

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

1	Principais características das observações do PR (NASDA, 2001) . . . . .	14
2	Ilustração do algoritmo de identificação de <i>events</i> , <i>groups</i> e os <i>flashes</i> do LIS (CHRISTIAN et al., 2000). . . . .	15
3	Número de observações do VIRS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). . . . .	19
4	Tempo de amostragem ( <i>View time</i> ) do LIS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). . . . .	20
5	Acumulado de raios ( <i>flashes</i> ) observados pelo LIS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). . . . .	21
6	Acumulado das 157,592 tempestade elétrica ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). . . . .	22
7	Ciclo diurno das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados. . . . .	25
8	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 157,592 sistemas observados. . . . .	26
9	Ciclo anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados. . . . .	28
10	Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus de latitude e longitude. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, utilizado como limiar para definir as estações de tempestades elétricas. . . . .	29
11	Densidade espacial total de tempestades elétricas. Os valores correspondem ao número de sistemas por ano por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus. . . . .	33

12	Densidade espacial total de raios. Os valores correspondem ao número de raios por ano por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus. . . . .	34
13	Densidade espacial sazonal de raios. . . . .	36
14	Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas. . . . .	37
15	Eficiencia de tempestade . . . . .	39

## **LISTA DE TABELAS**

3	Variáveis dos produtos do TRMM que foram utilizadas na identificação e descrição das tempestades elétricas. . . . .	17
4	Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus de latitude longitude. . . . .	30
5	Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano. . . . .	36

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>11</b>
<b>1 METODOLOGIA</b>	<b>13</b>
1.1 O SATÉLITE TRMM . . . . .	13
1.1.1 Radar de Precipitação . . . . .	14
1.1.2 Imageador de relâmpagos . . . . .	14
1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho . . . . .	16
1.2 REANÁLISES (R2) DO NCEP-DOE . . . . .	16
1.3 DADOS . . . . .	16
1.4 AS TEMPESTADES ELÉTRICAS . . . . .	17
1.5 A TAXA DE RAIOS . . . . .	18
1.6 DENSIDADE GEOGRÁFICA DE RAIOS E SISTEMAS . . . . .	18
1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DA PRECIPITAÇÃO	23
1.7.1 Distribuições de probabilidades com a altitude . . . . .	23
1.7.2 Distribuições de probabilidades com a temperatura . . . . .	24
<b>2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL</b>	<b>25</b>
2.1 CICLO DIURNO . . . . .	25
2.2 CICLO ANUAL . . . . .	28
2.3 DENSIDADES GEOGRÁFICAS . . . . .	32
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	América do Sul
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
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JJA	Junho, julho e agosto
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
MAM	Março, abril e maio
MCS	Sistemas Convectivos de Meso-escala
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCEP–DOE	<i>National Centers for Environmental Prediction – Department of Energy</i>
NCEP–NCAR	<i>National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research</i>

PR	<i>Precipitation Radar</i>
R1	Reanálises do NCEP-NCAR
R2	Reanálises 2 do NCEP-DOE
SIRT	<i>Sferics Infrared Rainfall Technique</i>
SMAS	Sistema de Monção da América do Sul
SON	Setembro, outubro e novembro
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
$Z_m$	Refletividade do radar medida
$\mathbf{VT}_{lis}$	Matriz do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
$f(x) = y$	Função de uma variável
$f_{cdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade cumulativa com duas variáveis
$f_{pdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade com duas variáveis
%	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: a porcentagem de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente
H	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o nível de altitude, em quilômetros, aonde ocorreu o máximo de ocorrências de $Z_c$
L	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o número de ocorrência de $Z_c$ no nível de altitude de máxima ocorrência

P Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: número de perfis do PR computados

## 1 METODOLOGIA

A Metodologia consiste fundamentalmente na construção de um subconjunto de dados das observações dos sensores VIRS, LIS e PR abordo do satélite TRMM, durante o período entre 1998 e 2011.

Além dos dados satelitais, as reanálises II do NCEP em níveis de pressão foram utilizadas para identificar os valores de temperatura nos níveis de altitude do PR.

As informações dos diferentes sensores foram combinadas de maneira a identificar sistemas denominados como tempestades elétricas, definidas como nuvens as quais possuem pelo menos um *flash* detectado pelo LIS.

### 1.1 O SATÉLITE TRMM

O satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM faz parte de uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA e a *Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA , com o objetivo de determinar a distribuição geográfica e a variabilidade da chuva e do fluxo de calor latente de condensação para a região tropical e subtropical terrestre, informações fundamentais, por exemplo, nas inicializações de modelos globais e climáticos, principalmente quando se trata de previsão do tempo e clima nos trópicos (KUMMEROW et al., 1998; 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).

O satélite foi lançado em 28 novembro de 1997 e continua em operação.

### 1.1.1 Radar de Precipitação

O *Precipitation Radar* – PR é o principal instrumento do TRMM. Se trata do primeiro radar meteorológico lançado no espaço sendo a maior inovação apresentada pela missão TRMM.

Os maiores objetivos do PR são: prover a estrutura tridimensional da precipitação; e quantificar as taxas de precipitação sobre os continentes e oceanos, ambos objetivos focados na região tropical.

A antena do PR possui uma largura de feixe de  $0.71^\circ \times 0.71^\circ$ , abertura de  $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$  e faz uma varredura de  $\pm 17^\circ$  com 49 feixes, proporcionando a observação de uma faixa na superfície de  $\simeq 215\text{ km}$ . A resolução horizontal no nadir é de  $4.3 \pm 0.12\text{ km}$ , e de até  $5\text{ km}$  nos ângulos próximos dos  $\pm 17^\circ$ . Verticalmente, o PR observa uma faixa de  $20\text{ km}$  a partir da superfície, com resolução de  $250\text{ m}$ . Portanto, a precipitação observada corresponde a uma matriz bidimensional de  $49 \times 80$  posições: 49 feixes na varredura horizontal, com 80 níveis verticais de  $250\text{ m}$  de altitude. Estas principais características operacionais do PR são representadas na figura 1 (KUMMEROW et al., 1998).

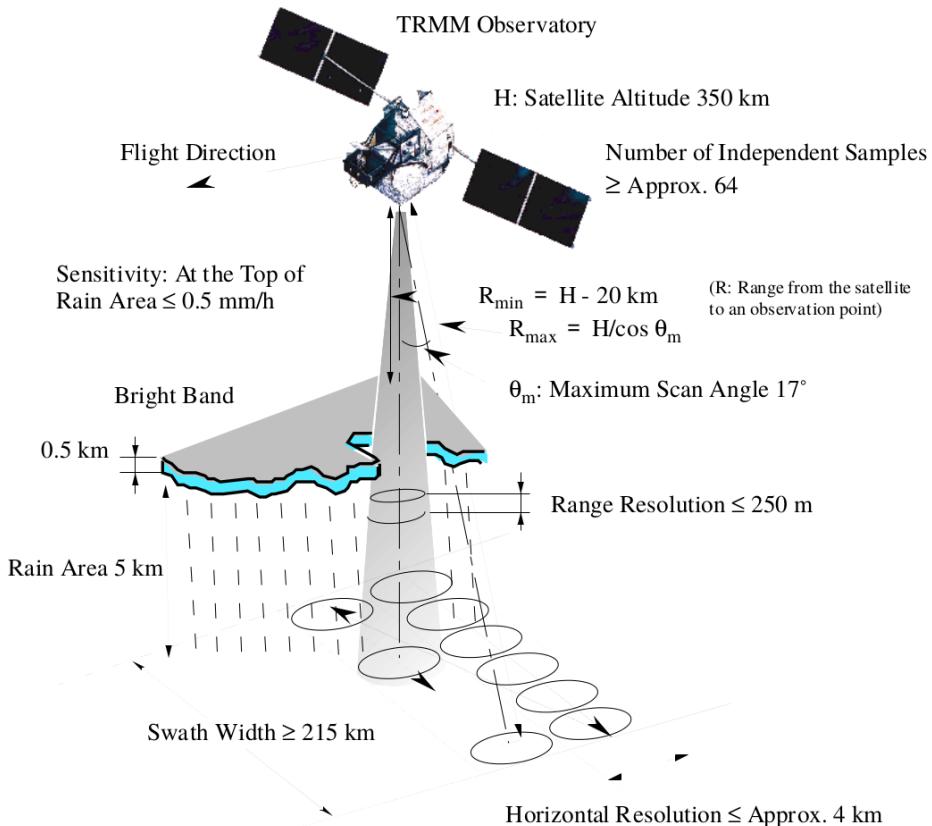


Figura 1: Principais características das observações do PR (NASDA, 2001)

Para esta pesquisa serão utilizados os dados do produto 2A25, o qual corrige a ate-

nuação da refletividade do radar medida ( $Z_m$ ) e a partir do fator de refletividade corrigido por atenuação  $Z_c$ , estima a estrutura tridimensional da precipitação no instante da observação, bem como a taxa de precipitação em cada célula da resolução ( $46 \times 80$ ) do PR (JAXA/NASA, 2011).

Além da estrutura tridimensional da precipitação do produto 2A25, nesta tese, utiliza-se das classificações do tipo de chuva do produto 2A23: convectivo, estratiforme, outros, etc (NASA, 2009; JAXA/NASA, 2011).

### 1.1.2 Imageador de relâmpagos

O *Lightning Imaging Sensor* – LIS é um sensor óptico capaz de detectar e localizar raios individualmente, a partir da emissão óptica resultante da dissociação, excitação e recombinação dos constituintes atmosféricos durante uma descarga atmosférica.

O sistema de imagens do LIS é constituído por um telescópio f/1.6 que expande o feixe luminoso observado, que passa por um filtro de interferência no comprimento de onda de 777.4 nm e largura de banda de 1 nm e atinge uma matriz de  $128 \times 128$  CCDs<sup>1</sup>. O LIS também possui uma lente angular que proporciona um campo de visão panorâmico sobre as tempestades elétricas sobrevoadas de  $80^\circ \times 80^\circ$ , que corresponde a uma área de 580 km × 580 km no nadir. Um pixel do campo de visão do LIS, possui resolução entre 5-10km. O sistema de amostragem de dados do LIS garante o registro de 500 imagens por segundo. (CHRISTIAN et al., 2000; BOCCIPPIO et al., 1996; NASDA, 2001).

Conforme é descrito por Christian et al. (2000), a identificação dos raios/*flashes* depende do brilho difuso e transiente observado no topo das tempestades elétricas. Dependendo da posição em que as CCDs são sensibilizadas e do intervalo de tempo entre os brilhos subsequentes, o algoritmo de processamento de imagens do LIS identifica os *events*, *groups* e os *flashes*. Os *flashes* são associados aos raios, sejam nuvem-solo ou intra-nuvem. Os *events* e *groups* estão associados os processos quem envolvem a formação das descargas de retorno, por exemplo, os processos de recuo e conexão dos líderes percursores das correntes elétricas dos raios.

A figura 2, ilustra como é feita a identificação dos *events*, *groups* até a caracterização de um *flash*. Observe, que após 700 milissegundos, como mostra a sequência de figuras 2a-2e, temos 4 *flashes* (A, B, C e D), 8 *groups* (a, b, c, d, e, f, g e h) e 14 *events* (CHRISTIAN et al., 2000).

---

<sup>1</sup>Um dos dispositivos eletrônicos utilizados para registro de imagens com base no efeito fotoelétrico.

O LIS possui a capacidade de identificar descargas nuvem-solo e intranuvens, tanto no período diurno quanto noturno. Com sua velocidade orbital de 11 km/s, o sensor LIS possui um campo de visão que permite a observação de um ponto na Terra por 80-90 segundos, tempo suficiente para a estimativa da taxa de raios de uma tempestade no momento da observação (CHRISTIAN et al., 1992; NASDA, 2001).

