

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	Observações do TRMM sobre a América do Sul.	19
2	Acumulados dos raios e áreas das 154,189 tempestades elétricas identificadas.	20
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.	24
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.	25
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.	27
6	Densidade espacial de tempestades elétricas e raios observados entre 1998 e 2011.	30
7	Densidade espacial sazonal de raios.	31
8	Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas.	33
9	Eficiencia de tempestade	34
10	Estudo das frequências de ocorrências de tempestades elétricas selecionadas pelo 90º percentil dos índices de FT e FTA, por extensão em área e por temperatura de brilho de topo das nuvens.	36

11	Diagramas de Contorno de Frequência por Altitude (CFADs) para tempestades elétricas ordenadas pelo 90º percentil dos índices FTA e FT, para a América do Sul em cada $10^\circ \times 10^\circ$. Os perfis de precipitação do PR-TRMM (1998-2011) foram separados em com e sem raios, conforme as observações dos <i>events</i> do LIS. Em cada caixa pode-se verificar a porcentagem (%) de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente, (P) o numero de perfis computados, (L) o número de ocorrência de refletividade no nível de máxima ocorrência e (H) o nível de máxima ocorrência.	42
12	Diagramas de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD) e Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura (CCFTD) para tempestades elétricas ordenadas pelo 90º percentil dos índices FTA e FT. Os perfis de precipitação do PR-TRMM (1998-2011) foram separados em com e sem raios, conforme as observações dos <i>events</i> do LIS. Em cada caixa pode-se verificar a porcentagem (%) de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente, (P) o numero de perfis computados, (L) o número de ocorrência de refletividade no nível de máxima ocorrência e (T) o nível de temperatura de máxima ocorrência de Z_{ef}	43
13	Derivadas das linhas de contornos da amostra de probabilidade cumulativa.	43
14	Distribuição espacial dos valores do 50º, 90º, 95º e 98º percentil do índice FTA a cada região de 2.5 por 2.5 graus.	44

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.	28
4	Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano.	32

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	
1 METODOLOGIA	14
1.1 O SATÉLITE TRMM	14
1.1.1 Radar de Precipitação	14
1.1.2 Imageador de relâmpagos	15
1.1.3 Radiômetro no visível e infravermelho	15
1.1.4 Radiômetro de microondas	15
1.2 FONTE DE DADOS	16
1.3 RAIOS COM DIFERENTES TAXAS DE DESCARGAS DE RETORNO .	16
1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS	17
1.5 A TAXA DE RAIOS POR TEMPESTADE ELÉTRICA	18
1.6 DENSIDADES ESPACIAIS DE RAIOS E SISTEMAS	18
1.7 MORFOLOGIA DA ESTRUTURA 3D DA PRECIPITAÇÃO	21
1.7.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos	22
2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL	24
2.1 CICLO DIURNO E CICLO ANUAL	24
2.2 DENSIDADES ESPACIAIS	29
3 A SEVERIDADE DOS SISTEMAS	35

3.1	TAMANHO E TEMPERATURA DE TOPO DAS NUVENS DE TEMPES-	
	TADES ELÉTRICAS POTENCIALMENTE SEVERAS	35
3.2	ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DA PRECIPITAÇÃO DAS TEMPES-	
	TADES ELÉTRICAS SEVERAS	37
3.3	SEVERIDADE REGIONALIZADA	41
	REFERÊNCIAS	45

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
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis
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>
PR	<i>Precipitation Radar</i>
SACZ	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SAMS	Sistema de Monção da América do Sul
SIRT	<i>Sferics Infrared Rainfall Technique</i>
SON	Setembro, outubro e novembro

TMI *TRMM Microwave Imager*
TRMM *Tropical Rainfall Measuring Mission*

VIRS *Visible and InfraRed Scanner*

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

A_t	Área da tempestade elétrica
FT	Taxa de raios por tempo [<i>raios minuto</i> ⁻¹]
FTA	Taxa de raios por tempo por área [<i>raios dia</i> ⁻¹ <i>km</i> ⁻²]
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 CCD¹, 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 μm , 1,61 μm , 3,75 μm , 10,8 μm e 12 μm . Sua resolução horizontal atinge 2,11 km no nadir e 720 km de varredura (NASDA, 2001).

Nesta pesquisa, utilizamos apenas o canal 10,8 μm , 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

¹Um 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.

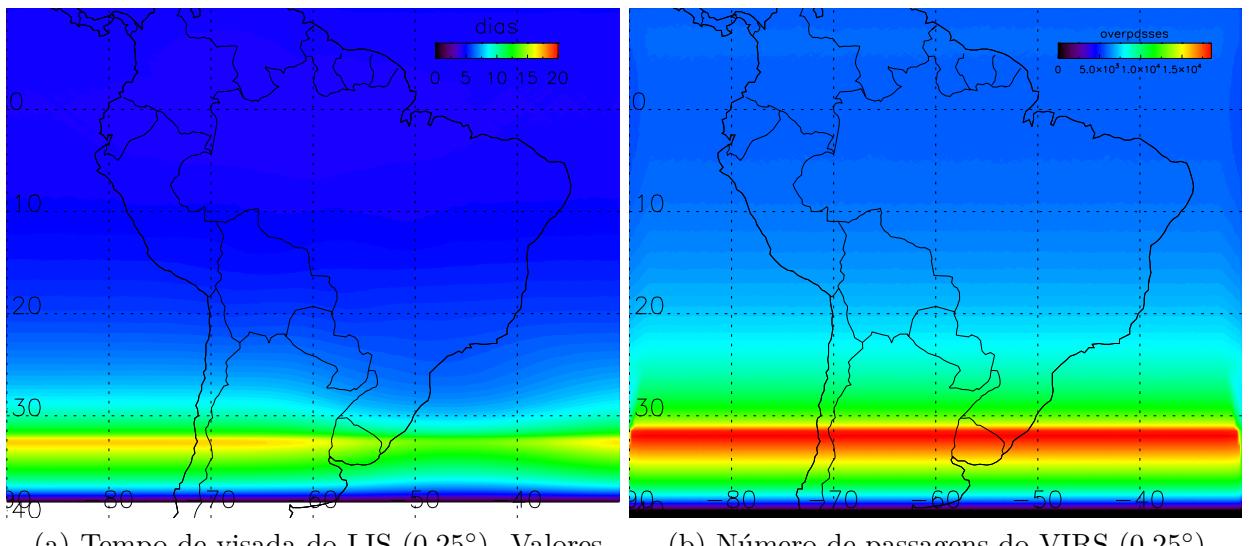


Figura 1: Observações do TRMM sobre a América do Sul.

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.

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

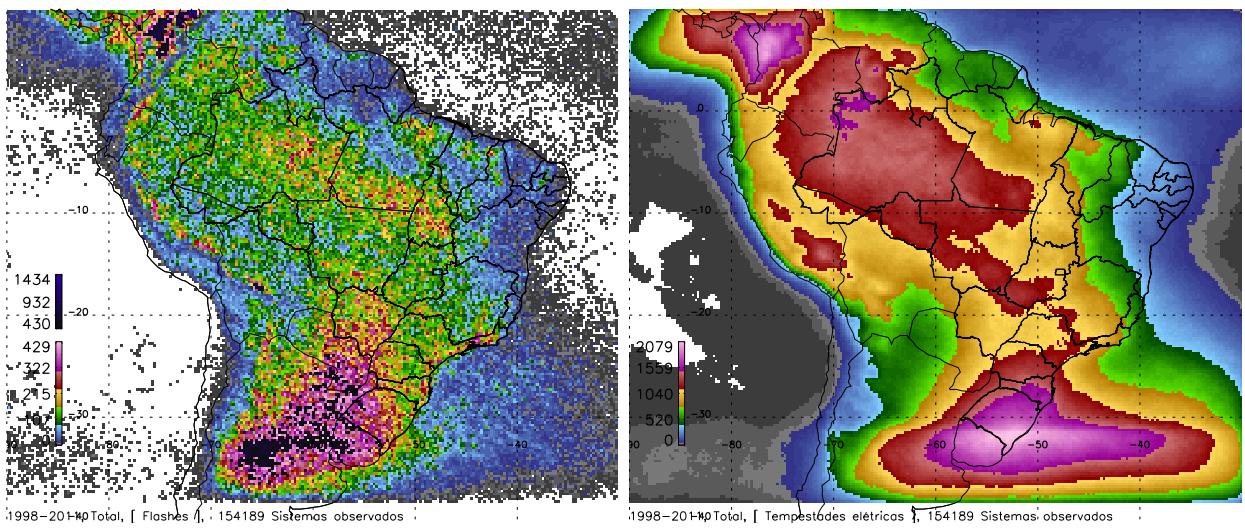


Figura 2: Acumulados dos raios e áreas das 154,189 tempestades elétricas identificadas.

