



MUSEU PARAENSE  
EMÍLIO GOELDI

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA  
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI  
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA**

**WANDA MARIA DO NASCIMENTO RIBEIRO**

**DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS, PRECIPITAÇÃO E CASOS DE TEMPESTADES  
SEVERAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM-PA  
2010**

**WANDA MARIA DO NASCIMENTO RIBEIRO**

**DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS, PRECIPITAÇÃO E CASOS DE TEMPESTADES  
SEVERAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Física do Clima  
Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza.

**BELÉM-PA**

**2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

R484d Ribeiro, Wanda Maria do Nascimento

Distribuição de raios, precipitação e casos de tempestades severas na Amazônia Oriental / Wanda Maria do Nascimento Ribeiro; Orientador: José Ricardo Santos de Souza – 2010  
125 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2010.

1. Raios. 2. Tempestades severas. 3. Amazônia Oriental. I. Universidade Federal do Pará II. Souza, José Ricardo Santos de *orient.* III. Título.

CDD 20º ed.: 551.563209811

---

**WANDA MARIA DO NASCIMENTO RIBEIRO**

**DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS, PRECIPITAÇÃO E CASOS DE TEMPESTADES  
SEVERAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

**Data de Aprovação:** : \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**Conceito:**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. José Ricardo Santos de Souza - Orientador  
Doutor em Astro-geofísica  
Universidade Federal do Pará - UFPA

---

Prof. Edson José Paulino da Rocha - Membro  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará - UFPA

---

Prof. Steel Silva Vasconcelos - Membro  
Doutor em Recursos e Conservação Florestais  
Universidade Federal do Pará- UFPA

---

Prof<sup>ª</sup>. Brigida Ramati Pereira Rocha - Membro  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará- UFPA

---

Prof. Arthur da Costa Almeida - Suplente  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará- UFPA

Dedico este trabalho ao meu pai (*in memoriam*), e minha mãe, que me ensinaram a lutar por meus ideais, ao meu esposo e filhos pelo apoio e compreensão a mim dedicados durante todo esse percurso.

*A vida só tem sentido quando existem barreiras a serem vencidas, por isso, ao encontrá-las em seu caminho, não desanime, derrube-as e comemore, pois cada barreira derrubada significa mais uma batalha vencida.*

*Wanda Ribeiro.*

*“Jesus eu te amo, lava-me com teu sangue e unge meu coração.”*

*Padre Eloy Wayth de Souza.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me ter presenteado com o dom da vida, sem o qual nada seria possível.

À minha mãe Osmarina, peça fundamental na minha vida.

Ao meu marido Robertson, e meus filhos Robertson Júnior, Wanderson e Robson que com seu amor e compreensão, fizeram com que as dificuldades se transformassem em pequenos obstáculos.

À toda a minha família pelo apoio, confiança e paciência a mim dispensados.

À Universidade Federal do Pará, MPEG e EMBRAPA através do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, pela acolhida e oportunidade da elaboração desta dissertação

À CELPA, Rede de Energia, pelo financiamento do Projeto Nuvens e Raios e a oportunidade de concessão da bolsa de ensino, e apoio financeiro concedido durante todas as etapas deste estudo.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia- INMET, na pessoa do Meteorologista José Raimundo Abreu de Sousa e Raimunda Almeida, pelo apoio e contribuição no desenvolvimento da minha dissertação.

Ao SIPAM pelos dados de raios da Rede de Detecção de Raios-RDR-SIPAM, utilizados nesse trabalho e por fornecerem infra-estrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais na pessoa do Sr. Victor Paca, pelos dados de precipitação da estação do 4º Distrito Naval, utilizados nesse trabalho.

Ao meu Orientador, Professor Dr. José Ricardo Santos de Souza, pelo apoio, paciência e orientação a mim dispensados em todos os momentos em que seus conhecimentos foram solicitados.

Ao Professor Dr. Arthur Almeida, pelo apoio, paciência e orientação a mim dispensados.

À Professora Dr<sup>a</sup>. Brígida Rocha pelo apoio e incentivo para realização deste programa de mestrado.

À todos os Professores do Curso de Meteorologia e do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA, pelo apoio e atenção em todos os momentos em que seus conhecimentos foram exigidos.