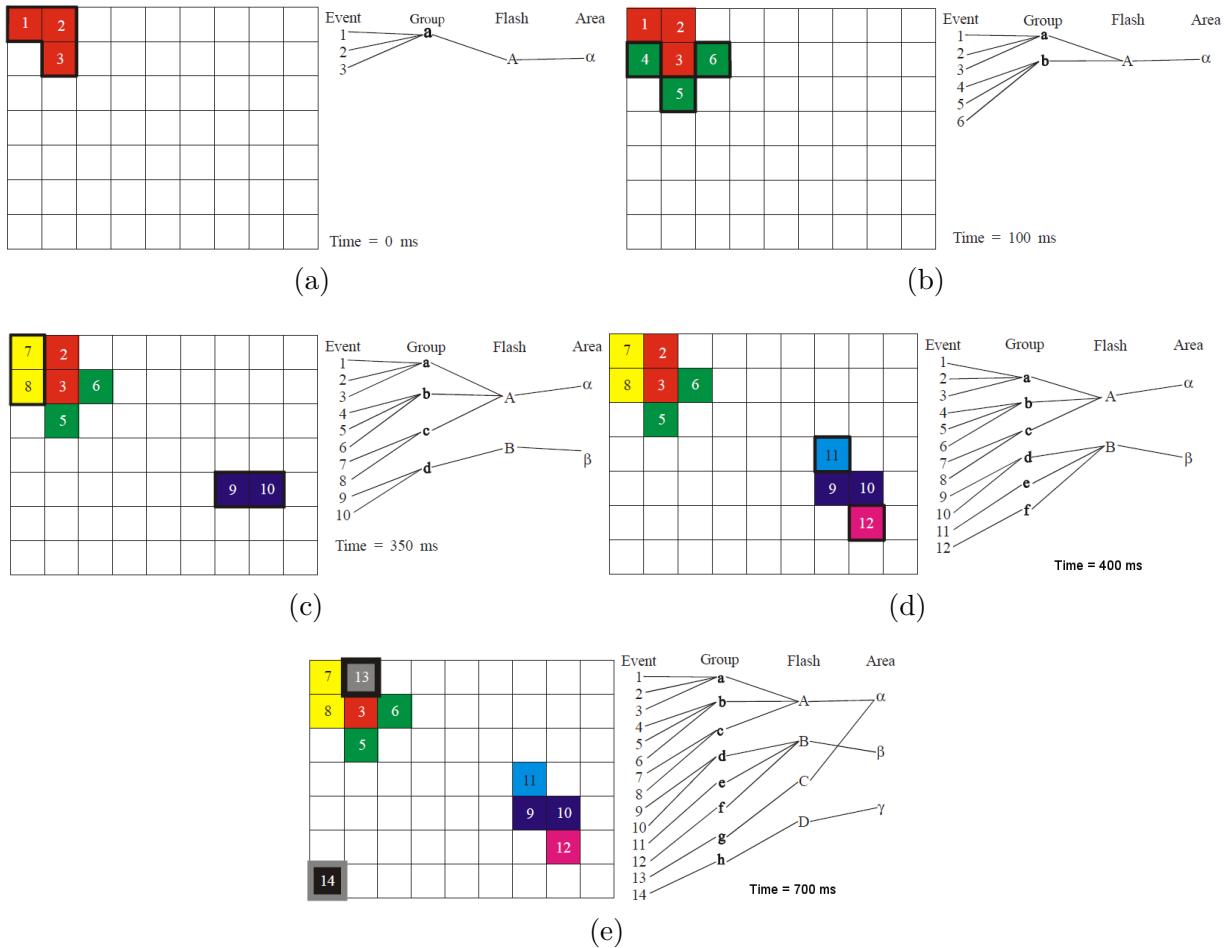


Figura 2: Ilustração do algoritmo de identificação de *events*, *groups* e os *flashes* do LIS (CHRISTIAN et al., 2000).

### 1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho

O *Visible and InfraRed Scanner* – VIRS é um radiômetro de varredura biaxial, um eixo com  $\pm 45^\circ$  e outro  $360^\circ$ , que mede a radiância em 5 bandas espectrais: com comprimentos de onda de  $0.63 \mu\text{m}$  e  $1.61 \mu\text{m}$ , que correspondem a faixa do visível;  $3.75 \mu\text{m}$ ,  $10.8 \mu\text{m}$  e  $12 \mu\text{m}$ , na faixa do infravermelho para o monitoramento do vapor d'água e temperaturas de topo de nuvens.

Com uma inclinação  $\pm 45^\circ$  na horizontal, observa uma faixa de 720 km, com resolução

de 2,11 km no nadir(KUMMEROW et al., 1998; NASDA, 2001).

## 1.2 REANÁLISES (R2) DO NCEP-DOE

Em continuidade ao projeto das reanálises do NCEP-NCAR (R1) , o projeto reanálises 2 (R2) – *NCEP-DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis* – faz o uso de dados de satélite e de modelos mais atuais do que no projeto R1, buscando corrigir erros humanos e erros conhecidos de versões anteriores de modelos atmosféricos utilizados no processo de integração e assimilação de dados de envolvem o projeto R1 (KANAMITSU et al., 2002).

## 1.3 DADOS

Os dados referentes as observações do TRMM foram obtidos foram transferidos a partir do servidor de FTP da NASA (<ftp://disc2.nascom.nasa.gov>) e do NCEP (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>).

Foram utilizadas nesta pesquisa os dados de temperatura em altura geopotencial em 17 níveis de pressão das reanálises 2 do NCEP-DOE e os arquivos orbitais do TRMM, produtos 1B01, 2A25 e 1B11, ambos na versão 7, durante o período entre 1998 e 2011.

Os dados do LIS de *flash, group, events* e *view time* foram concedidos pela pesquisadora Albrecht (2010), que processou estes dados na NASA anteriormente a esta pesquisa.

No total, os dados brutos desta pesquisa, representaram um volume de aproximadamente 30 terabytes.

Para este trabalho de pesquisa os dados do TRMM e das R2 foram amostrados sobre a região limitada entre 10N-40S e 91W-30W, que abrange toda a extensão da América do Sul.

Diante as variáveis que integram os 3 produtos do TRMM utilizados nesta pesquisa, foram selecionais apenas algumas variáveis conforme descreve a tabela 3.

## 1.4 AS TEMPESTADES ELÉTRICAS

Para criar o banco de dados de nuvens de tempestades elétricas deste trabalho de pesquisa, a equação de Planck foi aplicada nos dados de radiância espectral do produto 1B01, canal 4 do VIRS ( $10,8\ \mu m$ ) e desta forma, as regiões com temperaturas de brilho mais frias do que 258 K e com pelo menos um *flash* do LIS observado, definiram as

Tabela 3: Variáveis dos produtos do TRMM que foram utilizadas na identificação e descrição das tempestades elétricas.

Variável	Sensor TRMM	Produto
<i>Latitude</i>	VIRS	1B01
<i>Longitude</i>	VIRS	1B01
<i>Channels (4) 10.8 <math>\mu m</math></i>	VIRS	1B01
<i>Latitude</i>	PR	2A25
<i>Longitude</i>	PR	2A25
<i>Corrected Z-factor</i>	PR	2A25
<i>Rain Type</i>	PR	2A23
<i>Lat. Lon. Flashes</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>Lat. Lon. Events</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>Lat. Lon. Groups</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)
<i>View Time 0.5° × 0.5°</i>	LIS	(ALBRECHT, 2010)

tempestades elétricas.

A partir da definição do cluster de nuvem, o algorítimo extrai as variáveis listadas na tabela 3 referentes as observações do PR e LIS na mesma área do *cluster* de nuvem de tempestade elétrica.

Como os sensores do TRMM possuem diferentes resoluções, técnicas numéricas de mudança de base foram utilizadas para projetar as observações orbitais do VIRS, PR e LIS em uma grade regular com  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  de resolução, de maneira à verificar as regiões com medidas coincidentes entre o PR, LIS e VIRS.

Desta forma, cada tempestade elétrica foi armazenada na forma de um arquivo HDF contendo medidas coincidentes do VIRS, LIS e PR.

Inicialmente foram identificadas 154,189 tempestades elétricas, pelo instrumento numérico rastreador de sistemas, porém 331 tempestades elétricas, não corresponderam a um único sistema convectivo ou multicelular.

Portanto, foi feita uma redivisão nos sistemas enormes considerando a temperatura de brilho de 221 K. Regiões com temperatura de brilho em infravermelho inferiores a 221 K são consideradas como a parte mais ativa dos sistemas convectivos de meso-escala identificados em Maddox (1980).

Com a recategorização dos sistemas enormes, portanto o número total de tempestades elétricas identificadas nesta pesquisa é de 157,592.

## 1.5 A TAXA DE RAIOS

A taxa de raios por minutos ou por hora por sistema, ou apenas a taxa de raios no tempo quando não se pode aferir a extensão do sistema, pode ser utilizada para descrever a severidade de uma tempestade.

Para descrever a morfologia das tempestades bem como identificar quais tempestades são mais eficientes ou severas, defini-se dois índices:

- FT – A taxa de raios no tempo, sendo a razão entre o número de raios ( $N_{fl}$ ) 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).
- FTA – A taxa de raios por tempo pela área da tempestade elétrica ( $A_t$ ).

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

.

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

$$FTA = \frac{N_{fl}}{VT_m A_t} 60 \text{ [raios minuto}^{-1} \text{ km}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

## 1.6 DENSIDADE GEOGRÁFICA DE RAIOS E SISTEMAS

Neste trabalho, buscamos identificar regiões mais eficientes nos processos de eletrificação, as quais tem pouca densidade de sistemas porém com 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, pois uma determinada região pode ter muito mais amostragens do outras. Portanto, 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  $35^\circ$  e velocidade, entre o período de 1998–2011 o satélite passou 10,000 vezes mais sobre a região extra-topical do que na região tropical, como mostra a figura 3, que ilustra o número de órbitas cobertas pelo sensor VIRS em uma grade regular de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  na América do Sul.

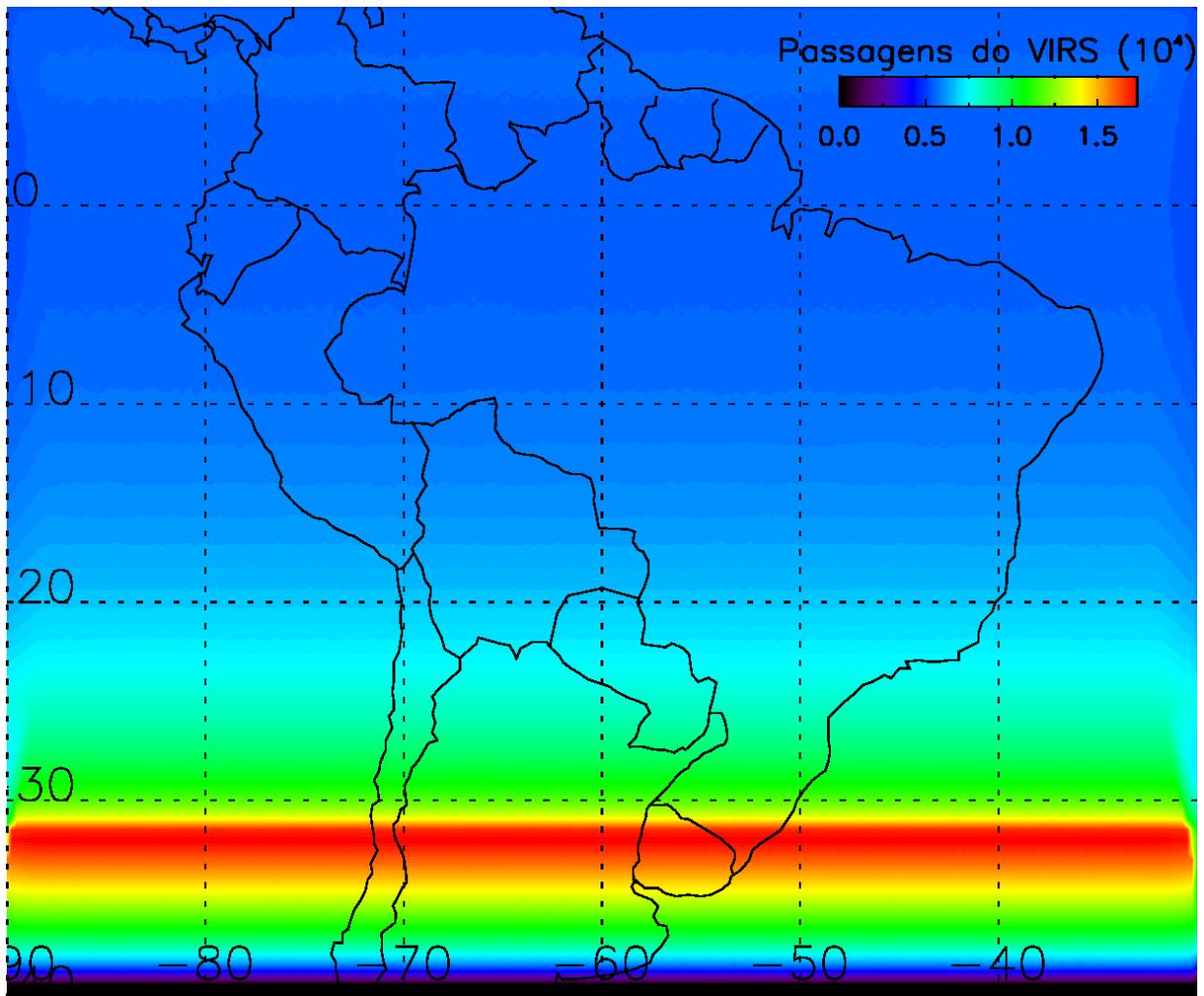


Figura 3: Número de observações do VIRS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ).