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

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 acreção² 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

²A 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.

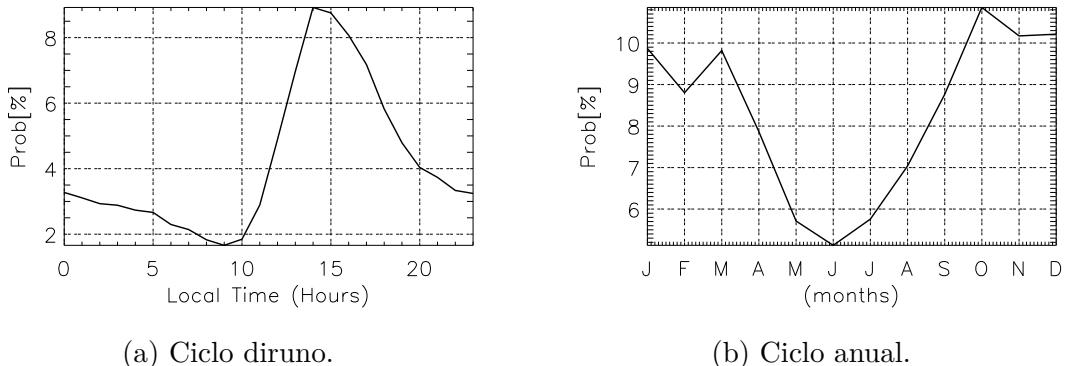


Figura 3: Ciclo diurno e anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 154,189 sistemas identificados.

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.

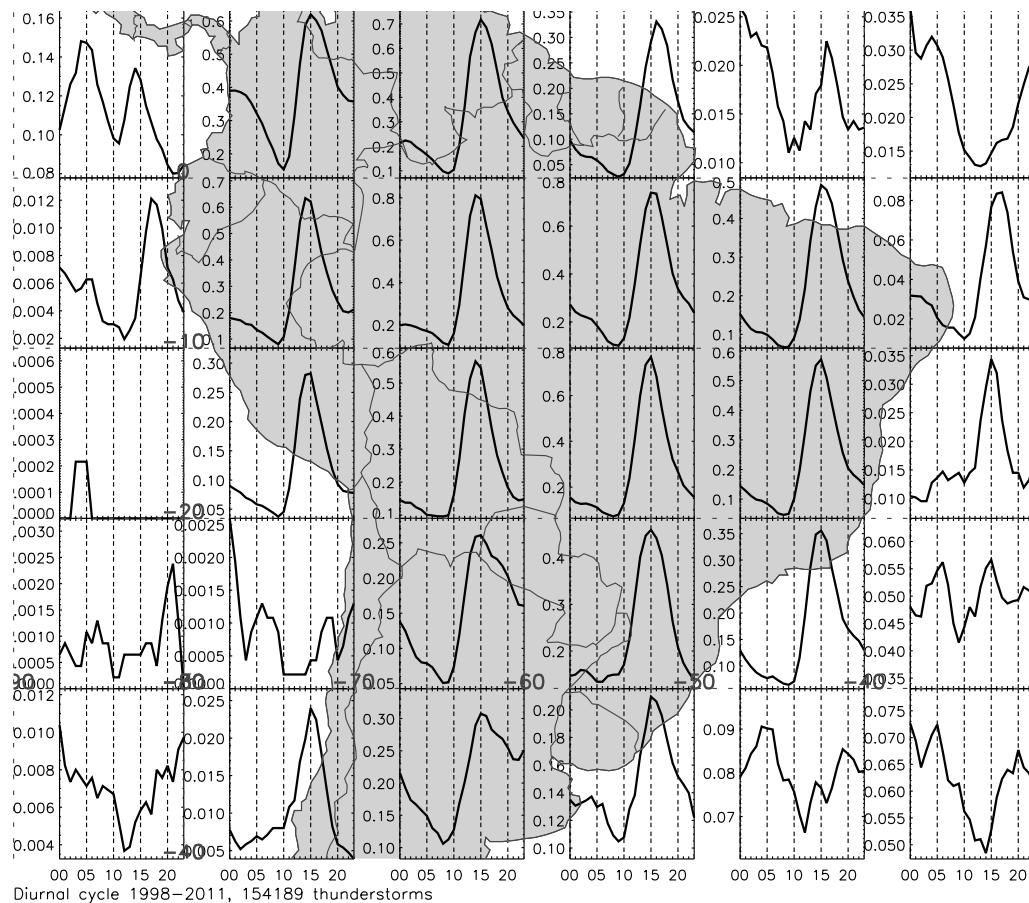


Figura 4: Ciclo diurno em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 154,189 sistemas observados.

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°–10° Norte e 80°–70° 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° – 10° Norte e 90° – 80° 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° – 30° Sul e 50° – 30° Oeste e 30° – 20° Sul e 40° – 30° 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° – 0° Sul e 70° – 50° Oeste e 20° – 10° Sul e 60° – 50° 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, apenas nessas duas horas.

Entre 30° – 20° Sul e 60° – 50° 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 no 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.