Aos meus colegas de pesquisa, Alan Souza, Humberto Monteiro, Helder Cunha, Neuma Santos, Luis Lessa, Gabriela Vieira e Prof<sup>a</sup>. Isa Silva que, em todos os trabalhos até então desenvolvidos, nunca mediram esforços para colaborar no proveito científico do grupo.

Aos amigos do SIPAM que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao Jorge Lopes, Marcio Nirlando, Marcos, Flavio Altieri, Carlos Simões, Pedro Rolim, Jaci Saraiva, Bernardino Simões e todos os demais que estiveram presente nesta caminhada.

Aos meus amigos especiais que durante todo esse percurso não mediram esforços em colaborar nas horas que foram solicitados, Venize Teixeira, Ana Paula Santos, Renata Leitão, Marcela Pompeu, Noele Brito, Alex Santos, Wilson Rocha e George Pires.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e que não foram citados.



## RESUMO

O objetivo deste é analisar a relação entre raios e precipitação, sobre diferentes tipos de superfície terrestre e através de estudos de caso de tempestades severas, durante o período de dezembro de 2006 à dezembro de 2008. Os estudos foram feitos dentro de uma área definida pelas coordenadas geográficas 0° a 6° S e 50° a 47° W, abrangendo partes dos estados do Pará, Maranhão e extremo norte de Tocantins. Essa região de estudo foi escolhida por estar localizada em uma área central em relação à localização dos sensores da rede de detecção de raios do Sistema de Proteção Amazônia (RDR-SIPAM) e que contém a maior parte das linhas de transmissão de energia elétrica da região. Os dados de chuva foram coletados por 46 pluviômetros digitais das estações meteorológicas do INMET e HIDROWEB- ANA. Nas análises dos dias de tempestades severas, também foram utilizados dados de pluviômetro de alta resolução temporal operado pela CPRM em Belém. Para classificação dos tipos de superfície e em particular da cobertura vegetal, foram utilizadas as informações de banco de dados sobre Recursos Naturais do IBGE. Para um melhor detalhamento sobre a relação entre raios, precipitação e tipos de superfície, a área de estudo foi dividida em três sub-áreas que possuem características fisiográficas distintas. A Área 1 inclui a Ilha do Marajó e a grande massa d'água da foz do Rio Amazonas e oceano Atlântico próximo. A Área 2 possui 60% de cobertura por floresta. A Área 3 tem 62% de cobertura por áreas agrícolas e/ou pastagens. Os sistemas meteorológicos de larga escala produtores de chuva e raios foram analisados tanto para as 3 áreas consideradas, como nos casos de tempestades severas em torno de Belém. Nessas tempestades foi observado, em quase todos os casos, que os raios antecedem as chuvas. Em geral ficou evidenciada a influência sazonal na densidade de ocorrência de raios sobre os diferentes tipos de superfície. Todavia, esse trabalho também mostrou que as condições meteorológicas determinam mais amplamente as magnitudes dessa variável. Isso pode ser observado com bastante clareza nos estudos de casos de tempestades severas, onde a ZCIT e as LIs são fatores determinantes da precipitação e conseqüentemente dos raios ocorridos em Belém.

Palavras-chave: Raios. Tempestades Severas. Amazônia Oriental.

## ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the relation between lightning and precipitation, over different land surfaces and through case studies of severe storms, during the period of December, 2006 to December 2008. The studies were carried out within an area limited by the geographic coordinates 0°S to 6°S and 47°W to 50°W, which includes parts of the States of Pará and Maranhão, as well as, the northern portion, of Tocantins State, in Brazil. This region was selected for study, due to its location within the core area of the sensor locations of the lightning detection network operated by the Amazonian Protection System (SIPAM-LDN), which covers most of the electric power transmission lines in eastern Amazonia. Rainfall data were collected by 46 digital pluviometers, belonging to meteorological stations of INMET and HIDROWEB-ANA. For the analysis of the days of severe storms, data from a high time resolution pluviometer, operated by CPRM in Belem, were also used. In order to classify the land surface types, in particular the vegetation cover, information from IBGE Natural Resources data library, were used. For more detailed analysis of the relations among lightning, precipitation and land surface types, the studied area was divided in three parts, with different physiographic characteristics. Area 1, including the Marajo Island and a large water surface at the mouth of the Amazon River and nearby Atlantic Ocean. Area 2, which has 60% of its surface covered by forests. Area 3, with 62% of its surface covered by agriculture and/or pasture areas. Large scale meteorological systems which produce lightning and rainfall were taken into account for the analyses over these 3 sub areas, as well as, for the severe storm case studies around Belem. In almost all storms studied, it was observed that the lightning onset of events preceded the intense rainfall. In general, the results showed some seasonally different behaviors of the lightning density of occurrences over these distinct land surface compositions. Nevertheless, this work also showed that, the meteorological conditions have larger influence on the values of this variable than the surface types . This was clearly demonstrated by the case studies of severe storms, when the ZCIT and LI's proved to be determinant on the precipitation and lightning occurrences observed around Belem.