Levando em consideração tempo de amostragem do LIS na superfície terrestre (*view time*), o número de dias de amostragem na região de estudo pode ser observado na figura 4. Observa-se que em 14 anos o LIS observou 10 dias a mais na latitude  $34^\circ$  S do que em  $0^\circ$ .

As figuras 4 e 3 representam 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 ( $\mathbf{VT}_{lis}$ ), figura 4, do tempo total de amostragem do sensor LIS sobre a superfície e a matriz ( $\mathbf{VT}_{virs}$ ), figura 3 do número de vezes que o satélite passou conforme

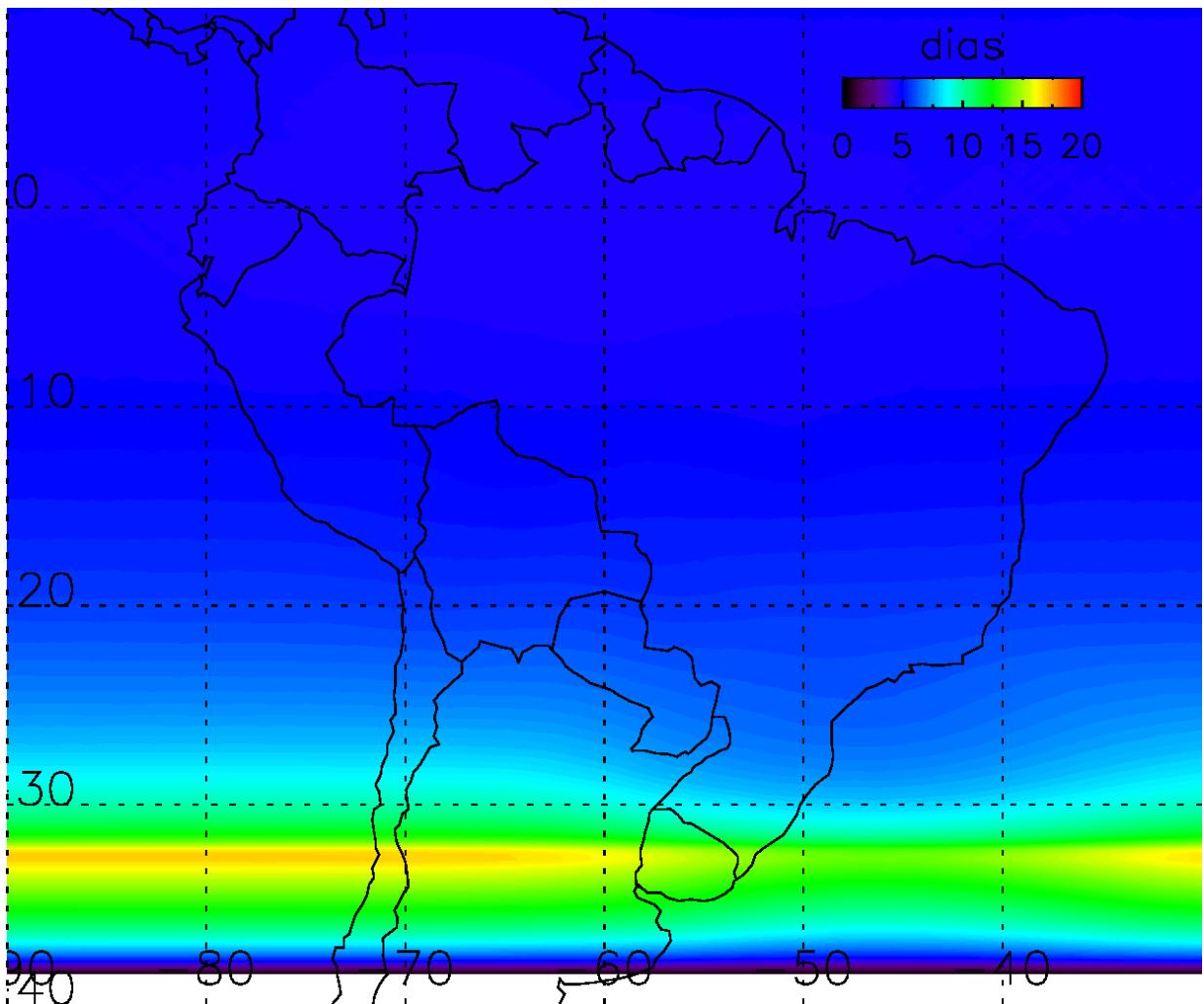


Figura 4: Tempo de amostragem (*View time*) do LIS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ).

o tamanho da varredura do radiômetro VIRS na superfície, as quais são utilizadas para normalizar as medidas de raios e de tempestades elétricas definidas pelo VIRS.

Neste sentido podemos calcular a densidade de raios ( $\mathbf{DE}_{fl}$ ) e a densidade de tempestades elétricas ( $\mathbf{DE}_{te}$ ) em função do tempo de amostragem.

Para tanto, é necessário calcular o número total de raios observados ( $\mathbf{FL}_{lis}$ ) e o número total de tempestades elétricas ( $\mathbf{P}_{te}$ ) em cada ponto da grade de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Logo é possível identificar as regiões com a maior número de amostragem de raios, na figura 5, e de amostragem de tempestades elétricas, na figura 6.

Na figura 6 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.

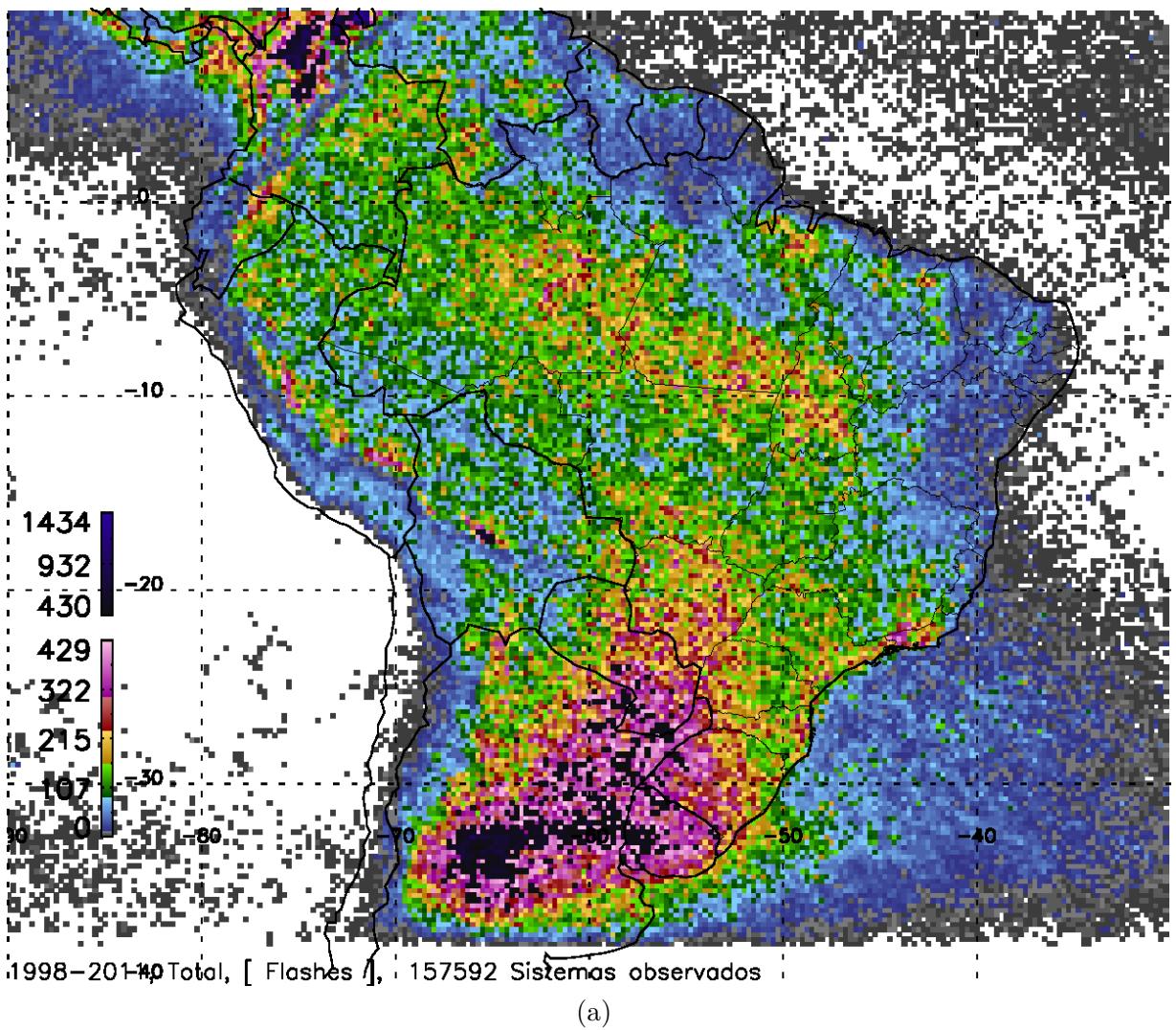


Figura 5: Acumulado de raios (*flashes*) observados pelo LIS ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ).

Mesmo que as matrizes representem pontos em uma grade com espaçamento angular regular, as áreas de cada ponto de grade não são iguais, pois a o comprimento de arco de  $0.25^\circ$  na direção zonal depende da latitude da região. Assim a matriz que corresponde a área da grade regular ( $\mathbf{A}_g$ ) foi calculada e considera nos cálculos de densidades.