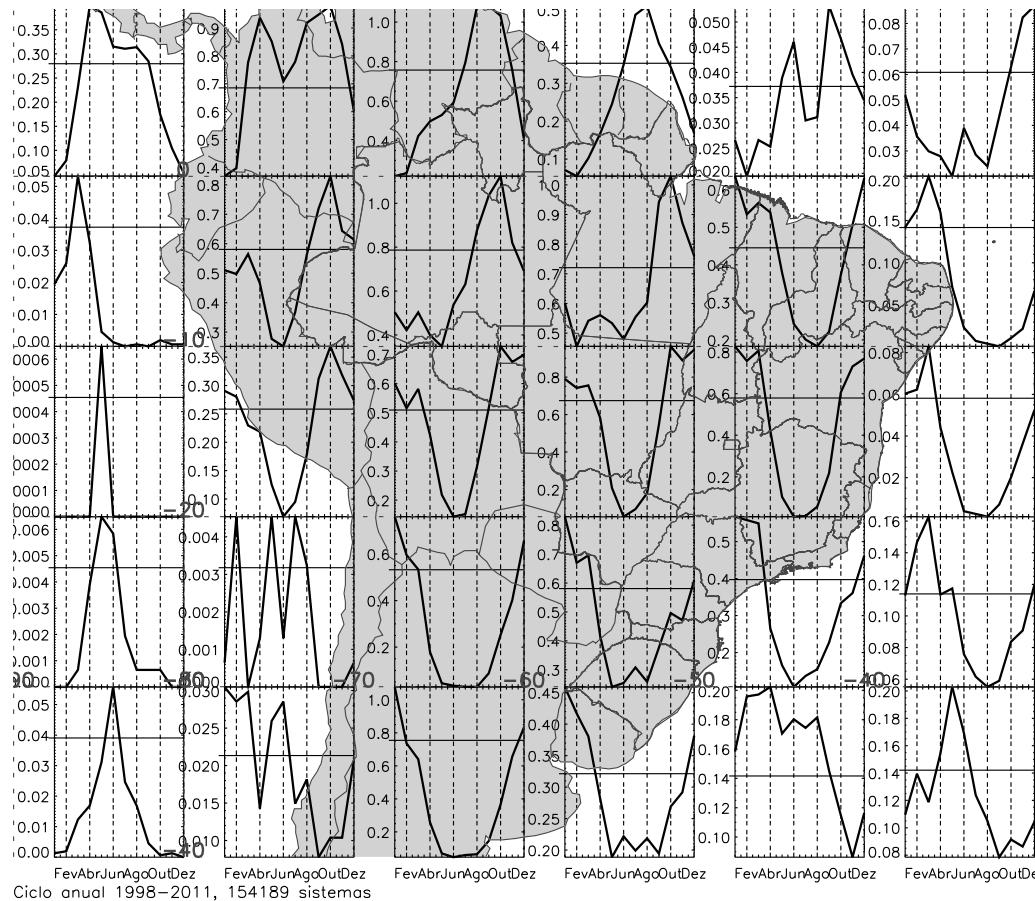


Figura 5: Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 154,189 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, 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 uma estação de tempestades elétricas bastante definida entre dezembro e janeiro, sendo que entre maio e agosto, a probabilidade de ocorrência de sistemas é praticamente 0%.

As estações de tempestades elétricas se configuram conforme o Sistema de Monção da América do Sul (SAMS) . Na região central da América do Sul, observa-se que com o

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

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 (ZHOU; LAU, 1998; GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012).

Entre 10° – 0° Sul e 80° – 60° 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 austral, 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° 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 tempestades elétrica ocorreu na vinda da estação chuvosa para o Hemisfério Sul.

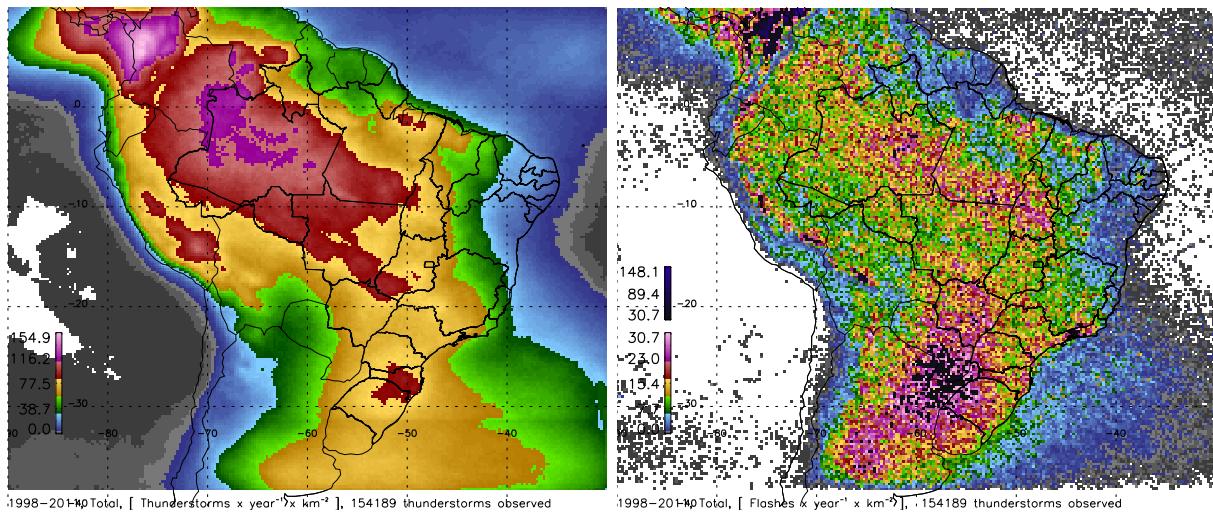
Na região Nordeste do Brasil, entre 10° – 0° Sul e 40° – 30° Norte, o máximo de chuva ocorre juntamente com o máximo de ocorrência de tempestades elétricas, depois da atuação da SACZ no continente.

2.2 DENSIDADES ESPACIAIS

Considerando o método descrito em 1.6, referente ao cálculo da densidade espacial de tempestades elétricas, equação 4, e densidade espacial de raios, equação 3, nesta seção 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.



(a) Densidade espacial total de tempestades elétricas. Os valores correspondem ao número de sistemas por ano por quilômetro quadrado em cada pronto da grade de 0.25 graus.

(b) 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.

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 atuação da ITCZ combinada com a convergência de umidade e liberação de calor latente e sensível na Floresta Amazônica, além que regular o SAMS, são os principais propulsores de tempestades elétricas da América do Sul.

No entanto, os mecanismos de eletrificação são bem mais eficientes nas tempestades elétricas no Sul da AS, sobe a Bacia do Prata. Na figura 6, observa-se que na Amazônia, as regiões com taxa de raios superiores $30 (\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2})$, possuíram taxa de sistemas acima de $120 (\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2})$, enquanto na região da Argentina e Paraguai, as mesmas taxas de raios são atingidas com uma taxa de sistemas em torno de $40 (\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2})$.

Nas figuras 14 e 8, 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 4 mostra o acumulado de sistemas observados em cada estação do ano.