Key words: Lightning. Severe Storms. Amazon

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | Climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) referente ao período de 1961 a 1990.....   | 25 |
| Figura 2  | Estágios de uma nuvem: (a) ao saturar-se, a massa de ar úmido que se elevou da superfície aquecida da Terra cria uma nuvem cúmulos, estágio inicial, (b) estágio maduro, (c) inicia-se o processo de dissipação devido ao decréscimo das correntes ascendente.....  | 28 |
| Figura 3  | Modelo de tripolo, os perfis verticais de E indicam uma terceira região de cargas. No detalhe a precipitação das cargas positivas no estágio de dissipação.....   | 29 |
| Figura 4  | Estrutura de nuvem de tempestades, identificando os tipos de raios : a) nuvem-solo,(b) solo-nuvem, (c) intranuvem, (d) da nuvem para um ponto qualquer da atmosfera - denominados então descargas no ar, (e) entre nuvens (f) da nuvem para a Ionosfera.....  | 32 |
| Figura 5  | Localização geográfica dos 12 sensores da Rede de Detecção de Descargas Atmosféricas - RDR-SIPAM e área de estudo.....  | 41 |
| Figura 6  | (a) Esquema de uma rede de detecção de raios. (b) - Subsistemas do receptor LPATS.....  | 42 |
| Figura 7  | Mapa do Brasil, identificando a área de estudo com detalhamento das três subáreas. Os círculos vermelhos representam as localizações dos sensores da RDR-SIPAM.....   | 48 |
| Figura 8  | Reclassificação dos dados interpolados da cobertura vegetal, para redução do número de classes da Área 1, 2 e 3 ,ficando apenas as classes: Agricultura e Pastagens, Áreas Urbanizadas, Corpos D'água, Florestas e Várzeas, Igapós e Mangues. Ao lado direito encontra-se o histograma com percentuais de ocupação dos tipos de superfície encontrados em cada subárea..... | 55 |
| Figura 9  | Média mensal da precipitação pluviométricas, nas áreas 1,2 e 3. Período de dez/2006 a dez/2008.....   | 56 |
| Figura 10 | Total dos raios nuvem-nuvem e nuvem-solo, detectados nas Áreas de estudo 1,2 e 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008.....   | 57 |
| Figura 11 | Modelo de Distribuição Geográfica - Caso ideal com uma probabilidade máxima de detecção aproximadamente 57% , localizada entre as latitude 3° S a 5,5° S e longitude 47° a 48,5°W....   | 58 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 12 | Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo detectados nas áreas de estudo 1, 2 e 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008...   | 59 |
| Figura 13 | Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a média mensal de precipitação na Área 1, durante o período de dez/2006 a dez/2008.....  | 60 |
| Figura 14 | Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a média mensal de precipitação na Área 2, durante o período de dez/2006 a dez/2008.....  | 61 |
| Figura 15 | Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a média mensal de precipitação na Área 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008.....  | 62 |
| Figura 16 | Distribuições mensais das medias de raios e a de chuva no período chuvoso (a) e seco (b), nas Áreas 1,2 e 3.....   | 63 |
| Figura 17 | Distribuição espacial da média trimestral de DJF, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2006, 2007 e 2008, nas Áreas 1-2-3.  | 66 |
| Figura 18 | Distribuição espacial da média trimestral de MAM, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.....  | 68 |
| Figura 19 | Distribuição espacial da média trimestral de JJA, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.....  | 70 |
| Figura 20 | Distribuição espacial da média trimestral de SON, dos raios e da precipitação, o durante os anos de, 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.....   | 72 |
| Figura 21 | Área de estudo, marcada pelo círculo rosa que tem um raio de 30 km, centrado no pluviômetro do 4° Distrito Naval (4° DN).em Belém.....   | 79 |
| Figura 22 | Circulação e Divergência do vento em baixos níveis ( 925 hPa) e alto níveis (200 hPa) no dia 11/12/2006 às 18 horas UTC ou 15 horas local  | 84 |
| Figura 23 | Ventos em 850 hPa (m s <sup>-1</sup> ) e precipitação durante o dia 11/12/2006, na qual está evidente o alto índice pluviométrico sobre Belém durante este dia.....  | 85 |
| Figura 24 | Ventos em 200 hPa (m s <sup>-1</sup> ) e Radiação de Ondas Longas ROL (W m <sup>-2</sup> ) durante o dia 11 de dezembro de 2006, na qual está evidente a influência da ZCIT e da ZCAS, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB)..... | 85 |
| Figura 25 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 11/12/2006.....   | 86 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 26 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 11/12/2006. Os dados de chuva utilizados nesta análise são do INMET.....   | 87 |