A densidade de raios ( $\mathbf{DE}_{fl}$ ) foi calculada conforme a equação 3, que apresenta a razão entre  $\mathbf{FL}_{lis}$  e o  $\mathbf{VT}_{lis}$  e  $\mathbf{A}_g$ , multiplicada por 24 horas  $\times$  60 minutos  $\times$  60 segundos  $\times$  365.25 dias, o que converte o tempo de observação do LIS de segundos para anos. Então as densidades de raios, possuem dimensões de número de [raios] por [tempo] por [quilômetro quadrado] (raios ano $^{-1}$  km $^{-2}$ ).

$$\mathbf{DE}_{fl} = \frac{\mathbf{FL}_{lis}}{\mathbf{VT}_{lis} \mathbf{A}_g} 31557600 \quad (3)$$

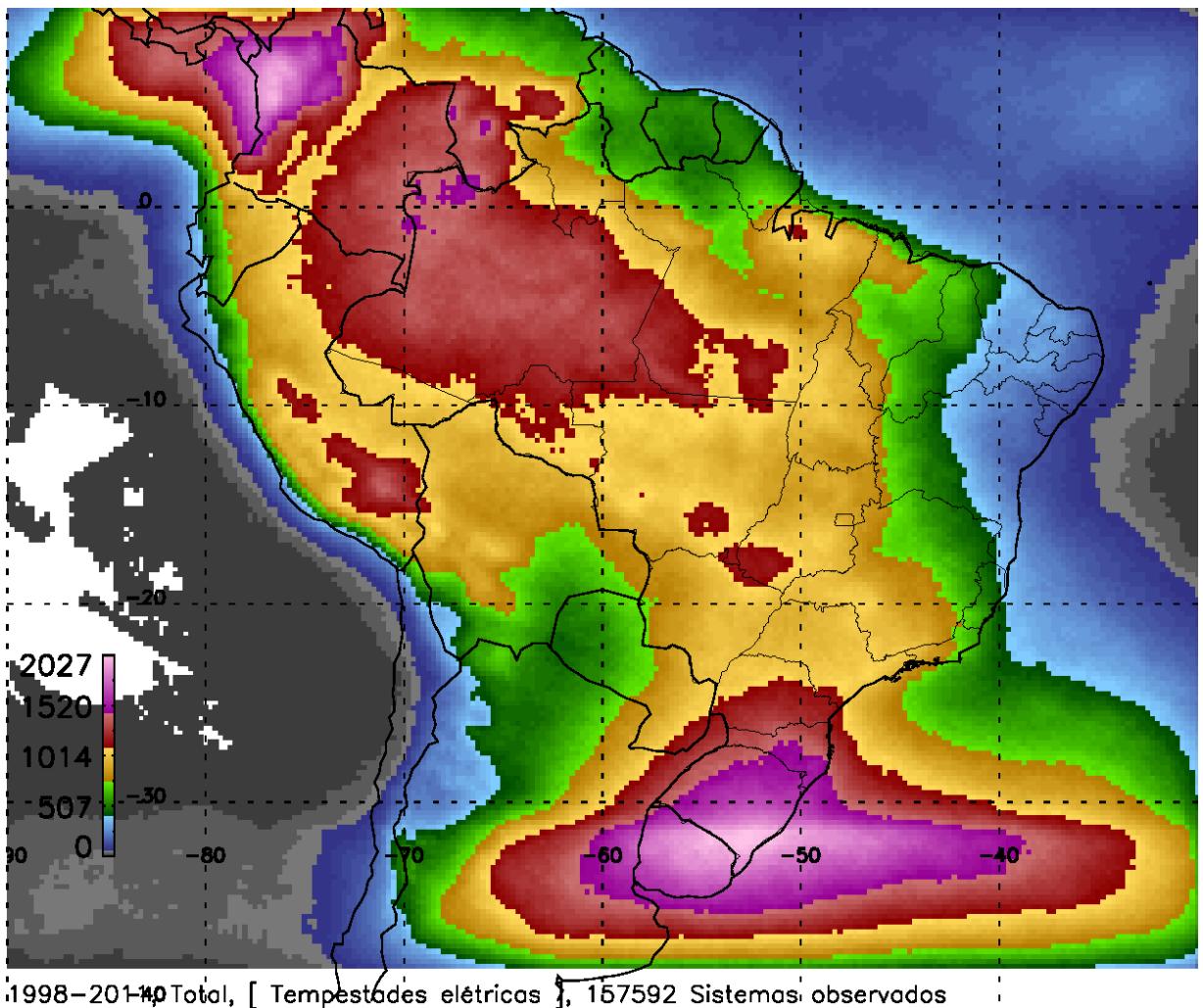


Figura 6: Acumulado das 157,592 tempestade elétrica ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ).

No mesmo caminho as densidades de tempestades elétricas ( $\mathbf{DE}_{te}$ ) foram obtidas conforme a equação 4. Mas, note que, conforme descrito em 1.1 o tempo de amostragem do LIS e do VIRS são bem distintos. Enquanto o LIS é um sistema de imageamento, o VIRS é um radiômetro que realiza varreduras durante a trajetória do satélite.

Portanto, a densidade de tempestades elétricas  $\mathbf{DE}_{te}$ , como descreve a equação 4 é normalizada pelo número de vezes que o VIRS sobrevoou cada ponto da grade de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , o que corresponde a dimensão física do número de [sistemas] por [observação] por [quilômetro quadrado] ( $\text{sistemas observações}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ). Essa grandeza revela, por exemplo, que a cada 10,000 observações do VIRS, temos entre 1-4 tempestades elétricas observadas na América do Sul.

$$\mathbf{DE}_{te} = \frac{\mathbf{P}_{te}}{\mathbf{V}\mathbf{T}_{virs}\mathbf{A}_g} \quad (4)$$

## 1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL 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.

### 1.7.1 Distribuições de probabilidades com a altitude

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 (YUTER; Houze Jr., 1995).

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 (YUTER; Houze Jr., 1995).

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 ( $f_{pdf}(x, y)$ ) 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.

### 1.7.2 Distribuições de probabilidades com a temperatura

A distribuição de probabilidade da precipitação com a altitude associa-se com o desenvolvimento vertical, porém o tipo de hidrometeoro de determinada altitude é função da temperatura e da razão de saturação naquela altura (TAKAHASHI, 1978; SAUNDERS

et al., 1999).

Objetivando uma análise dos processos de crescimento de hidrometeoros no perfil atmosférico, 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 diferentes condições de temperatura e valores de  $Z_c$ , nesta pesquisa, foi construído o 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 (R2) do NCEP-DOE 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 VIRS, foram extraídos. A partir dos 17 níveis verticais das R2, os 80 níveis de temperaturas associados aos 80 níveis de altitude das observações do PR foram obtidos por interpolação por método de mínimos quadrados.

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. Para tanto, determina-se a sazonalidade, o ciclo diurno, o ciclo anual e a densidade geográfica de raios e das tempestades elétricas.

### 2.1 CICLO DIURNO

Utilizando a base de dados de tempestades elétricas construída nesta pesquisa, determinou-se a frequência de ocorrências dos sistemas no decorrer das horas do dia, figura 7. Deste modo, obtivemos o ciclo diurno das tempestades elétricas por meio da distribuição de probabilidade de ocorrências.

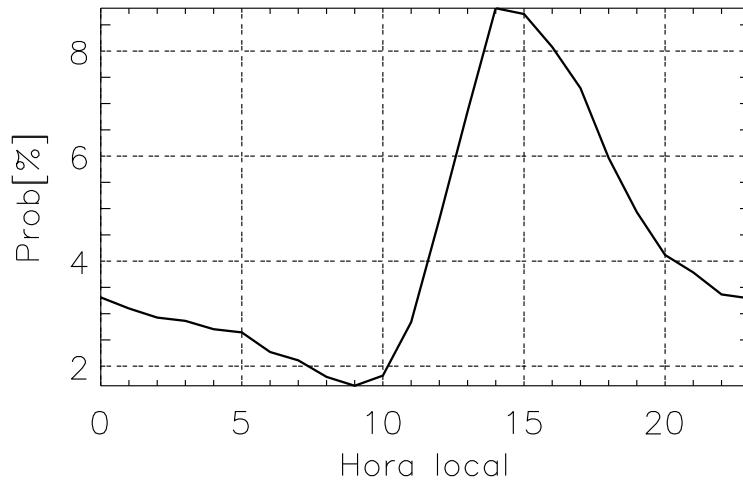


Figura 7: Ciclo diurno das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados.

Observa-se que 40% das tempestades elétricas observadas pelo TRMM ocorrem entre 13h e 17h, 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 relação aos horários de menor fluxo de calor sensível para a atmosfera.

Por exemplo, às 9h a probabilidade de tempestade elétrica é de 1.6% e às 14h é de 8.8%, portanto às 14h a probabilidade de ocorrência de tempestade tempestade elétrica é 5.4 vezes maior do que às 9h.

O ciclo diurno também foi estudado para cada região de 10 por 10 graus, como mostra a figura 8.

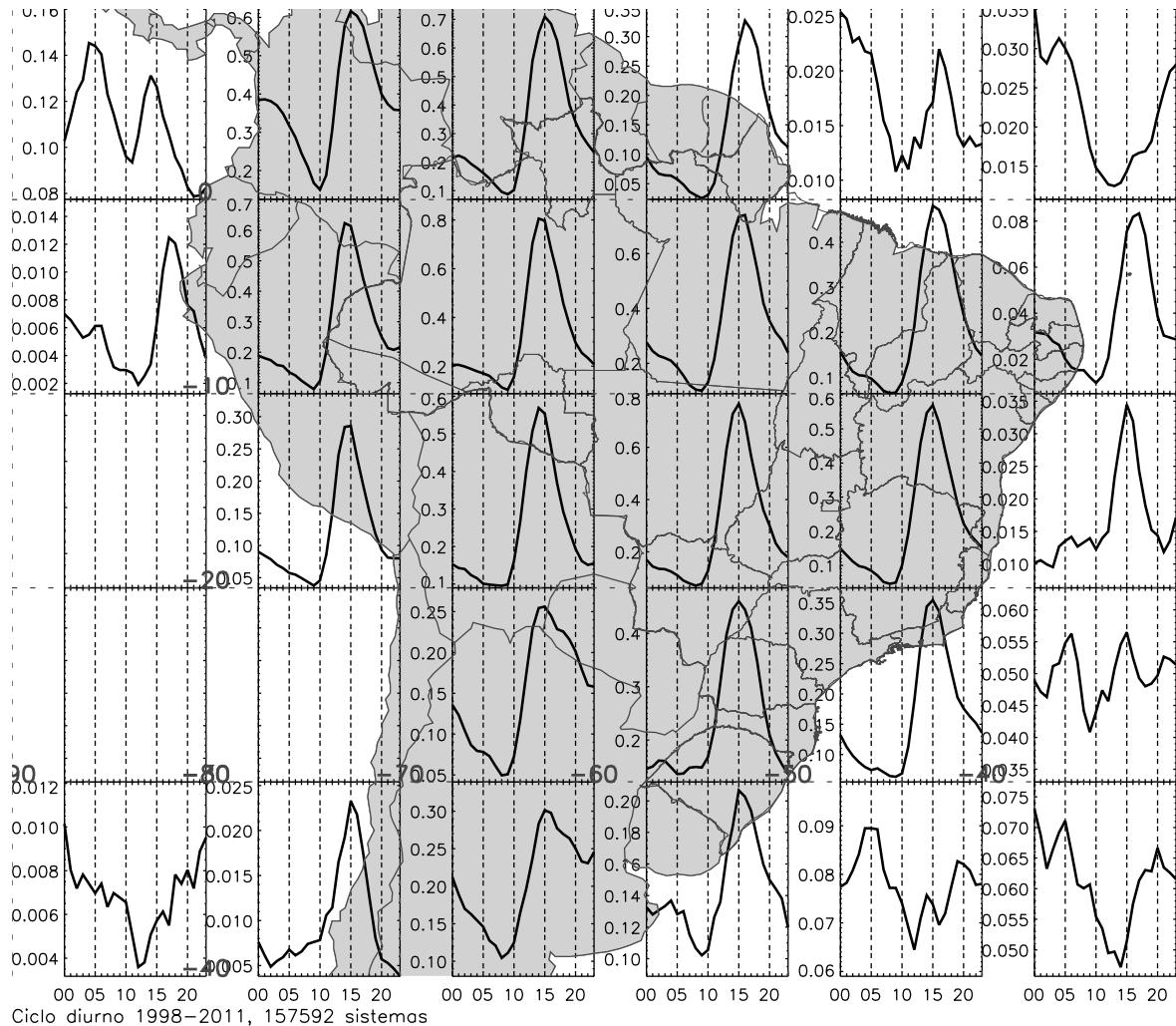


Figura 8: Ciclo diurno em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados.

Pode-se observar que existe um predomínio de ocorrências de tempestades elétricas entre 13h e 17h sobre o continente. Sobre o oceano observa-se uma distribuição bimodal, com pico no começo da noite e durante a madruga.

Sobre os oceanos, os processos de formação de nuvens e consequentemente de formação de tempestades elétricas se mostram mais ativo no horário em que a temperatura superficial e a probabilidade de ocorrência de sistemas sobre o continente diminui. Neste horário a superfície do oceano pode estar com temperaturas maiores do que as temperaturas sobre

a superfície do continente, aumentando a convergência sobre o oceano. A atividade convectiva intensa entre 13-17h sobre o continente também aumenta a cobertura de nuvens do tipo cirrus sobre o oceano inibindo a formação de nuvens (NESBITT; ZIPSER, 2003).

Entre  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Norte e  $80^{\circ}$ - $70^{\circ}$  Oeste e às 0h, observou-se a maior probabilidade ( $\approx 0.4\%$ ) de tempestades elétricas noturnas da América do Sul, o que representou um número de 630 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, e 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 (BÜRGESSER et al., 2012).