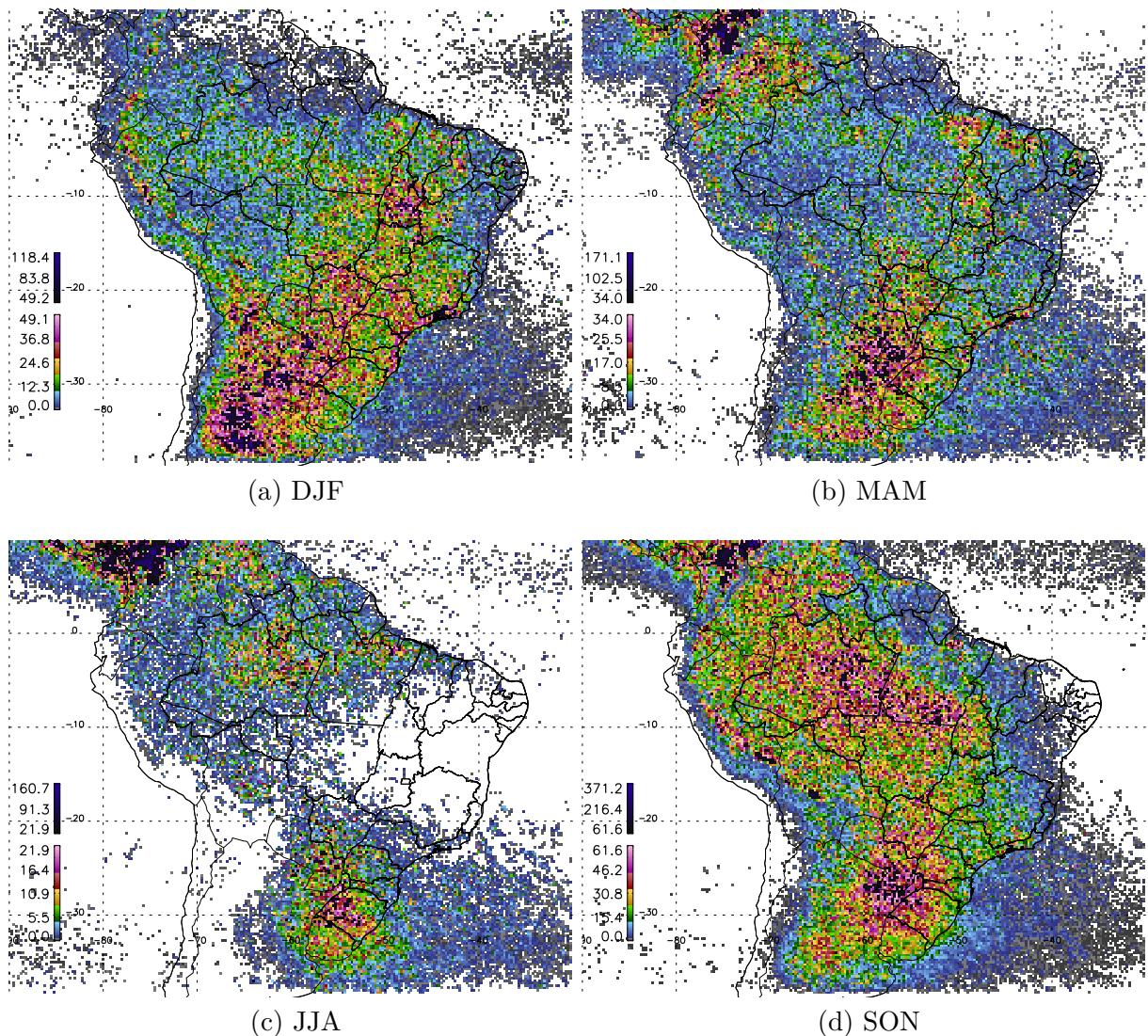


Figura 7: Densidade espacial sazonal de raios.

Na primavera austral (SON), início do SAMS, a intensificação dos alísios vindos do Atlântico Norte, e o aumento gradativo da evapotranspiração na Floresta Amazônica vão intensificando o transporte de umidade da bacia do Amazônia para a bacia do Prata (MARENGO et al., 2004). Esse processo de início da configuração do SAMS provoca a estação com a maior taxa de raios do continente Sul Americano, e esta, ocorre em regiões no centro no continente principalmente a Leste da Cordilheira dos Andes: na Amazônia Central, Argentina, Paraguai e Sul do Brasil.

Neste período destaca-se a taxa de raios sobre o Lago Maracaibo durante SON, na 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 4: Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano.

Estação	Número de sistemas
DJF	44,534
MAM	36,096
JJA	16,786
SON	56,773

Durante DJF, os máximos de raios são observados em Mato Grosso do Sul; Sul de 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, aonde 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 SAMS conforme descrevem Carvalho et al. (2002), pode-se considerar que as máximas taxas de raios apresentadas na figura 14a são moduladas pelas variações na circulação sinótica 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 8b. Neste período, principalmente nas regiões das cidade 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 14 e 8 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 6b, ocorre na região Sul da AS. Tanto na figura 6a quanto na figura 8, 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.

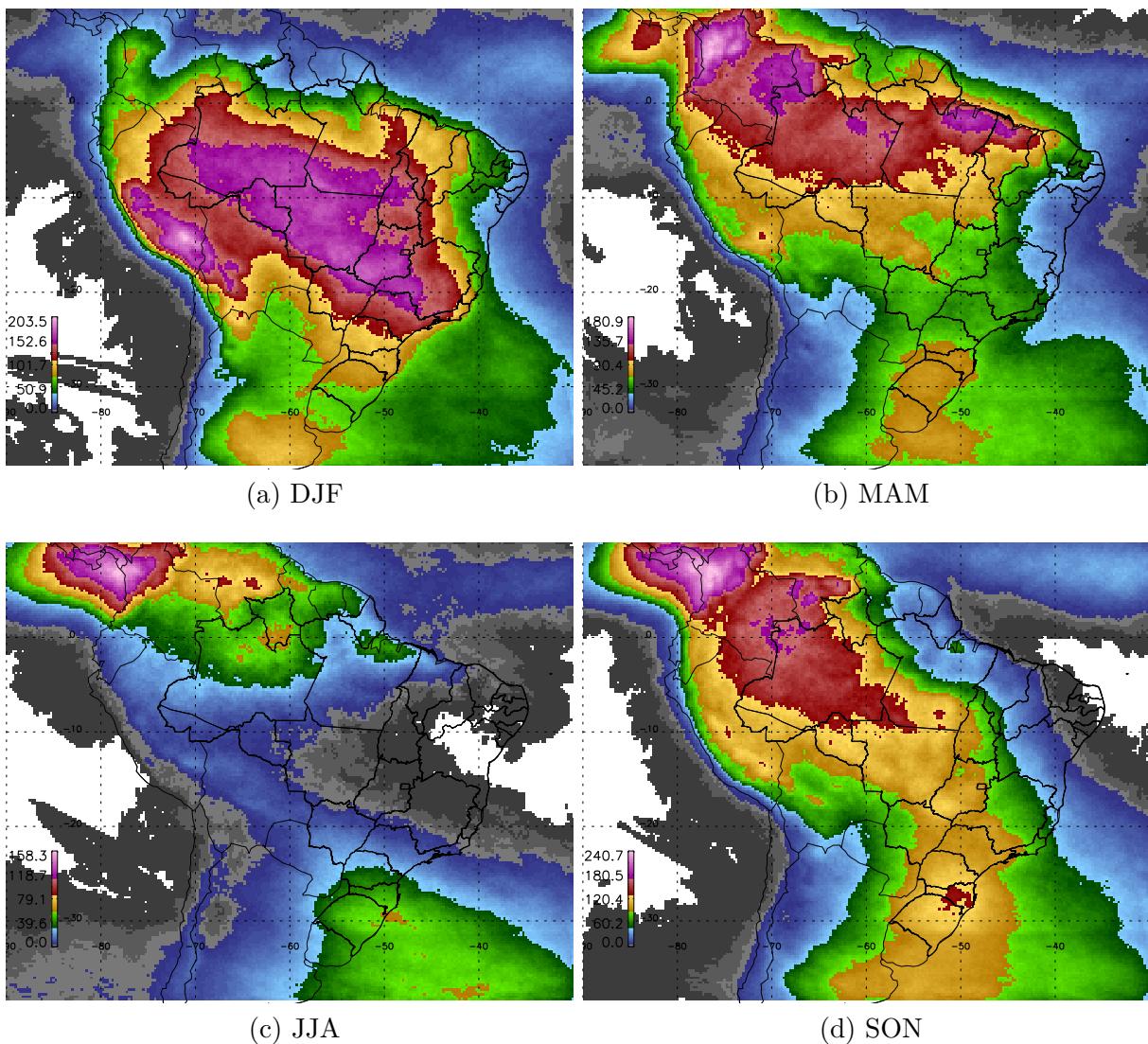


Figura 8: Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas.

A partir do estudo das densidades de tempestades elétricas e raios, a figura 9, 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.

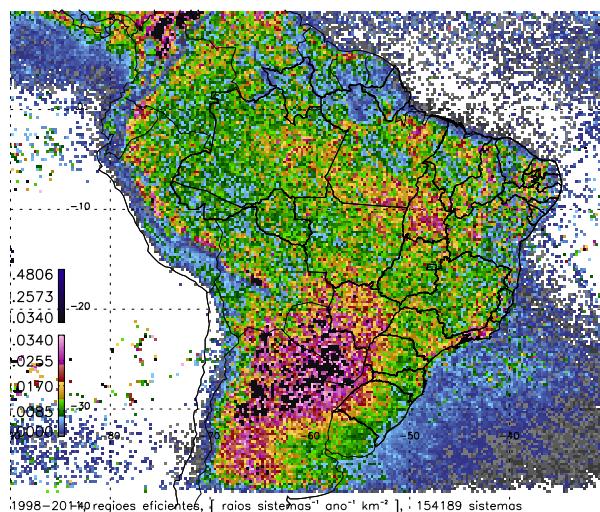


Figura 9: Eficiencia de tempestade

3 A SEVERIDADE DOS SISTEMAS

Com base nos índices FT e FTA, nesta seção identificamos qual desses índices representam tempestades elétricas com maior intensidade convectiva, ou seja, os sistemas com as maiores taxa de raios por minuto ou os sistemas com as maiores taxas de raios por dia por área.