| Figura 27 | Imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho (realçada) do dia 09/01/2007 às 18:00Z ,mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível observar nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a -80°C..... | 88 |
| Figura 28 | Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 09/01/2007, na qual está evidente a influência da ZCAS e Vórtice Ciclônico definido no Sul de Goiás.....   | 89 |
| Figura 29 | Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas OL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 09 de janeiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, VCAN no NEB, ZCAS,além da circulação anti ciclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).....                      | 90 |
| Figura 30 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 09/01/2007.....   | 91 |
| Figura 31 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 09/01/2007. Os dados de chuva utilizados neste dia são do 4° DN.....   | 92 |
| Figura 32 | Imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho, do dia 14/02/2007 às 17:30Z mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível ser observadas nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a -80 °C.....     | 93 |
| Figura 33 | Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 14 de fevereiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT.....   | 94 |
| Figura 34 | Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas ROL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 14 de fevereiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).....                                      | 95 |
| Figura 35 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 14 de fevereiro de 2007.....  | 96 |
| Figura 36 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 14 de fevereiro de 2007. Os dados de chuva utilizados nesse dia são do 4° DN.....  | 97 |
| Figura 37 | Imagem de satélite GOES 10 IR (realçada) do dia 02/03/2007 às 17:45Z mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível observar  | 98 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
|           | nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....  |     |
| Figura 38 | Ventos em 850 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 02 de março de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT e VCAN.....  | 99  |
| Figura 39 | Ventos em 200 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o dia 02 de março de 2007, está evidente a influência da ZCIT, VCAN, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).....                                     | 100 |
| Figura 40 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 02 de março de 2007.....   | 101 |
| Figura 41 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 02 de março de 2007. Os dados de chuva utilizados neste dia são do INMET.....   | 102 |
| Figura 42 | Imagem do satélite GOES - 12 no canal infravermelho (realçada), a mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível ser observadas nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ..... | 103 |
| Figura 43 | Ventos em 850 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 02 de abril de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT.....   | 104 |
| Figura 44 | Ventos em 200 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o dia 04 de abril de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, VCAN, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).....                             | 105 |
| Figura 45 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 04 de abril de 2007.....   | 106 |
| Figura 46 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 04 de abril de 2007. Os dados de chuva utilizados nesse dia são do INMET.....   | 107 |
| Figura 47 | Imagem do satélite GOES - 12 no canal infravermelho (realçada), pode-se observar a presença da ZCIT, bem definida e um cavada em altos níveis na Região Sul do País.....  | 108 |
| Figura 48 | Ventos em 850 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 05 de julho de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT.....   | 109 |
| Figura 49 | Ventos em 200 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas-ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o dia 05 de julho de 2007, na qual está evidente a influência ,de um cavado atingindo o sul do Pará.....   | 110 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Figura 50 | Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 05 de julho de 2007.....                   | 111 |
| Figura 51 | Relação entre raios e chuva em Belém no dia 05 de julho de 2007. Os dados de chuva utilizados neste dia são do INMET..... | 112 |