Entre  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Norte e  $90^{\circ}$ - $80^{\circ}$  Oeste, abrangendo o Panamá e parte Sul da Costa Rica, e a região do Oceano Pacífico que engloba o Parque Nacional da Ilha do Coco na Costa Rica e parte das ilhas Galápagos no Equador, a região oceânica e costeira com a maior probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas. Observe os valores de densidade de tempestades elétricas neste quadrante geográfico, na próxima seção, em 2.3 na figura 11. O ciclo diurno das tempestades elétricas nesta região revela uma distribuição bimodal, com um pico às 4h e outro às 14h. O pico das 14h, provavelmente está associado as tempestades elétricas da região do Panamá, Costa Rica e suas respectivas regiões costeiras adjacentes, as quais sofrem maior aquecimento superficial durante o dia, enquanto o maior pico que ocorreu às 4h provavelmente corresponde com as trocas de energia na forma de calor entre o oceano e atmosfera.

Entre  $30^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Sul e  $90^{\circ}$ - $80^{\circ}$  Oeste e entre  $30^{\circ}$ - $20^{\circ}$  Sul e  $80^{\circ}$ - $70^{\circ}$  Oeste, região do Pacífico, 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 (REBOITA et al., 2010).

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.

A maior atividade horária de tempestades elétricas, ocorreu entre  $10^{\circ}$ - $0^{\circ}$  Sul e  $70^{\circ}$ -

50° Oeste e 20°–10° Sul e 60°–50° Oeste. Em cada uma destas três regiões observou-se a probabilidade de aproximadamente 0.8% entre as 14h e 16h, mostrando que em toda esta área o TRMM observou 3 tempestades elétricas a cada 2 dias, apenas durante estas duas horas.

Entre 30°–20° Sul e 60°–50° Oeste, 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.

## 2.2 CICLO ANUAL

Quando se analisa a sazonalidade, observa-se que a estação de tempestades elétricas na América do Sul se configura entre outubro e março e possui dois picos: janeiro, durante o verão austral; e outubro, período de transição entre a estação seca e chuvosa.

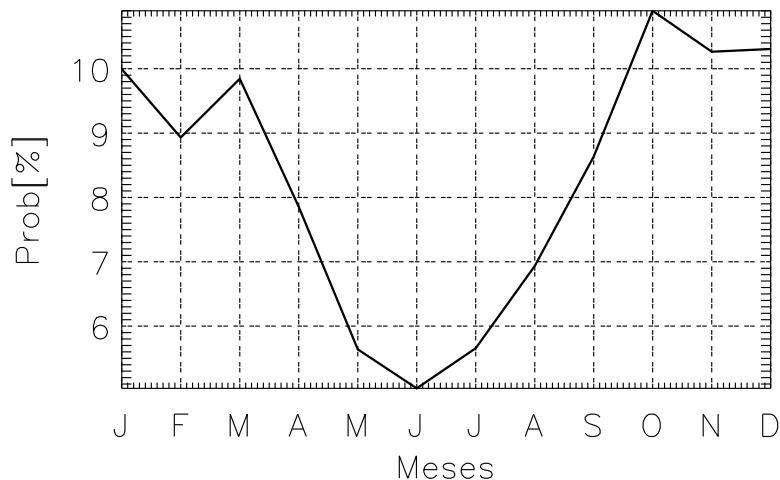


Figura 9: Ciclo anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados.

A maior probabilidade foi de 10.9% no mês de outubro, conforme mostra a figura 9. De outubro até março foram observadas 60.2% das tempestades elétricas. Em junho observou-se a mínima probabilidade de tempestades elétricas com valor de 5.1%. Portanto, entre

o período de máximo e mínimo anual o número de ocorrência de tempestades elétricas reduz aproximadamente pela metade.

O ciclo anual das tempestades elétricas também foi estudado para cada região de 10 por 10 graus de latitude e longitude. O valor de 70 por cento da máxima probabilidade de tempestade elétrica em cada região foi definido como limiar para considerar que a ocorrência de tempestades elétricas aumentou o suficiente para definir uma estação e este valor é representado pela linha horizontal que corta cada gráfico em cada ponto da grade de  $10^\circ \times 10^\circ$  da figura 10.

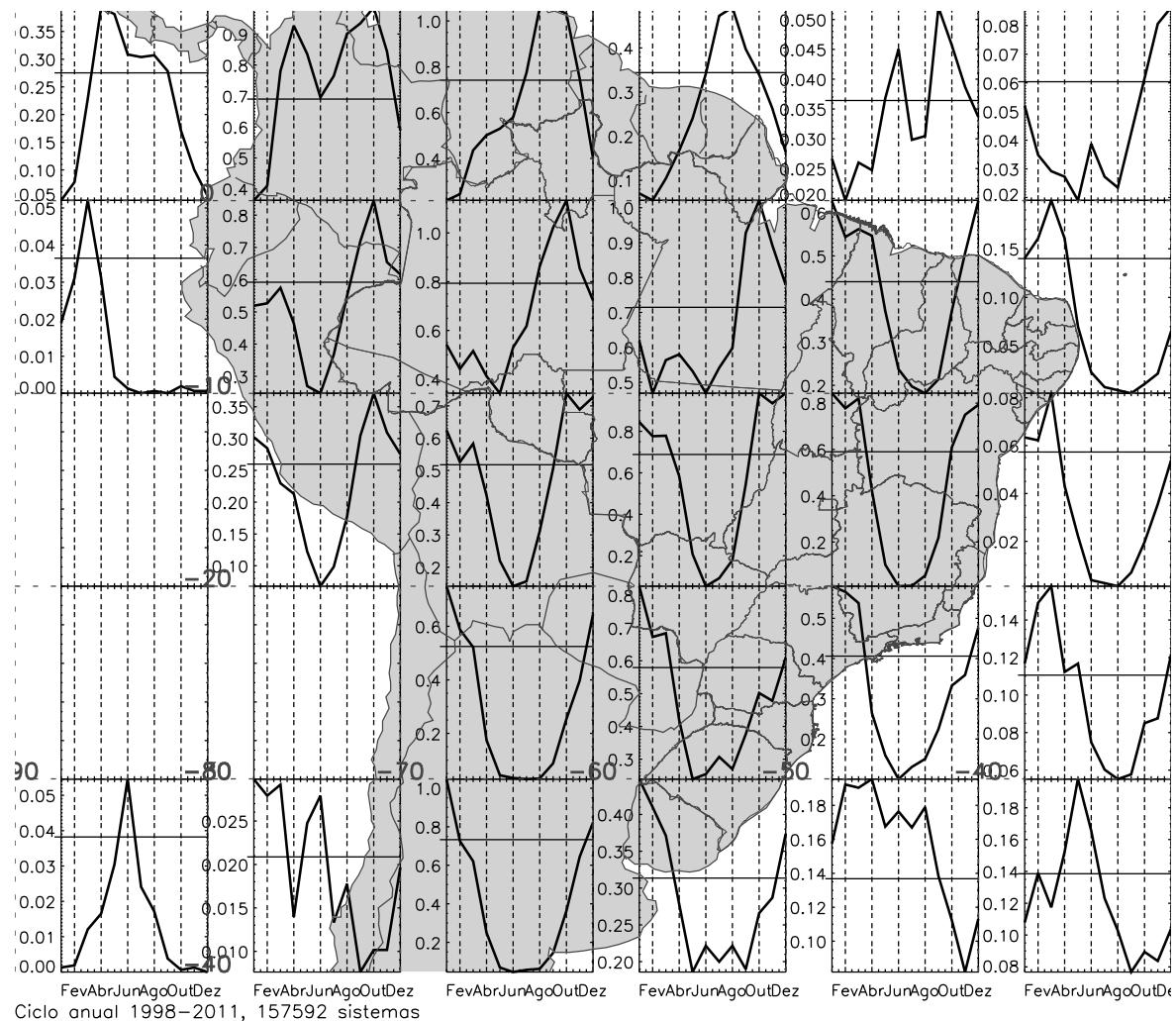


Figura 10: Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus de latitude e longitude. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, utilizado como limiar para definir as estações de tempestades elétricas.

A tabela 4 mostra os meses de duração das estações de tempestades elétricas de acordo com cada região conforme mostra a figura 10. Considerando o ciclo anual em cada ponto da grade de  $10^\circ \times 10^\circ$ , observa-se em média uma estação de tempestades elétricas com

duração de 4.5 meses.

Tabela 4: Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus de latitude longitude.

	Localização	Número de sistemas	Estação (meses)	Duração (meses)	Máximo
1	0°–10°N, 90°–80°O	4173	Abr–Set	6	Abr
2	0°–10°N, 80°–70°O	14,232	Mar–Nov	9	Out
3	0°–10°N, 70°–60°O	11,946	Jul–Nov	5	Ago–Set
4	0°–10°N, 60°–50°O	4895	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	824	Out–Dez	3	Dez
7	10°–0°S, 90°–80°O	225	Mar	1	Mar
8	10°–0°S, 80°–70°O	10,014	Set–Dez	4	Out
9	10°–0°S, 70°–60°O	12,605	Ago–Nov	4	Out
10	10°–0°S, 60°–50°O	12,590	Set–Dez	4	Out
11	10°–0°S, 50°–40°O	7863	Jan–Abr, Nov–Dez	6	Jan
12	10°–0°S, 40°–30°O	1363	Fev–Abr	3	Mar
13	20°–10°S, 90°–80°O	1	–0–	–0–	–0–
14	20°–10°S, 80°–70°O	4344	Jan–Fev, Set–Dez	6	Out
15	20°–10°S, 70°–60°O	8895	Jan–Mar, Out–Dez	6	Out
16	20°–10°S, 60°–50°O	10,973	Jan–Mar, Out–Dez	6	Out
17	20°–10°S, 50°–40°O	8524	Jan–Mar, Out–Dez	6	Jan
18	20°–10°S, 40°–30°O	625	Jan–Mar	3	Mar
19	30°–20°S, 90°–80°O	32	–0–	–0–	–0–
20	30°–20°S, 80°–70°O	32	–0–	–0–	–0–
21	30°–20°S, 70°–60°O	5607	Dez–Mar	4	Jan
22	30°–20°S, 60°–50°O	8885	Dez–Mar	4	Jan
23	30°–20°S, 50°–40°O	6121	Dez–Mar	4	Jan
24	30°–20°S, 40°–30°O	1884	Dez–Mai	4	Mar
25	40°–30°S, 90°–80°O	258	Jun	1	Jun
26	40°–30°S, 80°–70°O	366	Jan–Mar, Mai–Jun	5	Jan
27	40°–30°S, 70°–60°O	7652	Dez–Jan	2	Jan
28	40°–30°S, 60°–50°O	5440	Dez–Mar	4	Jan
29	40°–30°S, 50°–40°O	2949	Jan–Set	9	Abr
30	40°–30°S, 40°–30°O	2301	Abr–Jun	3	Mai

Na região referente as linhas 21 e 27 da tabela 4 (40°–20° Sul e 70°–60° Oeste), entre o clima semi-árido na Argentina e parte da Bacia do Prata, local das tempestades mais severas e de maior probabilidade de ocorrência de núcleos de convecção profunda da

AS como apontam Cecil et al. (2005), ??), Romatschke e Houze (2010), foi encontrada a estação de tempestades elétricas com a maior amplitude entre o máximo de ocorrências em janeiro e o mínimo em junho. A probabilidade de tempestades elétricas em junho foi aproximadamente 10 vezes menor do que em janeiro.

Sobre a Colômbia e parte Oeste da Venezuela que abrange o lago Maracaibo, região referente a linha 2 da tabela 4, foi a região em que o TRMM observou o maior número de tempestades elétricas (14,232). Nesta região a estação de tempestades elétricas dura 9 meses, com dois picos: abril e outubro.

As máximas probabilidades de ocorrência de tempestades elétricas durante o ciclo anual, não ocorrem em fase com os máximos anuais de precipitação em algumas regiões da AS, portanto, a definição de uma estação de tempestades elétricas não implica na definição de uma estação chuvosa.