As equações 1 e 2 foram aplicadas para todas as 96,281 tempestades elétricas, as quais estiveram dentro da varredura do PR, obtendo duas séries de dados: os valores de FT e a os valores de FTA.

Os valores de FT e FTA foram ordenados e selecionadas as tempestades elétricas do 90º percentil das duas amostras.

3.1 TAMANHO E TEMPERATURA DE TOPO DAS NUVENS DE TEMPESTADES ELÉTRICAS POTENCIALMENTE SEVERAS

Observa-se que os maiores valores de FT e FTA correspondem a sistemas com tamanhos bem distintos. Conforme é mostrado na figura 10a, verifica-se que as máximas probabilidades de ocorrência de tempestades elétricas ordenadas pelo índice FTA, ocorrem em sistemas com área 3 ordens de grandeza menor do que no índice FT.

As tempestades elétricas ordenadas pelo índice FT são maiores em extensão por que conforme aumenta a área do sistema, maior a probabilidade de haver raios na região. Uma tempestade elétrica com 10^5 km^2 , provavelmente terá maior número de descargas observadas durante o tempo de visada do LIS do que uma com 10^2 km^2 .

Ao normalizar a taxa de raios no tempo por A_t , o número de raios fica diluído na extensão do sistema, evidenciando que os maiores valores de FTA correspondem aos sistemas com as maiores densidades espaciais de raios, cuja a extensão em área e o número de raios possuem maior probabilidade de ser menor do que nos sistemas com os maiores valores de FT.

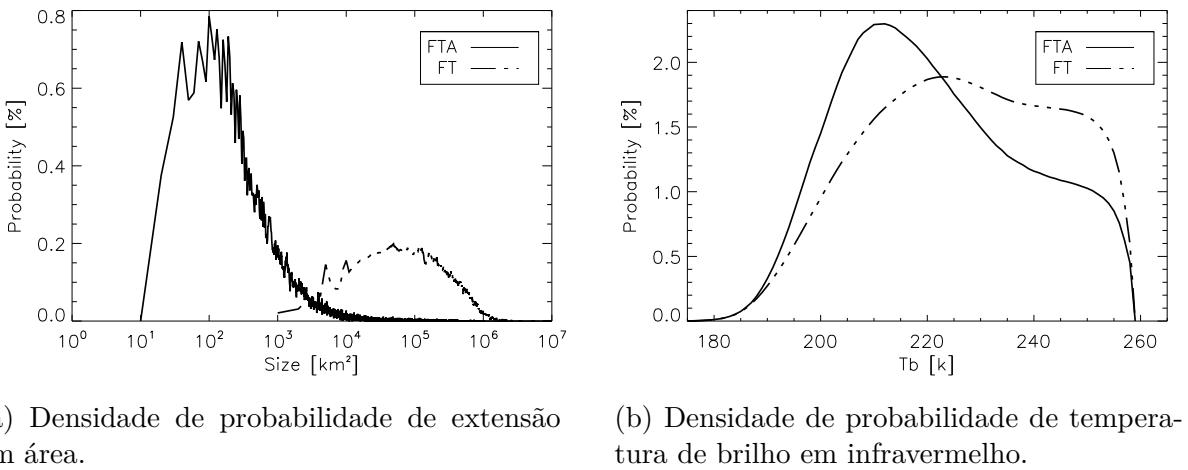


Figura 10: Estudo das frequências de ocorrências de tempestades elétricas selecionadas pelo 90º percentil dos índices de FT e FTA, por extensão em área e por temperatura de topo de nuvens.

A frequência de ocorrência das temperaturas de brilho associadas a radiância espectral observada no canal 4 do VIRS, para todos os pixels que definiram a área dos sistemas, é mostrada na figura 10b. Observa-se que o maior valor de probabilidade para a curva do índice FTA, possui temperatura de topo de nuvens aproximadamente 10 K mais frias do que em FT, indicando que a convecção nos sistemas ordenados por FTA é mais profunda na maioria das situações.

Morales e Anagnostou (2003) ao desenvolver a *Sferics Infrared Rainfall Technique* (SIRT), mostra que as regiões com temperatura de brilho inferior a 215 K e com ocorrência de *sferics* foram as regiões categorizadas como de maior precipitação associada.

Neste trabalho de pesquisa, ao selecionar as tempestades elétricas pelo índice FTA, os maiores valores de probabilidade de ocorrência, conforme é mostrado na figura 10b, concentram-se em temperaturas de brilho abaixo de 215 K.

Os sistemas selecionados pelo 90º percentil do índice FT possuem maior extensão em área e maior volume de chuva. São sistemas com vasta extensão estratiforme conforme descrevem Rasmussen e Houze Jr. (2011). As regiões das tempestades elétricas com precipitação convectiva, as quais são capazes de gerar chuva de granizo, frentes de rajada, tornados, enchentes rápidas, ocupam área bem menor do que as áreas estratiformes (Houze Jr. et al., 2007).

Avaliando a densidade de probabilidade de fração de chuva total, convectiva e estratiforme das tempestades elétricas, os máximos valores de ocorrência associados ao índice

FTA concentraram-se nas tempestades elétricas com 70% de área convectiva e 40% de área estratiforme enquanto que para os máximos valores de FT possuíram 20% de fração convectiva e 75% de fração estratiforme.

Talvez os sistemas selecionados pelo FTA estejam em estágio de maturação e conforme vão se dissipando vão ganhando área de chuva estratiforme e se enquadrando no grupo dos maiores índice de FT.

Como os sistemas selecionados pelo índice FT possuem área na ordem de 10^5 km^2 o PR observou com maior frequência, apenas 30% da área total da tempestade elétrica. Pois geralmente a varredura do PR não contempla toda a sua extensão. Para os sistemas escolhidos por FTA o PR teve maior probabilidade de observar entre 90-100% da área dos sistemas.

3.2 ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DA PRECIPITAÇÃO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS SEVERAS

Por meio dos níveis de contorno dos CFADs na figura 11, observa-se claramente que tanto para FTA quanto para FT, a parte sem raios possuiu maior percentual de perfis estratiformes e menores valores de Z_{ef} com as probabilidades mais representativas, entre 2-10%, em todos os níveis de altitude.

A parte eletricamente ativa possui maior percentual de perfis convectivos e com maiores valores de Z_{ef} em todos os níveis, confirmando a correlação positiva entre descargas elétricas e produção de chuva (PETERSEN; RUTLEDGE, 1998).

Se avaliarmos apenas os níveis de contorno da figura 11 com probabilidade entre 3-5% (cor verde), observa-se que os máximos de Z_{ef} para as chuvas sem raios, figuras 11a e 11c, não ultrapassaram 38 dBZ enquanto que para as chuvas com raios, figuras 11b e 11d, os valores de Z_{ef} atingiram 50 dBZ.

A figura 11c mostra que a chuva na região tropical, entre 10N-20S e 90W-30W, possui maior probabilidade de valores de Z_{ef} em torno de 25 dBZ nas altitudes de 0 km à 5 km. Observe os níveis de contorno com probabilidade entre 5-7% (cor amarela).

Ao comparar com a figura 11a quase não se observa o nível de probabilidade de cor amarela entre 0-5km. A precipitação mais próxima da superfície fica associada com valores entre 15-40 dBZ e probabilidades de 2% à 5%. Porém, a probabilidade entre 2-3% representada principalmente pela cor azul, mostra-se mais alargada do que em 11c e atinge 40 dBZ, com exceção entre 10N-10S e 80W-70W, região tropical da Cordilheira

dos Andes.