## LISTA DE TABELAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Localização geográfica dos sensores VAISALA-LPATS IV da RDR-SIPAM.....   | 50 |
| Tabela 2 | Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva, na Área1.....                               | 52 |
| Tabela 3 | Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva na Área 2.....                               | 52 |
| Tabela 4 | Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva na Área 3.....                               | 53 |
| Tabela 5 | Distribuição sazonal da média trimestral dos números de raios nuvem-solo e da chuva (mm) nas Áreas 1,2 e 3 , durante o período de dez/2006 a dez/2000..... | 64 |
| Tabela 6 | Dados de raios e chuva ocorridos em 13 eventos com tempestades severas em Belém-PA.....  | 82 |
| Tabela 7 | Intensidade de corrente de pico nos dias de tempestades severas em Belém. ....   | 83 |



## LISTA DE ABREVIATURAS

|         |   |  |
|---------|---|--|
| AB      | - | Alta da Bolívia  |
| ANA     | - | Agência Nacional de Águas                                  |
| APA     | - | Analisador de Posição Avançado                             |
| ATD     | - | Arrival Time Difference                                    |
| CB's    | - | Cumulonimbus   |
| CEMIG   | - | Companhia Energética de Minas Gerais                       |
| CMAP    | - | Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation |
| CPC     | - | Climate Prediction Center                                  |
| CPRM    | - | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais                 |
| CPTEC   | - | Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos           |
| DEA     | - | Descargas Elétricas Atmosféricas                           |
| DJF     | - | Dezembro-Janeiro-Fevereiro                                 |
| ECHAM   | - | European Centre Hamburg Model                              |
| ED      | - | Eficiência de Detecção                                     |
| ELN     | - | Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil)        |
| EMBRAPA | - | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                |
| EMS     | - | Estação Meteorológica de Superfície                        |
| ENOS    | - | El Niño - Oscilação Sul                                    |
| FURNAS  | - | Furnas Centrais Elétricas S.A                              |
| GPCP    | - | Global Precipitation Climatology Project                   |
| GPS     | - | Global Positioning System                                  |
| HN      | - | Hemisfério Norte   |

|        |   |
|--------|---|
| HS     | - Hemisfério Sul  |
| IBGE   | - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística         |
| ICTP   | - International Centre for Theoretical Physics            |
| IMPACT | - Improved Accuracy from Combined Technology              |
| IN     | - Relâmpago Intra-Nuvem                                   |
| INMET  | - Instituto Nacional de Meteorologia                      |
| INPE   | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais               |
| IR     | - Canal Infravermelho                                     |
| JJA    | - Junho, Julho e Agosto                                   |
| L      | - Leste   |
| LBA    | - Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia |
| LF     | - Low Frequency   |
| LI's   | - Linhas de Instabilidade                                 |
| LIA    | - Linhas de Instabilidade da Amazônia                     |
| LLS    | - Lightning Location System                               |
| LPATS  | - Lightning Positioning and Tracking System               |
| MAM    | - Março, Abril e Maio                                     |
| MCG    | - Modelos de Circulação Geral                             |
| MDF    | - Magnetic Direction Finder                               |
| MIT    | - Massachusetts Institute of Technology                   |
| N      | - Norte   |
| NC     | - Nível de Condensação                                    |
| NCAR   | - National Center for Atmospheric Research                |
| NCDC   | - National Climate Data Center                            |