Durante o final do verão setentrional, entre julho e setembro, a estação chuvosa começa a se deslocar do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul, de Noroeste da AS para Sudeste da AS intensificando-se progressivamente até atingir os maiores acumulados de chuva entre dezembro e janeiro (GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012; SHI et al., 2009; BOMBARDI, 2008; CUSTÓDIO, 2013).

Na parte central da AS, linhas 8, 9, 10, 14, 15, 16 da tabela 4 ( $20^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $80^{\circ}$ – $50^{\circ}$  Oeste), as tempestades elétricas ocorrem com maior frequência em outubro, entre a estação seca e chuvosa. Porém os máximos sazonais de precipitação nesta região ocorrem defasados aproximadamente em 5 meses do máximo de tempestades elétricas, entre os meses de fevereiro e abril (GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2010; SHI et al., 2009; BOMBARDI, 2008; CUSTÓDIO, 2013).

Na região Sul da AS, à Leste da Cordilheira dos Andes referentes as linhas 21 e 27 da tabela 4, a estação de tempestades elétricas ocorre entre dezembro e janeiro, em fase com a estação chuvosa. Aqui, a probabilidade de tempestades elétricas aumenta quando o Jato de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS) intensifica o transporte de umidade entre a Bacia Amazônica e a Bacia do Prata durante a atuação do SMAS (MARENGO et al., 2004).

A região Sul e Sudeste da América do Sul, referentes as linhas 17, 22, 23 e 28 da tabela 4, a estação de tempestades elétricas ocorre também em fase com o período de máxima configuração do SMAS, entre dezembro e janeiro. Petersen et al. (2002), mostram que mudanças na circulação atmosférica durante o período chuvoso associadas as fases

ativa e de pausa da SMAS influenciam na densidade de raios sobre a AS, indicando que, nas regiões em que a estação de tempestades elétricas coincide com o período de atuação da ZCAS, a variabilidade intra-sazonal do SMAS governa sobre a sazonalidade das tempestades elétricas (JONES; CARVALHO, 2002; CARVALHO et al., 2004).

Apesar da convergência em grande escala associada a ZCAS, sua atuação contínua durante meses poderia diminuir a instabilidade atmosférica devido a chuvas contínuas e baixa incidência de radiação de onda curta na superfície, o que abaixaria a temperatura da superfície dando características oceânicas para toda a extensão da ZCAS. As pausas do SMAS podem ser importantes para o aumento do *lapse rate* da atmosfera e quando há novamente uma fase ativa do SMAS, a atmosfera possui energia e umidade suficiente para eventos extremos de precipitação e de tempestades elétricas.

Na região da costa Nordeste da AS, referente as linhas 12 e 18 da tabela 4, a estação de tempestades elétricas possui máxima atividade em março e mínimo em torno de agosto. Nestas regiões o máximo sazonal de precipitação ocorre em fase com o máximo sazonal de tempestades elétricas, porém, durante o período pós-monção na AS (GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2010; SHI et al., 2009; BOMBARDI, 2008; CUSTÓDIO, 2013).

As regiões oceânicas, referentes as linhas, 1, 5, 7, 25, 29 e 30 da tabela 4, o pico de atividade de tempestades elétricas não ocorre entre outubro e março como mostra o ciclo anual total da figura 9, mas entre março e setembro durante o outono e inverno austral.

Durante o inverno, a diferença entre a temperatura da superfície do continente e a temperatura da superfície do oceano é menor, o que provavelmente favorece a convergência sobre o oceano, intensificando os processos de eletrificação fora do período de maior insolação. Conforme descrito por Custódio (2013), o máximo sazonal de precipitação observada pelo PR nestas regiões oceânicas ocorrem em fase com os máximos sazonais de tempestades elétricas desta pesquisa.

A região do Atlântico Tropical refente a linha 6 da tabela 4, possui o máximo sazonal de ocorrência de tempestades elétricas em dezembro, enquanto o máximo sazonal de precipitação ocorre durante o outono austral (CUSTÓDIO, 2013).

## 2.3 DENSIDADES GEOGRÁFICAS

Considerando o método descrito em 1.6, referente ao cálculo da densidade de tempestades elétricas e da densidade de raios, foram obtidos os mapas da densidade total de tempestades elétricas e de raios, figuras 11 e 12, assim como os mapas da densidade

sazonal de raios e de tempestades elétricas que são mostrados nas figuras 12 e 14. Note que a densidade de raios, tanto a total quanto a sazonal, as quais são apresentadas nesta seção, não corresponde a amostragem total de *flash* observados pelo LIS corrigida pela eficiência como é mostrado em trabalhos como Albrecht et al. (2009), Cecil et al. (2014), mas correspondem ao subconjunto dos *flashes* do LIS, os quais passaram pelos critérios de identificação de tempestades elétricas descritos em 1.4.

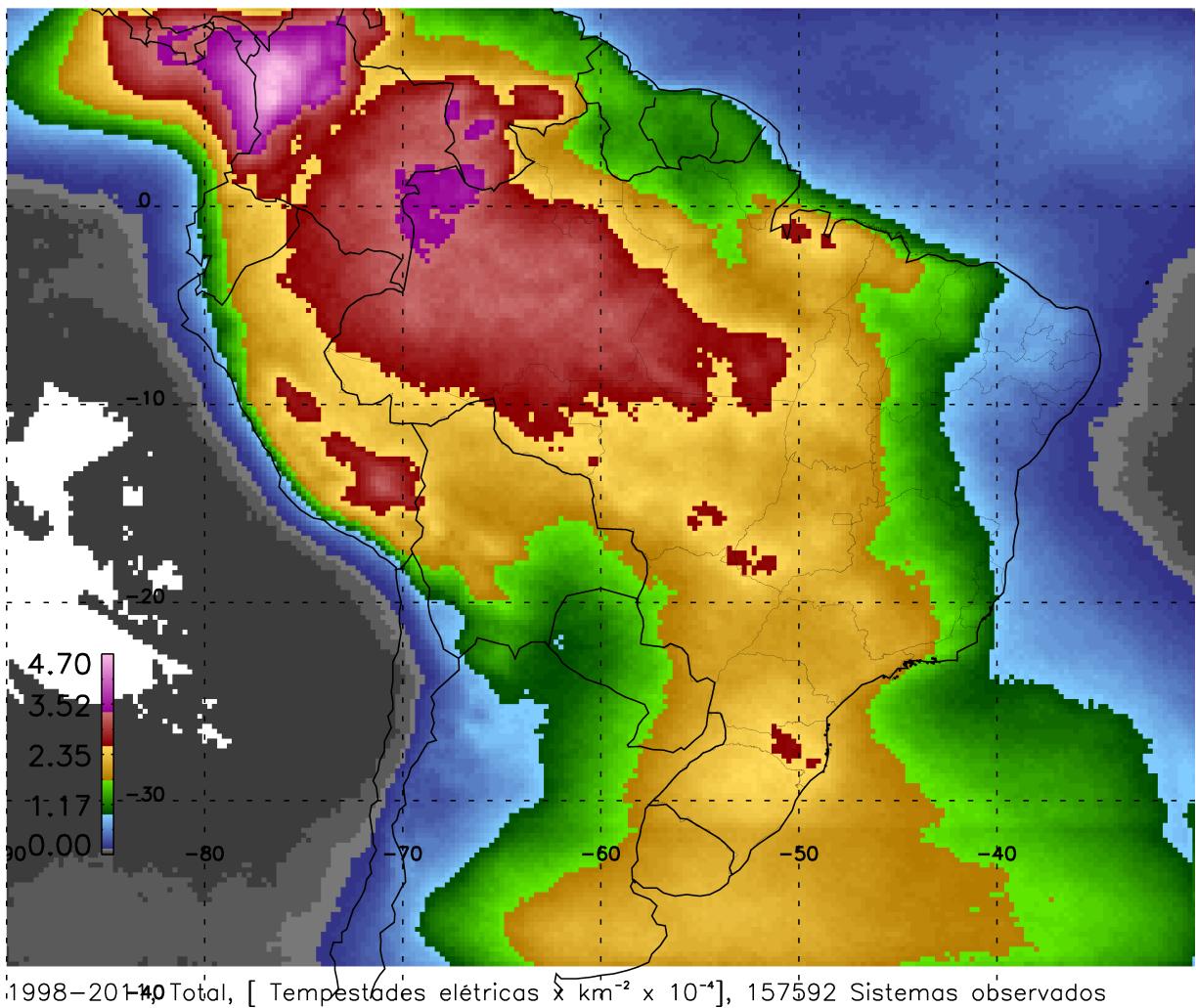


Figura 11: Densidade espacial total de tempestades elétricas. Os valores correspondem ao número de sistemas por ano por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus.

Na figura 11, observa-se que as grandes regiões de máxima densidade de tempestades elétricas, ou seja, com valores acima de  $2.5 \times 10^{-4} \text{ km}^{-2}$ , situam-se na parte Norte e Nordeste da AS. Observa-se duas extensas regiões com as máximas densidades: uma na Colômbia associado ao extremo Norte da Cordilheira dos Andes, outra ao Norte/Noroeste da Floresta Amazônica, abrangendo a parte brasileira, colombiana, venezuelana e peruana.

A costa Oeste da Colômbia e Panamá, destaca-se como a região de maior densidade

de tempestades elétricas costeiras, pois o escoamento atmosférico predominantemente de Leste devido a convergência dos Alísios ao encontrar o extremo Norte da Cordilheira dos Andes, entre 0–10° Norte, sofre perturbações que disparam tempestades elétricas que continuam a se propagar em sentido Oeste para o Pacífico tropical.

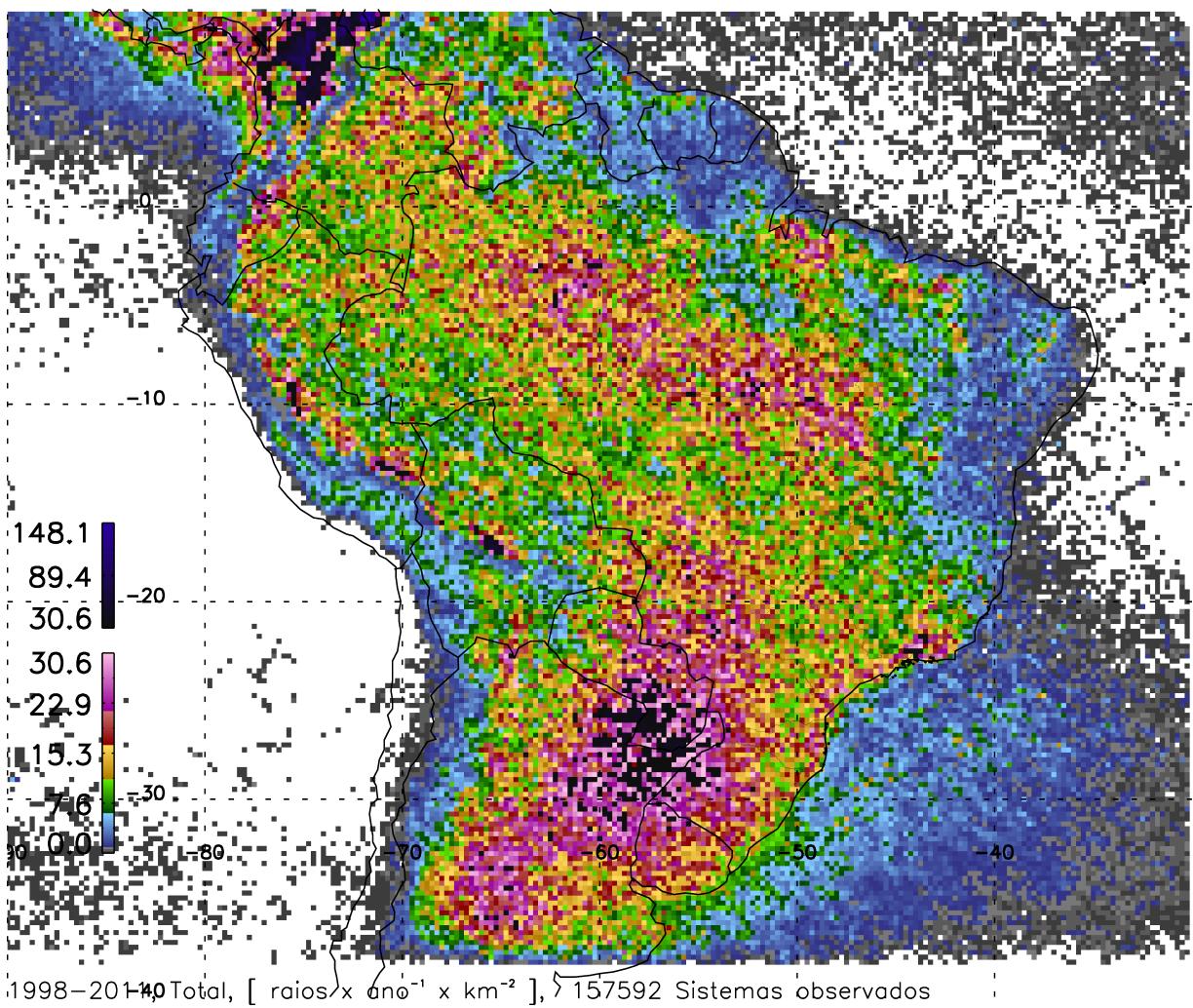


Figura 12: Densidade espacial total de raios. Os valores correspondem ao número de raios por ano por quilômetro quadrado em cada pronto da grade de 0.25 graus.