As chuvas na superfície associada com as porções de tempestades elétricas tropicais sem raios selecionadas por FT têm maior probabilidade de serem mais moderadas do que as selecionadas por FTA, as quais são mais aleatórias em intensidade mas podem atingir valores de Z_{ef} maiores.

Os CFADs referentes as tempestades elétricas selecionadas por FTA possuem contornos em níveis de altitude mais elevados do que os CFADs dos sistemas selecionados por FT, tanto para a parte com raios quanto para a parte sem raios. A diferença mais notável pode ser observada entre a figura 11a e 11c para 0S-10S e 50W-60W, região do estado do Tocantis no Brasil. O CFAD em 11a define valores de probabilidade em altitude 1,75 km mais elevada do que em 11c.

Nas regiões entre 10N-0S e 70W-80W e entre 20S-40S e 50W-60W, em que (CECIL et al., 2005) apontam como região das tempestades mais severas na América do Sul, os CFADs em 11b e 11a possuem contornos de probabilidade aproximadamente 1 km mais elevado do que em 11d e 11c.

Como o último nível de altitude dos CFADs deste trabalho é limitado por altitudes com até 10% de L, a maior definição de probabilidades de ocorrência em altitude para as tempestades selecionadas por FTA mostra que, as altas taxas de raios por km^2 estão associadas com a convecção mais profunda do que os sistemas com as maiores taxas de raios (FT).

Em geral a precipitação é bem mais frequente próxima da superfície, entre 0-5km de altitude. Acima da região de mistura, a precipitação é mais rara de ocorrer. Em (LIU et al., 2008) é mostrado que a densidade espacial de sistemas com no mínimo 20 dBZ em 2 km de altitude é globalmente maior do que os sistemas que atingem 20 dBZ em níveis superiores de altitude.

Principalmente nas regiões da figura 11 as quais o valor de H, marcado no topo direito de cada CFAD, é menor em 11b do que em 11d e mesmo assim os CFADs em 11b possuem maior altitude nos níveis de contorno de probabilidade, o índice definido como FTA associa-se com maior severidade de tempo do que o FT.

Pois mesmo que a refletividade mais ocorrente esteja abaixo da região de mistura, a precipitação acima de 7 km também é frequente, mostrando que nestas regiões os sistemas ordenados pelo FTA têm mais chuva na superfície, maior quantidade de hidrometeoros na região de mistura e precipitação acima de 10 km de altitude com bastante representa-

tividade estatística.

Por exemplo na região da Colômbia entre 10N-0S e 70W-80W, o nível H para a figura 11b é de 4,0 km e em 11d é de 4,2 km e os níveis de contorno da figura 11b possuem valores até 16 km de altitude, enquanto que em 11d os contornos param em 15 km.

Os contornos da figura 11b, principalmente para as altitudes acima de 5 km, mostram valores de refletividade entre 1-3 dBZ maiores do que em 11d. Para a chuva entre 1-2 km de altitude os valores são mais semelhantes entre as tempestades elétricas selecionadas por FTA e FT. Porém, para FTA (figura 11b) há um estreitamento da região de contorno com os maiores valores de probabilidade associada a chuva na superfície, entre 3-5%. Entre 20S-40S e 40-70W, o estreitamente é maior do que as demais regiões mostrando que as chuvas possuem maior probabilidade de estarem associadas com valores de 45 dBZ em 11b.

As probabilidades mais baixas de ocorrência de refletividade observadas nos CFADs da figura 11 estão associadas com a precipitação mais severa. Observe as faixas de contorno mais escuras entre 0,1-0,7% nas figuras 11b e 11d. Esta é a ocorrência de precipitação mais rara, porém pode estar associada com enchentes rápidas, alta taxa de raios, chuva de granizo, fortes rajadas de vento e até mesmo ocorrência de tornados em algumas regiões.

Os valores mais elevados de refletividade estiveram na figura 11b entre 20S-40S e 40W-70W, sobre a Bacia do Rio da Prata, que abrange o Sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina.

A dinâmica de formação de Sistemas Convectivos de Meso-escala, como é discutido em (VELASCO; FRITSCH, 1987) e (DURKEE; MOTE, 2009), somados com efeitos de topografia, como por exemplo a região da Serra de Córdoba na Argentina, a qual (RASMUSSEN; Houze Jr., 2011) mostram grande ocorrência de convecção profunda, promovem valores de refletividade de aproximadamente 45 dBZ entre 10-15 km de altitude e chuvas na superfície com 55 dBZ, como mostra os contornos com as probabilidades mais raras.

A partir das figuras 12b e 12d, iremos avaliar a intensidade convectiva dos grupos FTA e FT com base na velocidade de crescimento de Z_{ef} em função do aumento da temperatura, para os quartis de 30%, 50%, 70% e 95% da amostra de probabilidade de Z_{ef} por temperatura, presentes nas figuras 12a e 12c.

Para a caixa entre 30S-40S e 60W-70W, foram extraídas as linhas de contorno do diagrama CCFTD correspondentes aos percentis de 30%, 50%, 70% e 95%. Após foi calculada a derivada das respectivas linhas de contorno.

Desta forma podemos avaliar a taxa de aumento e decrescimento em dBZ/°C, a cada nível de temperatura para diferentes percentis da amostra de probabilidade dos diagramas da figura 12.

Na figura 13a, vamos observar a derivada da mediana da amostra de probabilidade, que corresponde a derivada da linha cor preta presente nas figuras 12b e 12d. Em 0°C o aumento de Z_{ef} é 0.2 dBZ/°C maior para as tempestades elétricas ordenadas pelo índice FT, indicando que o derretimento estratiforme é maior do que é observado para o grupo das FTA.

O percentual de perfis estratiformes na caixa entre 30S-40S e 60W-70W relacionada ao grupo das FT é 3,7% maior do que em FTA (ver figuras 11 ou 12).

Mas entre -5°C e -18°C a taxa de aumento de dBZ é maior para o grupo das FTA, mostrando que o processo de acreção é mais vigoroso.

Observa-se também que um aumento mais rápido na taxa de dBZ/°C em -25°C para FTA e em -20°C para FT. Esse aumento está mais relacionado com o processo de agregação, que se mostra mais eficiente em -25°C para FTA, provavelmente pelo fato da corrente ascendente injetar maior quantidade de vapor d'água em regiões com altitudes mais elevadas, o que favorece também a acreção e interação entre o *graupel* e flocos de neve.

Para os dois grupos, FTA e FT como mostra a figura 13a, observa-se que conforme o percentil da amostra de probabilidade aumenta, a taxa de aumento de Z_{ef} com a temperatura vai ficando menor em torno de 0°C e maior para temperaturas mais frias. O percentil de 95% mostra maior taxa de aumento em -12°C para FTA e -8°C para FT, o que é uma forte evidencia de uma região de mistura bem mais espessa do que para os percentis inferiores.

Agora quando comparamos a análise da velocidade de aumento de Z_{ef} com outras regiões, a microfísica de eletrificação se mostra bem diferente em cada local. Na figura 13a temos uma região ao Sul da América do Sul enquanto que em 13b a região fica ao Norte, entre 0N-10N e 60W-70W. Ambas são regiões de ocorrência de sistemas severos conforme aponta (CECIL et al., 2005).

Na figura 13b, para todos os percentis expostos, a taxa de dBZ/°C entre -15°C e -40°C é maior do que em 13a. Portanto podemos afirmar que a eletrificação dos sistemas ao Norte é muito mais governado pelo processo de agregação do que acreção.

Os sistemas com as maiores de valores de FT tiveram maior eficiência de acreção do

que do que os maiores FTA, principalmente entre -12°C e -5°C, porém as concentrações de hidrometeoros são maiores para FTA, pois os maiores valores de probabilidade de Z_{ef} por temperatura na caixa entre 0N-10N e 60W-70W, correspondem a valores maiores de Z_{ef} , como mostra as figuras 12a e 12c. Portanto o conteúdo de água líquida dos perfis que produzem as maiores taxas de raio por área de tempestade elétrica (FTA) é maior e esse fator pode intensificar a eletrificação das partículas de nuvem.