|         |  |
|---------|--|
| NCEP    | - National Center for Environmental Prediction                       |
| NCL     | - Nível de Condensação por Levantamento                              |
| NE      | - Nordeste   |
| NEB     | - Nordeste Brasileiro  |
| NLDN    | - National Lightning Detection Network                               |
| NN      | - Relâmpago nuvem-nuvem  |
| NS      | - Relâmpago Nuvem-Solo   |
| RF      | - Rádio frequência   |
| ROL     | - Radiação de Ondas Longas   |
| RINDAT  | - Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas      |
| SAFIR   | - Sureveillance et Alerte Fourde par Interférometrie Radioélectrique |
| SE      | - Sudeste  |
| SF      | - Sistema Frontal  |
| SIMEPAR | - Sistema Meteorológico do Paraná                                    |
| SN      | - Relâmpago solo-nuvem   |
| SON     | - Setembro-Outubro-Novembro  |
| TOA     | - Time of Arrival (Tempo de Chegada)                                 |
| VCAN    | - Vórtice Ciclônico em Altos Níveis                                  |
| VLF     | - Very Low Frequency   |
| WWLLN   | - World Wide Lightning Network Location                              |
| ZCAS    | - Zona de Convergência do Atlantico Sul                              |
| ZCIT    | - Zona de Convergência Intertropical                                 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>CAPITULO 1</b> .....   | 21 |
| <b>1.1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 21 |
| <b>CAPITULO 2</b> .....   | 24 |
| <b>2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | 24 |
| <b>2.1.1 Precipitação Pluviométrica</b> .....                                   | 24 |
| <b>2. 1.2. Nuvens de Tempestades</b> .....                                      | 26 |
| 2.1.2.1. Fases de formação de uma nuvem de tempestade .....                     | 27 |
| 2.1.2.2.Estrutura elétrica das nuvens de tempestades.....                       | 28 |
| 2.1.2.3 As teorias de eletrização das nuvens .....                              | 30 |
| 2.1.2.4 Tipos de raios .....  | 31 |
| <b>2.1.3. Rede de Detecção de Raios</b> .....                                   | 36 |
| 2.1.3.1.RINDAT-Rede Integrada Nacional do Sistema de Proteção da Amazônia ..... | 37 |
| 2.1.3.2.STARNET-Sférics Tracking and Ranging NETwork.....                       | 38 |
| 2.1.3.3.Detecção de raios na Amazônia .....                                     | 39 |
| 2.1.3.4.Redes de detecção de raios- RDR-SIPAM .....                             | 39 |
| <b>2.1.4. Cobertura Vegetal</b> .....   | 42 |
| <b>CAPITULO 3</b> .....   | 44 |
| <b>3.1 RELAÇÕES ENTRE RAIOS, PRECIPITAÇÃO E TIPOS DE SUPERFÍCIE</b> .....       | 44 |
| <b>3.1.1. Introdução</b> .....  | 44 |
| <b>3.1.2. Materiais e Métodos</b> .....   | 46 |
| 3.1.2.1. Localização da área de estudo .....                                    | 46 |
| 3.1.2.2. Observações de raios .....   | 48 |
| 3.1.2.3. Dados de precipitação .....  | 51 |
| 3.1.2.4. Tipos de superfície .....  | 53 |
| <b>3.1.3. Resultados e Discussões</b> .....                                     | 56 |
| 3.1.3.1.Média mensal da precipitação .....                                      | 56 |
| 3.1.3.2.Número total de raios detectados nas áreas 1,2 e 3 .....                | 56 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.1.3.3. Relação entre raios e chuvas .....                          | 59         |
| 3.1.3.4. Distribuição trimestral entre raios e chuvas. ....          | 78         |
| <b>CAPITULO 4</b> .....  | <b>73</b>  |
| 4.1. TEMPESTADES SEVERAS – ESTUDO DE CASO .....                      | 73         |
| <b>4.1.1. Introdução</b> .....                                       | <b>73</b>  |
| <b>4.1.2. Materiais e Métodos</b> .....                              | <b>78</b>  |
| 4.1.2.1. Localização da área de estudo .....                         | 78         |
| 4.1.2.2. Seleção das Tempestades .....                               | 80         |
| 4.1.2.3. Análise Meteorológica. ....                                 | 81         |
| <b>4.1.3. Resultados e Discussão</b> .....                           | <b>81</b>  |
| 4.1.3.1. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 11/12/2006 ..... | 83         |
| 4.1.3.2. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 09/01/2007 ..... | 88         |
| 4.1.3.3. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 14/02/2007 ..... | 92         |
| 4.1.3.4. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 02/03/2007 ..... | 97         |
| 4.1.3.5. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 04/04/2007 ..... | 102        |
| 4.1.3.6. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 05/07/2007 ..... | 107        |
| <b>5 CONCLUSÕES</b> .....  | <b>113</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>117</b> |

## CAPITULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

Devido as suas dimensões continentais, o Brasil possui uma ampla diversificação climática, influenciada pela sua configuração geográfica, sua significativa extensão costeira, seu relevo e a dinâmica das massas de ar sobre seu território que determinam as temperaturas e os índices pluviométricos nas diferentes regiões do país. No entanto, a região Norte do Brasil possui uma relativa homogeneidade espacial e sazonal da temperatura, o que não acontece em relação à pluviosidade. Esta é a região brasileira com maior índice pluviométrico anual, sendo mais notável no litoral do Amapá, na foz do rio Amazonas e no setor ocidental da Região, onde a precipitação anual excede 3000 mm (NIMER, 1979).