A maior extensão em área das máximas densidade de tempestades elétricas sobre a AS foi observada na região da Floresta Amazônica, principalmente a Oeste e Sudoeste do Pico da Neblina região da cabeceira do Rio Negro, de tríplice fronteira entre Brasil, Colômbia e Venezuela. É notável que a topografia da região Amazônica aumenta a densidade de tempestades elétricas como é o caso da região do Pico da Neblina, principalmente entre a Venezuela e o Brasil, porém esta vasta região continua com valores de densidade de tempestades elétricas superior a  $2.5 \times 10^{-4} \text{ km}^{-2}$ , sugere que os efeitos da circulação atmosférica de grande escala e processos termodinâmicos conforme aponta Albrecht et al. (2011), são os principais agentes de instabilidade atmosférica que promovem o maior

número de tempestades elétricas da AS.

No entanto, ao analisar a densidade de raios juntamente com a densidade de tempestades elétricas, observa-se que na região central do estado do Amazonas, há pontos da grade de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  com valores entre 30–40 raios por ano por quilômetro quadrado ( $\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ), como mostra a figura 12, e densidades de sistemas, figura 11, entre  $2.9 - 3.5 \times 10^{-4}$  tempestades elétricas por quilômetro quadrado ( $\text{km}^{-2}$ ). Na região Norte da Argentina, Sudoeste e Sul do Paraguai, valores de densidade de raios de mesma magnitude são observados, porém com uma densidade de sistemas entre  $1.0 - 1.8 \times 10^{-4} \text{ km}^{-2}$ . Portanto, considerando os 14 anos de observações do TRMM investigados nesta pesquisa, podemos afirmar que, nas regiões de máxima densidade de raios sobre a Bacia do Prata, as tempestades elétricas produzem entre 195–323% mais raios por quilômetro quadrado por ano do que em relação as tempestades elétricas sobre as regiões de máximas densidades de raios sobre a Bacia Amazônica.

Nas figuras 13 e 14, a densidade espacial de raios e de tempestades elétricas, foi calculada para os períodos associados a cada estação do ano: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), março, abril e maio (MAM), junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON). A tabela 5 mostra o acumulado de sistemas observados em cada estação do ano.

Na primavera austral (SON), é quando o continente Sul-americano recebe a maior incidência de raios. Apesar da estação de tempestades elétricas na região Sul da AS estar definida predominantemente em DJF, e ao Norte e Noroeste da AS predominantemente em SON, ao avaliar a densidade de raios, tanto sobre a Bacia do Prata quanto sobre a Bacia Amazônica, as maiores densidades de raios ocorrem em SON. Os valores de densidade de raios no mapa da figura 13d sobre ambas as bacias hidrográficas ( $11.4 - 40.0 \text{ raios ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ) indicam que as tempestades elétricas de primavera produzem entre 1 e 3 raios  $\text{mes}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . A maior densidade de raios da AS fica sobre a região do Lago Maracaibo durante SON em que as tempestades elétricas produzem 8 raios  $\text{mes}^{-1} \text{ km}^{-2}$  ( $90.7 \text{ raios ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ).

período de transição entre seco e chuvoso na maior parte da AS,

as maiores densidades de raios

Observa-se máximas densidades densidade de raios na região central da Amazônia, Argentina, Paraguai e Sul do Brasil.

Neste período destaca-se a taxa de raios sobre o Lago Maracaibo durante SON, na

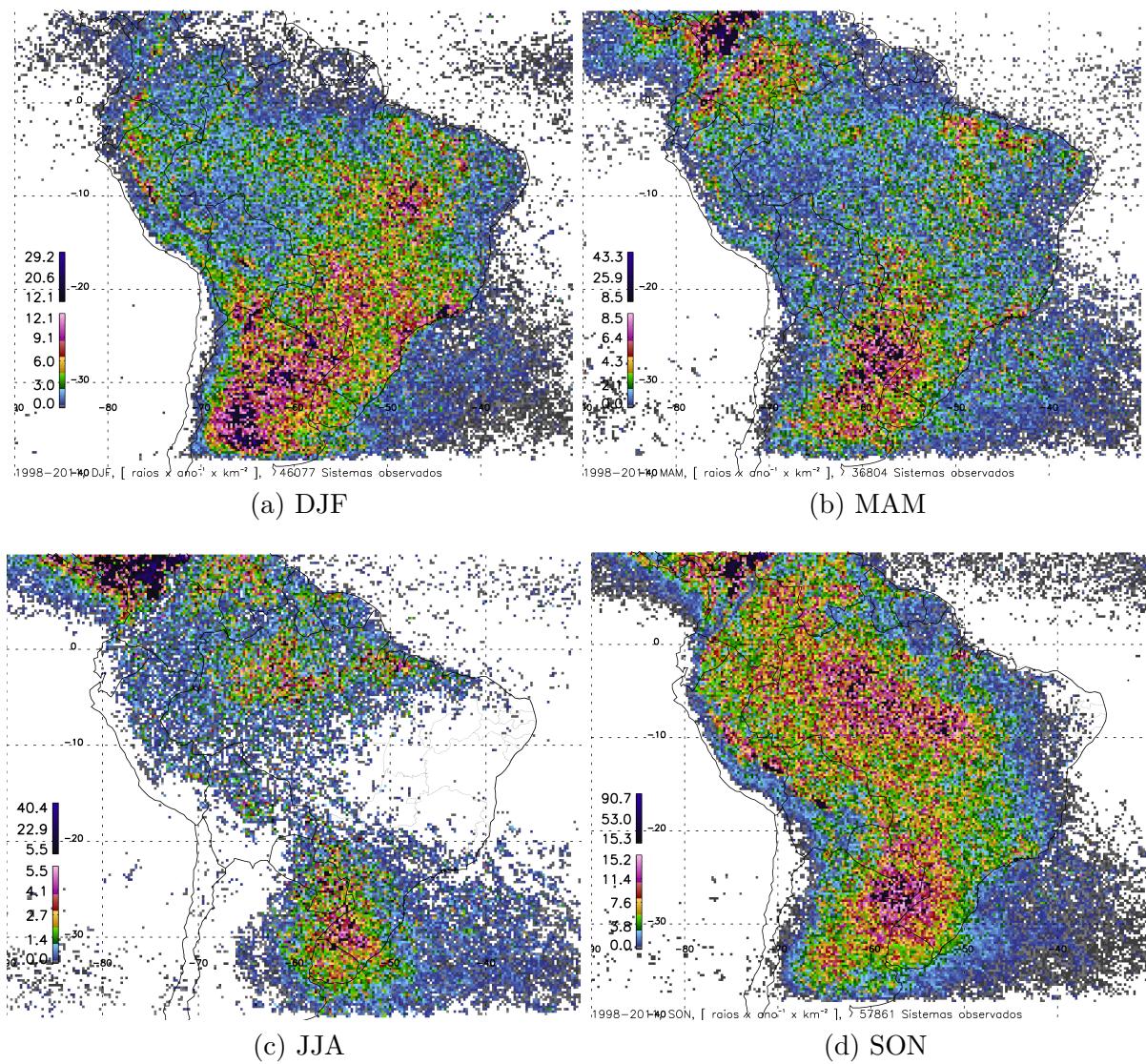


Figura 13: Densidade espacial sazonal de raios.

Venezuela, que no acumulado dos 14 anos atingiu o valor de 30 raios por mês de observação por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus. Em Albrecht et al. (2009), a região do Lago Maracaibo foi apontada como o máximo global das observações do TRMM.

Tabela 5: Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano.

Estação	Número de sistemas
Verão – DJF	46,077
Outono – MAM	36,804
Inverno – JJA	16,850
Primavera – SON	57,861

Durante DJF, os máximos de raios são observados em Mato Grosso do Sul; Sul de

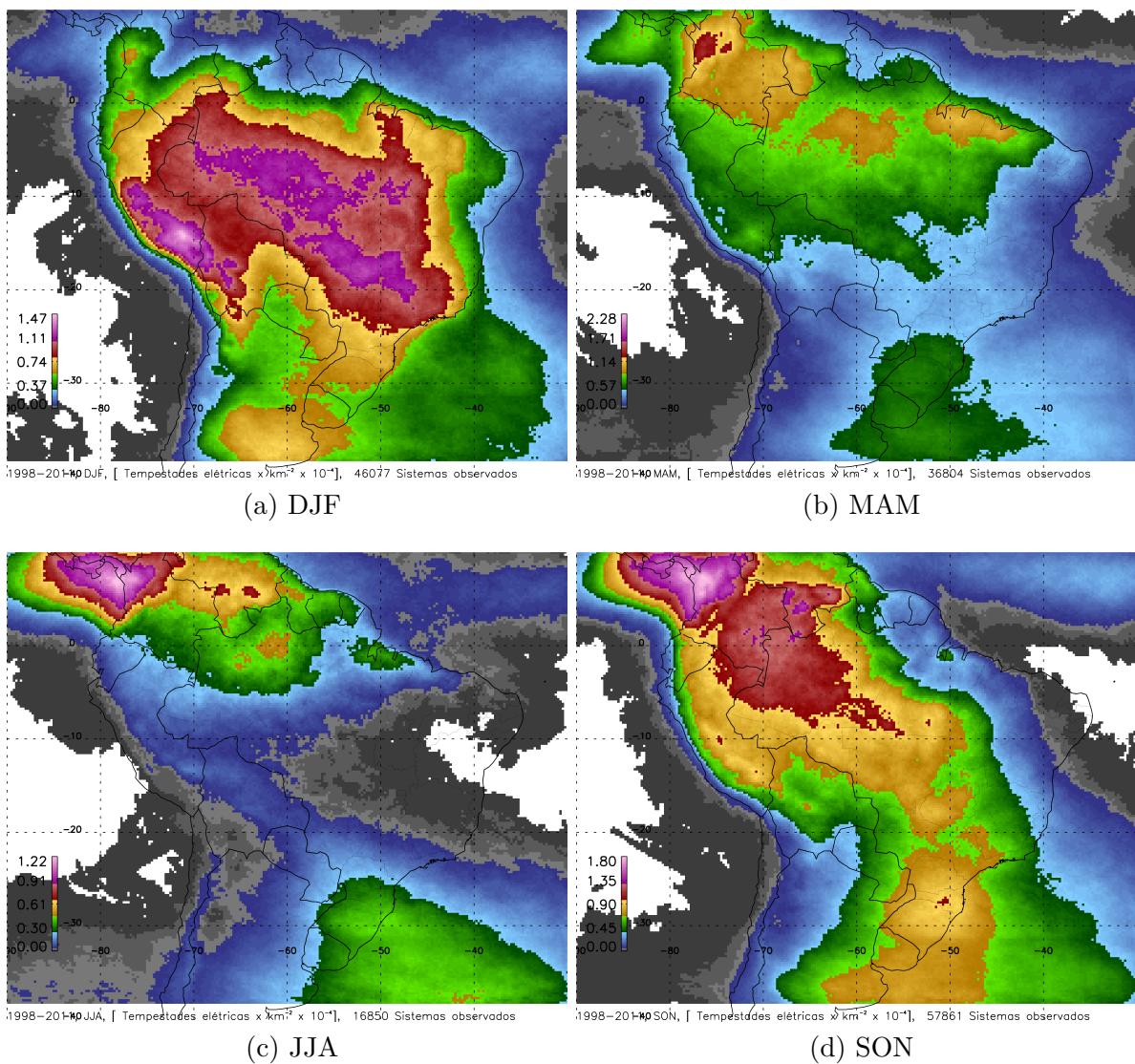


Figura 14: Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas.