Uma interação mais efetiva entre flocos de neve (agregação) do que o processo de crescimento do *graupel* e granizo (acreção) sugere centros de carga na tempestade elétrica em altitudes mais elevadas. Considerando também que a acreção é mais eficiente no carregamento dos hidrometeoros, os sistemas ao Sul da AS, além de possuir centros de cargas em altitudes mais baixas, são mais intensos. Por isso observa-se maior número de descargas ao Sul do que ao Norte, pois os centros de cargas estão mais próximas do condutor.

3.3 SEVERIDADE REGIONALIZADA

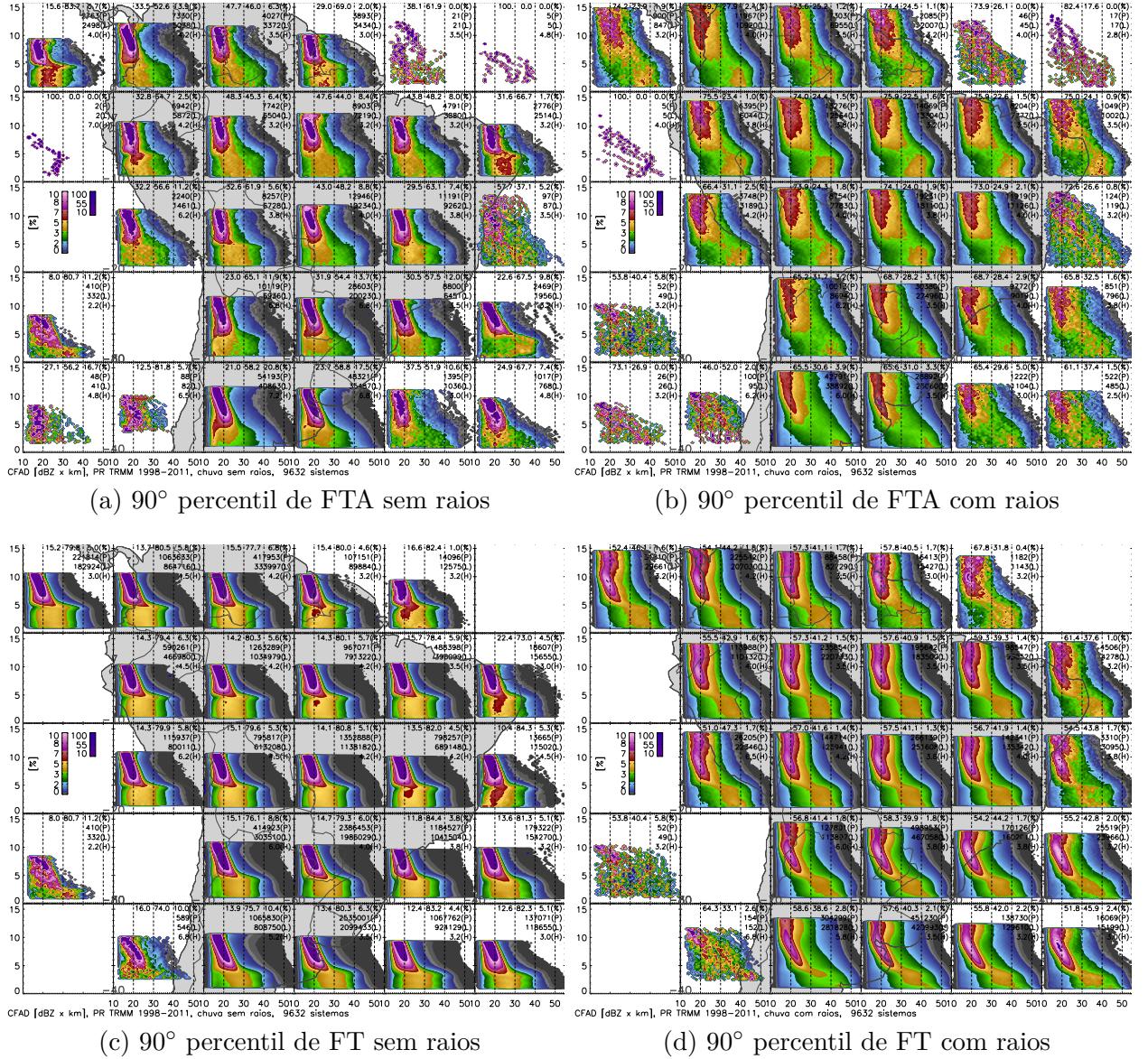


Figura 11: Diagramas de Contorno de Frequência por Altitude (CFADs) para tempestades elétricas ordenadas pelo 90° percentil dos índices FTA e FT, para a América do Sul em cada $10^\circ \times 10^\circ$. Os perfis de precipitação do PR-TRMM (1998-2011) foram separados em com e sem raios, conforme as observações dos *events* do LIS. Em cada caixa pode-se verificar a porcentagem (%) de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente, (P) o numero de perfis computados, (L) o número de ocorrência de refletividade no nível de máxima ocorrência e (H) o nível de máxima ocorrência.