O conhecimento da precipitação é de fundamental importância para o desenvolvimento de várias áreas, tais como: hidrologia, agricultura, energia hidrelétrica, e pesquisas de mudanças climáticas, onde as medidas em pontos na superfície, não são suficientes para cobrir extensas áreas do globo terrestre, em especial nas regiões dos trópicos. Para suprir essa necessidade, diversas técnicas de estimativas de precipitações via satélite são empregadas para se obter a distribuição espacial-temporal da chuva sobre grandes áreas.

No final da década de 1960, satélites meteorológicos foram lançados, permitindo o monitoramento da nebulosidade sobre extensas áreas do globo terrestre. Atualmente, o número de radares meteorológicos e pluviômetros distribuídos sobre o globo terrestre não é suficiente para se determinar a distribuição da precipitação global de forma contínua. Diversos trabalhos mostram que dentro do território amazônico existem diferenças significativas na distribuição espaço-temporal da precipitação (MARENGO et al, 2005; MOLION, 1987; NIMER, 1979).

O Brasil é um dos países de maior ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas (DEA) do planeta, devido à sua grande extensão territorial e pelo fato de estar localizado numa região predominantemente tropical. Com a ampliação das redes de detecção de DEA cobrindo áreas cada vez maiores no mundo e o aperfeiçoamento das antenas de detecção, foi possível aumentar o volume de dados e o conhecimento sobre os raios.

Diversos trabalhos tem sido realizados mostrando a influencia das características geográficas sobre os raios, Orville (1991,1994); Orville e Silver (1997). Gomes (2002) mostrou a influência das características geográficas na distribuição dos relâmpagos nuvem-solo afetando principalmente a sua quantidade e a sua intensidade.

A altitude do relevo é uma característica geográfica que também exerce influência sobre a quantidade e a intensidade dos relâmpagos simultaneamente com as condições meteorológicas e climáticas. À medida que a altitude aumenta, cresce a densidade diária de relâmpagos e a ocorrência máxima de eventos passa a acontecer mais cedo em função da hora local, Reap (1986). Pinto et al. (1999a) fizeram o primeiro estudo de relâmpagos considerando dados detectados ao longo de um ano contínuo no Brasil, investigando a dependência da densidade de relâmpagos e picos de corrente com a latitude, altitude e resistividade do solo. Pinto et al. (1999a) constataram o comportamento inverso dos picos de corrente com a latitude, uma tendência de maior densidade de relâmpagos em altitudes mais elevadas e nenhuma conclusão sobre a influência da resistividade do solo.

A relação entre os parâmetros de raios, precipitação e os sistemas meteorológicos convectivos tem sido estudada por vários métodos. Roohr (1994) e Carey (2005), utilizaram imagens de satélites para fazer essa relação. Gungle (2005) e Soriano (2001), usando radar, balões-sonda de ar e sistema de detecção e localização de raios na superfície, associaram os parâmetros de raios e precipitação em Taiwan, E.U.A e Espanha, respectivamente.

Do ponto de vista das ciências atmosféricas, inúmeros estudos têm sido conduzidos ao longo das últimas décadas com o objetivo de melhorar o entendimento dos mecanismos associados à interação entre a biosfera e a atmosfera e o clima da Amazônia. Dentre estes se destacam o Projeto ABRACOS - “Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observational Study” (GASH; NOBRE, 1997) e o Programa LBA - “Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia” (AVISSAR; NOBRE, 2002; SILVA DIAS et al, 2002). A instalação de torres micrometeorológicas, proporcionadas por estes programas de pesquisa, em vários sítios experimentais distribuídos pela Amazônia (e.g. em Caxiuanã, no Pará; na REBIO Jarú, em Rondônia; em Santarém, no Pará; em Manaus, no Amazonas), permitiu que inúmeros estudos relacionados à micrometeorologia e à meteorologia de mesoescala fossem realizados de modo contínuo para compreender diversos aspectos meteorológicos e climáticos até então pouco entendidos. Na região Amazônica, especialmente em torno de

Belém, as primeiras tentativas de estimar chuva, a partir da frequência de ocorrência de descargas foram feitos por Rocha et al (1997a, b).

