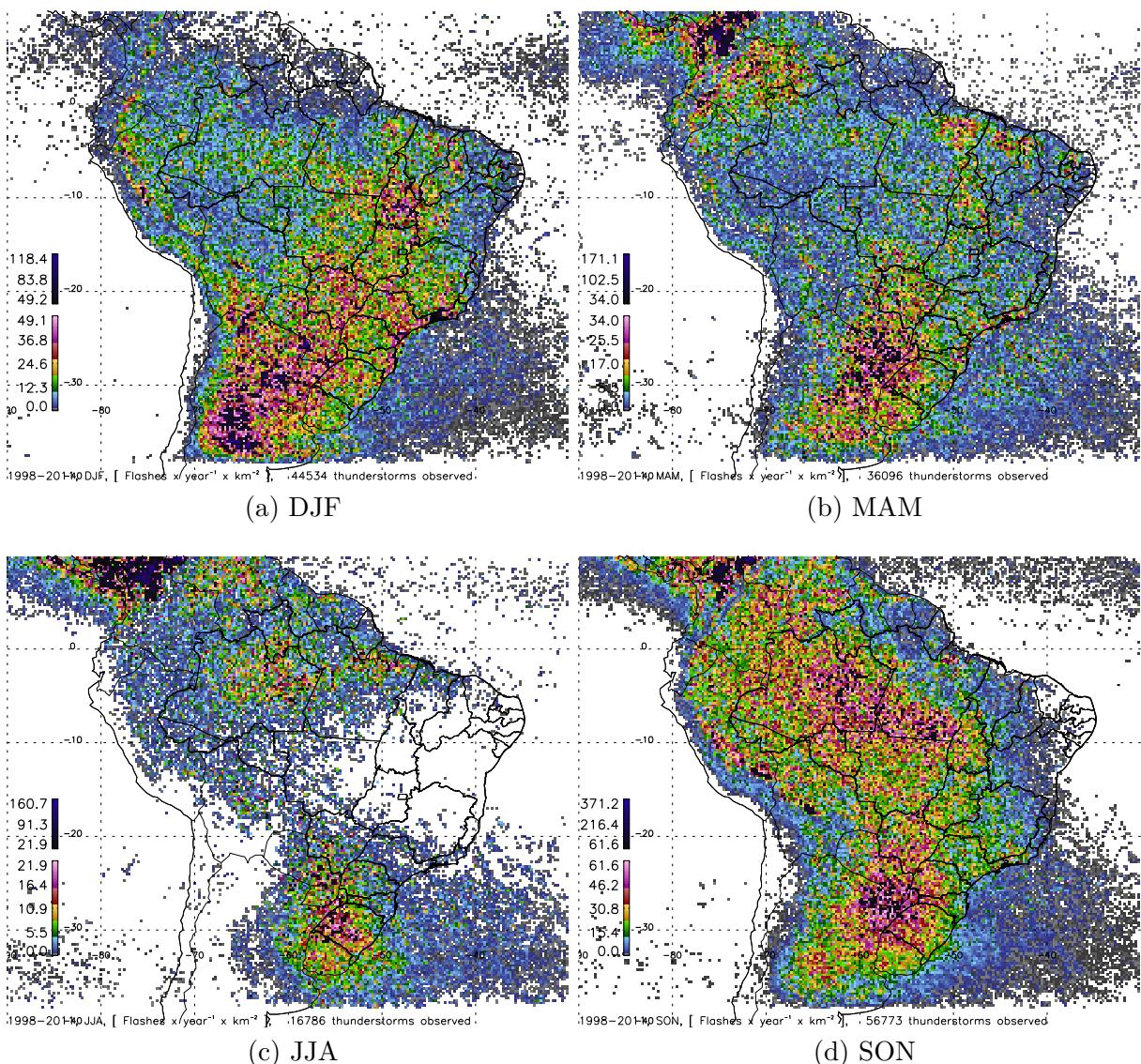


Figura 8: Densidade espacial sazonal de raios

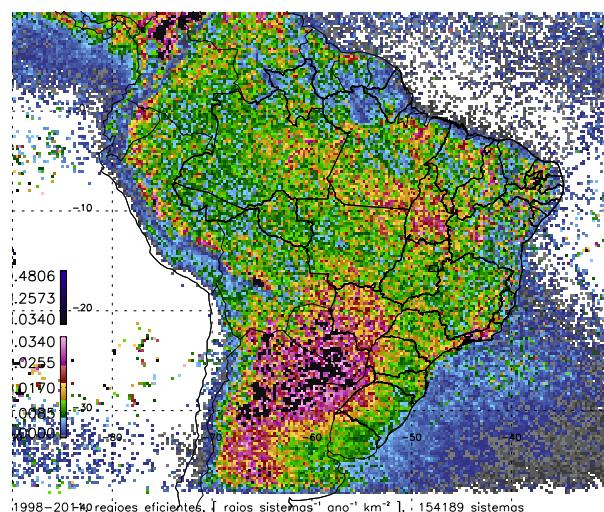


Figura 9: Eficiencia de tempestade

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I. **Comunicação Pessoal**. São Paulo: [s.n.], 2010.
- CECIL, D.; GOODMAN, S.; BOCCIPPIO, D.; ZIPSER, E.; NESBITT, S. Three years of trmm precipitation features. part i: Radar, radiometric, and lightning characteristics. **Mon. Wea. Rev.**, v. 133, p. 543–566, 2005.
- CHRISTIAN, H. J.; RICHARD, J. B.; J., G. S. **Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System**. Alabama, 1992. 193 p. NASA Technical Memorandum TM-4350.
- DURKEE, J. D.; MOTE, T. L. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 30, n. 3, p. 418–431, 2009. ISSN 08998418. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1893/abstract>>.
- FABRY, F.; ZAWADZKI, I. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 7, p. 838–851, 1995. ISSN 0022-4928.
- GRIMM, A. M. The el niño impact on the summer monsoon in brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16.
- IGUCHI, T.; KOZU, T.; KWIATKOWSKI, J.; MENEGHINI, R.; AWAKA, J.; OKAMOTO, K. Uncertainties in the rain profiling algorithm for the trmm precipitation radar. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 87A, p. 1–30, 2009.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.; HNILO, J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. Ncep–doe amip-ii reanalysis (r-2). **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, p. 1631–1643, 2002. Doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The tropical rainfall measuring mission (trmm) sensor package. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 15, p. 809–817, 1998.
- MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; Silva Dias, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1–21, 2012.
- NASA. **TRMM Product Level 2A Precipitation Radar (PR) Rainfall Rate and Profile**. 2009. Disponível em: <[http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation-documentation/TRMM README/TRMM\\_2A25\\_readme.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation-documentation/TRMM README/TRMM_2A25_readme.shtml)>. Acesso em: 28 jan. 2010.