Mato Grosso; Sudeste Brasileiro, entre costa de Santa Catarina e o Vale do Ribeira em São Paulo, região de fronteira entre São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, onde localiza-se o Parque Nacional Itatiaia e o Pico das Agulhas Negras; interior de São Paulo; Goias; e na Bacia do Rio Tocantis. Apesar de observarmos o maior número de raios durante a estação de transição entre seca e chuvosa, essas regiões Centrais e Sudeste da AS possuem os processos de eletrificação regulados durante a estação chuvosa.

Em Petersen et al. (2002), é mostrado que mesmo que se tenha observado diminuição na taxa de raios e redução da intensidade convectiva durante o regime de vento de Oeste no experimento TRMM *Large-scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA), em outras regiões da AS durante o período chuvoso, há um aumento da taxa de raios.

Considerando que o regime de ventos de Leste e Oeste identificado no LBA está

associado com as fases ativas e inativas do SMAS conforme descrevem Carvalho et al. (2002), pode-se considerar que as máximas taxas de raios apresentadas na figura 13a são moduladas pelas variações na circulação sinóptica associadas com o processos de formação e dissipação da SACZ (PETERSEN et al., 2002; ALBRECHT et al., 2011; Silva Dias et al., 2002).

Durante MAM, quando o máximo de chuvas começa a retornar para o Hemisfério Norte, observamos as tempestades elétricas bastante concentradas na região Norte e Nordeste da AS, como mostra a figura 14b. Neste período, principalmente nas regiões das cidades de Belém, estado do Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte e Paraíba, ocorrem: os máximos de chuva, os máximos de densidade de raios e os máximos de densidade de tempestades elétricas. Esse sincronismo não é comum.

Ao comparar as figuras 13 e 14 observa-se que as regiões de máxima densidade espacial de raios não são as regiões de máxima densidade de tempestades elétricas. Os máximos de raios ficam situados em regiões de transição, deslocados dos máximos de sistemas, reforçando a hipótese de Williams et al. (2002), em que se espera maior atividade elétrica de nuvem em um ambiente de transição entre seco e úmido.

Por exemplo, a maior área continua da América do Sul com taxas anuais de raios superiores a 20 raios por ano por quilômetro quadrado, como mostra a figura 12, ocorre na região Sul da AS. Tanto na figura 11 quanto na figura 14, podemos observar um forte gradiente de sistemas nesta região, que marca a transição entre o clima Desértico no Deserto do Atacama e Semi-árido na Argentina para o clima Subtropical úmido, promovendo um ambiente de transição seco/úmido permanente para os sistemas que iniciam-se principalmente na região da Serra de Córdoba na Argentina e se propagam para Noroeste.

A partir do estudo das densidades de tempestades elétricas e raios, a figura 15, representa as regiões em que as tempestades elétricas são mais eficientes na produção de raios. Foi calculada a taxa de raios por tempestade elétrica por ano por quilômetro quadrado. Os maiores valores desta dimensão que associa-se com eficiência espacial que cada região de 0.25 graus tem em produzir raios, representam os locais em que se tem menor número de sistemas em relação ao número de raios durante os 14 anos de dados.

A região da bacia do Prata é a maior extensão contínua com os maiores valores de eficiência espacial de produção de raios. Porém destacam-se regiões menores como no Vale do Ribeira em São Paulo, Pico das Agulhas Negras em Minas Gerais, região serrana do Rio de Janeiro, parte Sul do Tocantis, parte Leste e Norte do Pará e Leste do estado do Amazonas. Estas regiões podem estar associadas com regiões de tempo severo. Locais

em que a topografia ou a circulação local intensifica os sistemas.

Na região do Parque Nacional Natural Paramillo na Colômbia e no Lago Maracaibo na Venezuela, a taxa de raios por em cada área de tempestade de 0.25 graus mostra valores com a mesma magnitude de regiões na Bacia do Prata, mesmo que o número de raios e de sistemas produzidos ao Norte sejam maiores.

Algumas regiões no pico da Cordilheira dos Andes são bastante eficientes, principalmente na região da cidade de Cochabamba na Bolívia.

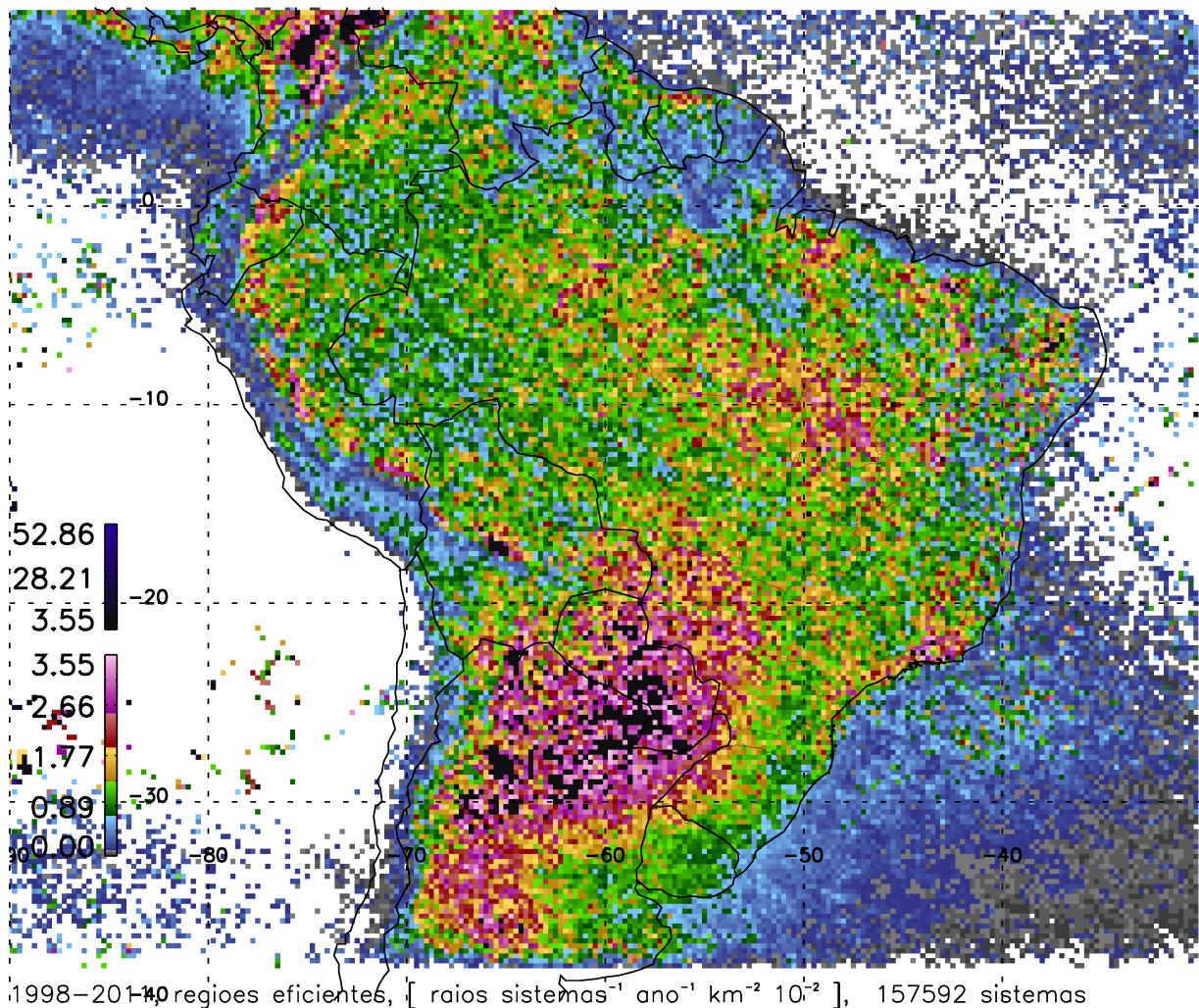


Figura 15: Eficiencia de tempestade

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R.; GOODMAN, S.; BUECHLER, D.; CHRONIS, T. Tropical frequency and distribution of lightning based on 10 years of observations from space by the lightning imaging sensor (lis). In: **Conference on the meteorological applications of lightning data.** [S.l.: s.n.], 2009.
- ALBRECHT, R. I. **Comunicação Pessoal.** São Paulo: [s.n.], 2010.
- ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A.; DIAS, M. A. S. Electrification of precipitating systems over the amazon: Physical processes of thunderstorm development. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 116, n. D8, 2011.
- BOCCIPPIO, D. J.; KOSHAK, W. J.; GOODMAN, S. J.; MACH, D. M. Science data validation plan for the lightning imaging sensor (lis). 1996.
- BOMBARDI, R. J. **Variabilidade do regime de monções da América do Sul: o clima presente e projeções para o século XXI.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2008.
- BÜRGESSER, R. E.; NICORA, M. G.; AVILA, E. E. Characterization of the lightning activity of “relámpago del catatumbo”. **Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 77, p. 241–247, 2012.
- CARVALHO, L.; JONES, C.; Silva Dias, M. A. Intraseasonal large-scale circulations and mesoscale convective activity in tropical south america during the trmm-lba campaign. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–9, 2002.
- CARVALHO, L. M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The south atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.
- 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.
- CECIL, D. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J. Gridded lightning climatology from trmm-lis and otd: Dataset description. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 135, p. 404–414, 2014.
- CHRISTIAN, H.; BLAKESLEE, R.; GOODMAN, S.; MACH, D. Algorithm theoretical basis document (atbd) for the lightning imaging sensor (lis). **NASA TM**, 2000.

- 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.
- CUSTÓDIO, M. d. S. **Impacto da resolução dos modelos globais na América do Sul: climatologia, variabilidade e ciclo diurno.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2013.
- 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>>.
- GRIMM, A. M. The el niño impact on the summer monsoon in brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003.
- JAXA/NASA. **Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) – Precipitation Radar Algorithm – Instruction Manual For Version 7.** 2011. Disponível em: <[http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/documents/PR\\_algorithm\\_product\\_information/pr\\_manual/PR\\_Instruction\\_Manual\\_V7\\_L1.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/documents/PR_algorithm_product_information/pr_manual/PR_Instruction_Manual_V7_L1.pdf)>. Acesso em: 01 jan. 2012.
- JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Active and break phases in the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 15, n. 8, p. 905–914, 2002.
- 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.
- MADDOX, R. A. Mesoescale convective complexes. **Bulletin American Meteorological Society**, 1980.
- 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.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the andes as derived from the ncep-ncar reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004.
- 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. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of trmm measurements. **Journal of Climate**, v. 16, n. 10, p. 1456–1475, 2003.
- 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.; NESBITT, S. W.; BLAKESLEE, R. J.; CIFELLI, R.; HEIN, P.; RUTLEDGE, S. A. Trmm observations of intraseasonal variability in convective regimes over the amazon. **Journal of Climate**, v. 15, n. 11, p. 1278–1294, 2002.
- 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.
- SHI, W.; HIGGINS, R. W.; YAROSH, E.; KOUSKY, V. E. **The Annual Cycle and Variability of Precipitation in Brazil**. 2009. Disponível em: <[http://www.cpc.noaa.gov/products/outreach/research\\_papers/ncep\\_cpc\\_atlas/9](http://www.cpc.noaa.gov/products/outreach/research_papers/ncep_cpc_atlas/9)>. Acesso em: 17 set. 2010.
- Silva Dias, M. A. F. d.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; DIAS, P. d. S.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A. et al. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the amazon region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–39, 2002.
- 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.
- WILLIAMS, E.; ROSENFELD, D.; MADDEN, N.; GERLACH, J.; GEARS, N.; ATKINSON, L.; DUNNEMANN, N.; FROSTROM, G.; ANTONIO, M.; BIAZON, B. et al. Contrasting convective regimes over the amazon: Implications for cloud electrification. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–50, 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.
- 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>>.