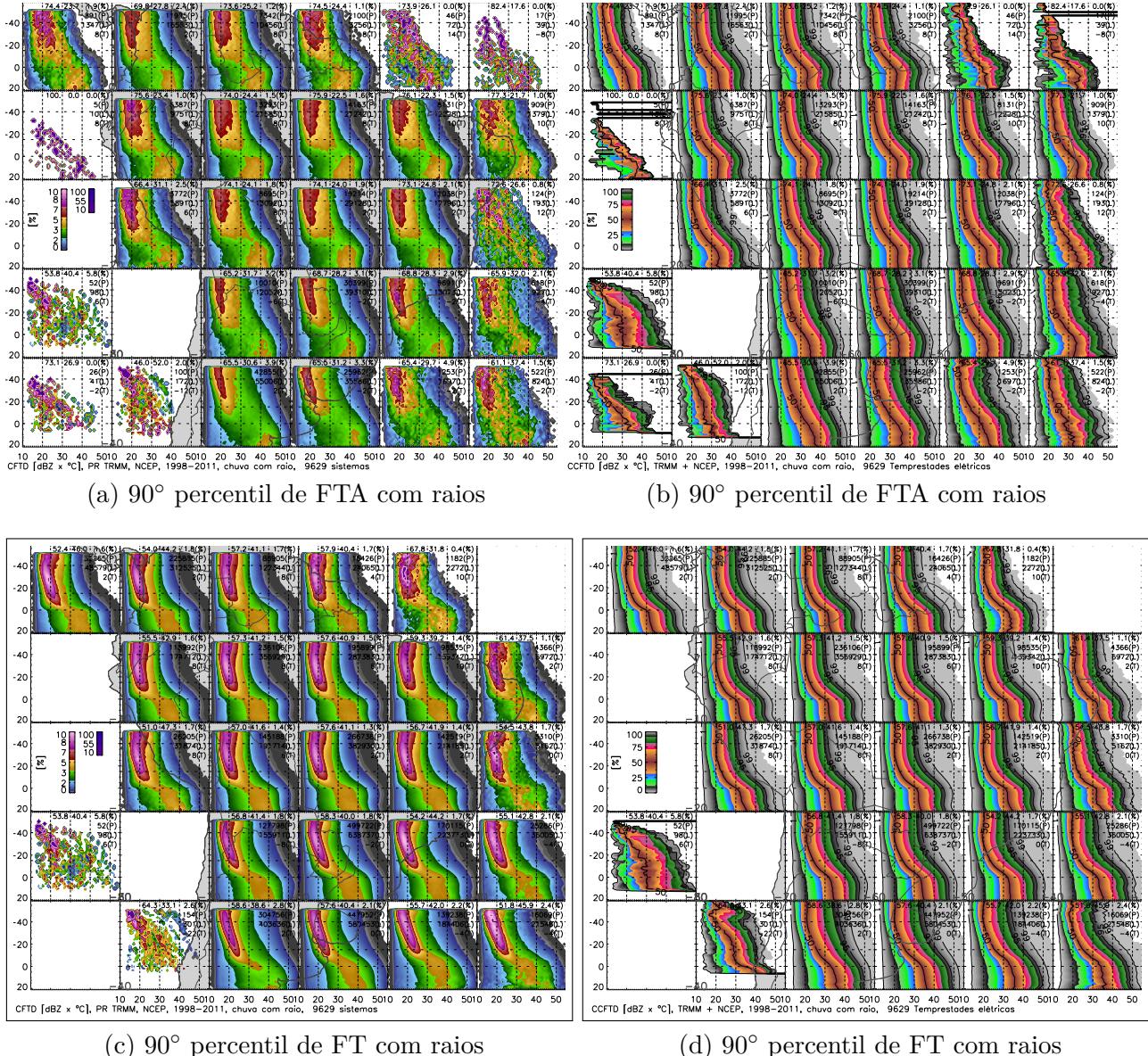


Figura 12: Diagramas de Contorno de Frequência por Temperatura (CFTD) e Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura (CCFTD) para tempestades elétricas ordenadas pelo 90° percentil dos índices FTA e FT. Os perfis de precipitação do PR-TRMM (1998-2011) foram separados em com e sem raios, conforme as observações dos *events* do LIS. Em cada caixa pode-se verificar a porcentagem (%) de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente, (P) o numero de perfis computados, (L) o número de ocorrência de refletividade no nível de máxima ocorrência e (T) o nível de temperatura de máxima ocorrência de Z_{ef} .

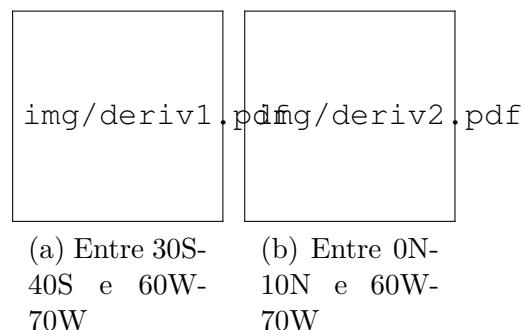


Figura 13: Derivadas das linhas de contornos da amostra de probabilidade cumulativa.

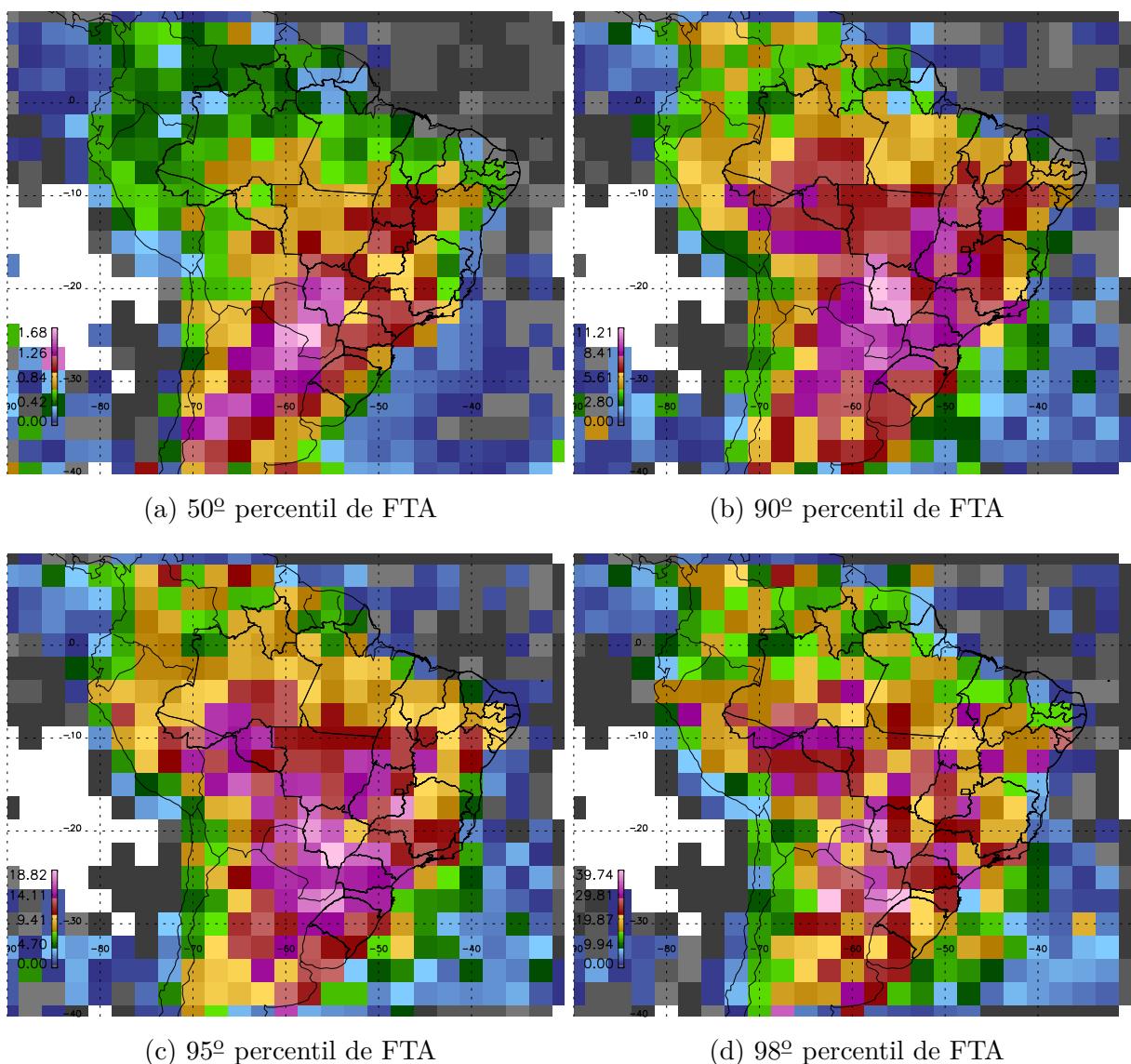


Figura 14: Distribuição espacial dos valores do 50º, 90º, 95º e 98º percentil do índice FTA a cada região de 2.5 por 2.5 graus.

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.
- 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.
- 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, n. 2, p. 263–280, 2003.
- Houze Jr., R. A.; WILTON, D. C.; SMULL, B. F. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM Precipitation Radar. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 133, n. August, p. 1389–1411, 2007. ISSN 1477870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.106>>.
- 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.
- LIU, C.; ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; NESBITT, S. W.; SHERWOOD, S. A cloud and precipitation feature database from nine years of trmm observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, v. 47, p. 2712–2728, 2008.
- 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.
- MORALES, C. A.; ANAGNOSTOU, E. N. Extending the capabilities of high-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. *J. Hydrometeor*, v. 4, p. 141–159, 2003.
- 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>. 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.; 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.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. D12, p. 14025–14040, 1998.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. Regional variability in tropical convection: Observations from trmm. *Journal of Climate*, v. 14, n. 17, p. 3566–3586, 2001.
- RASMUSSEN, K. L.; Houze Jr., R. A. Orogenic convection in subtropical south america as seen by the trmm satellite. *Monthly Weather Review*, v. 139, n. 8, p. 2399–2420, 2011. ISSN 00270644. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR-D-10-05006.1>>.

- 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.
- 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.
- VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9591, 1987. ISSN 0148-0227.
- WILLIAMS, E.; ROSENFIELD, 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.
- 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>>.