- NASDA. **TRMM Data Users Handbook.** National Space Development Agency of Japan: [s.n.], 2001.
- NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J. A Census of Precipitation Features in the Tropics Using TRMM: Radar, Ice Scattering, and Lightning Observations. **Journal of Climate**, v. 13, n. 23, p. 4087–4106, 2000. ISSN 08948755.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. Regional Variability in Tropical Convection : Observations from TRMM. **Journal of Climate**, v. 14, p. 3566–3586, 2001.
- REBOITA, M.; GAN, M.; ROCHA, R. d.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.
- ROMATSCHKE, U.; HOUZE, R. A. Extreme Summer Convection in South America. **Journal of Climate**, AMER METEOROLOGICAL SOC, v. 23, n. 14, p. 3761–3791, 2010. ISSN 08948755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JCLI3465.1>>.
- SAUNDERS, C.; AVILA, E.; PECK, S.; CASTELLANO, N.; VARELA, G. A. A laboratory study of the effects of rime ice accretion and heating on charge transfer during ice crystal/graupe collisions. **Atmospheric Research**, v. 51, p. 99–117, mar. 1999.
- SIMPSON, J.; ADLER, R.; NORTH, G. A proposed tropical rainfall measuring mission (trmm) satellite. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 69, p. 278–295, 1988.
- TAKAHASHI, T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, v. 35, p. 1536–1548, 1978.
- TAKAHASHI, T.; MIYAWAKI, K. NOTES AND CORRESPONDENCE Reexamination of Riming Electrification in a Wind Tunnel. n. 1980, p. 1018–1025, 2002.
- YUTER, S. E.; Houze Jr., R. A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of florida cumulonimbus. part ii: Frequency distribution of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. **J. Appl. Meteor.**, v. 123, p. 1941–1963, 1995.
- ZHOU, J.; LAU, K.-M. Does a Monsoon Climate Exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, 1998. ISSN 0894-8755.
- ZIPSER, E.; CECIL, D.; LIU, C.; NESBITT, S.; YORTY, D. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 1057–1071, 2006.
- ÁVILA, E. E.; CASTELLANO, N. E.; SAUNDERS, C. P. R.; BüRGESSER, R. E.; VARELA, G. G. A. Initial stages of the riming process on ice crystals. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 9, p. n/a–n/a, 2009. ISSN 1944-8007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2009GL037723>>.