A maioria destes estudos tenta minimizar os danos causados pela incidência de tal evento através do estudo da distribuição temporal e espacial das descargas elétricas atmosféricas. Assim, pode-se identificar a época e os locais mais atingidos. Além disto, a evolução espaço temporal das descargas atmosféricas, associadas aos sistemas meteorológicos, podem ser utilizadas para auxiliar e otimizar os sistemas de monitoramento do tempo e a melhorar a proteção de seres vivos, sistemas elétricos, telecomunicações e outros interesses econômicos.

Desta forma busca-se, nesta pesquisa, analisar a relação entre a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas associadas à precipitação pluviométrica que ocorreram no leste da Amazônia, bem como analisar a influencia da cobertura vegetal e a ocorrência de tempestades severas dentro da área em estudo.

Como os dois assuntos a serem estudados nesta dissertação são independentes entre si, a estrutura deste trabalho será dividida em capítulos, onde cada capítulo apresentará sua introdução, metodologia e resultados.



## **CAPITULO 2**

### **2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1.1 Precipitação Pluviométrica**

A Amazônia caracteriza-se por possuir um alto conteúdo de vapor d'água na atmosfera, fortes fluxos de calor latente provenientes da superfície e elevado índice pluviométrico. A precipitação e a cobertura de nuvens são os elementos climáticos com maior variabilidade espacial e temporal na região tropical (FISCH et al, 1998). Sabendo-se que as nuvens exercem um papel significativo sobre as trocas de energia entre as várias escalas de tempo dos fenômenos atmosféricos, surge o interesse de conhecer com maiores detalhes a periodicidade dos sistemas atmosféricos que atuam na região Amazônica e as interações entre as escalas dos mesmos.

As chuvas convectivas são características das regiões tropicais, uma vez que os ventos são fracos, a movimentação do ar ocorre basicamente na vertical (TUCCI, 1997), produzindo processos de convecção, nuvens e chuvas. Este processo é tipicamente local (escala de variação inferior a 10 km) e de curta duração (tempo menor que 1 hora). Outra característica importante associada a este processo é a questão da intermitência da ocorrência de chuvas. É na Amazônia que ocorrem as principais atividades convectivas no planeta e que pode ter uma influência grande no clima de outras localidades, devido ao transporte horizontal de energia e vapor d'água. Molion (1993) apresentou as diversas características da variabilidade climática na Amazônia e o impacto na chuva. Numa classificação resumida, os principais sistemas de tempo que afetam as diferentes regiões da Amazônia e tem um impacto na chuva são: Zona de Convergência intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade da Amazônia (LIA), frentes frias associadas ao fenômeno das friagens, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o jato de baixos níveis (JBn) que ocorre paralelo e próximo aos Andes, ondas de leste, a Alta da Bolívia e cavados de altos níveis que se propagam de leste para oeste destes. A ZCIT faz parte da célula Hadley com ar ascendente nas proximidades do Equador e descendente nas latitudes subtropicais. No atlântico Tropical a ZCIT estende-se da África ao norte da América do Sul.

Segundo Rao e Hada (1990), no Pará a deficiência hídrica ocorre basicamente no inverno e primavera, do hemisfério Sul, estando as maiores deficiências concentradas nos meses de agosto a novembro, período este, que corresponde a época menos chuvosa na região. A estação chuvosa da Região Norte (dezembro-janeiro-fevereiro) muda progressivamente de janeiro-fevereiro-março, no sul da Amazônia, para abril-maio-junho, no noroeste da bacia Amazônica. Esta variação parece estar relacionada com a posição da ZCIT, pois os núcleos de precipitações migram da parte central do país, no verão austral, para o setor noroeste da América do Sul no inverno austral, acompanhando a migração anual da convecção profunda.

Na Região Norte são encontrados três centros de precipitação abundante indicado na Figura 1. O primeiro centro localizado no noroeste da Amazônia, com chuvas acima de 3000 mm/ano. A existência deste centro é associada à condensação do ar úmido trazido pelos ventos de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que são elevados quando o escoamento sobe os Andes (NOBRE, 1983). O segundo centro, é localizado na parte central da Amazônia, em torno de 5° S, com precipitação de 2500 mm/ano, e o terceiro, na parte leste da base Amazônica, próximo à Belém, com precipitação de 2800 mm/ano.

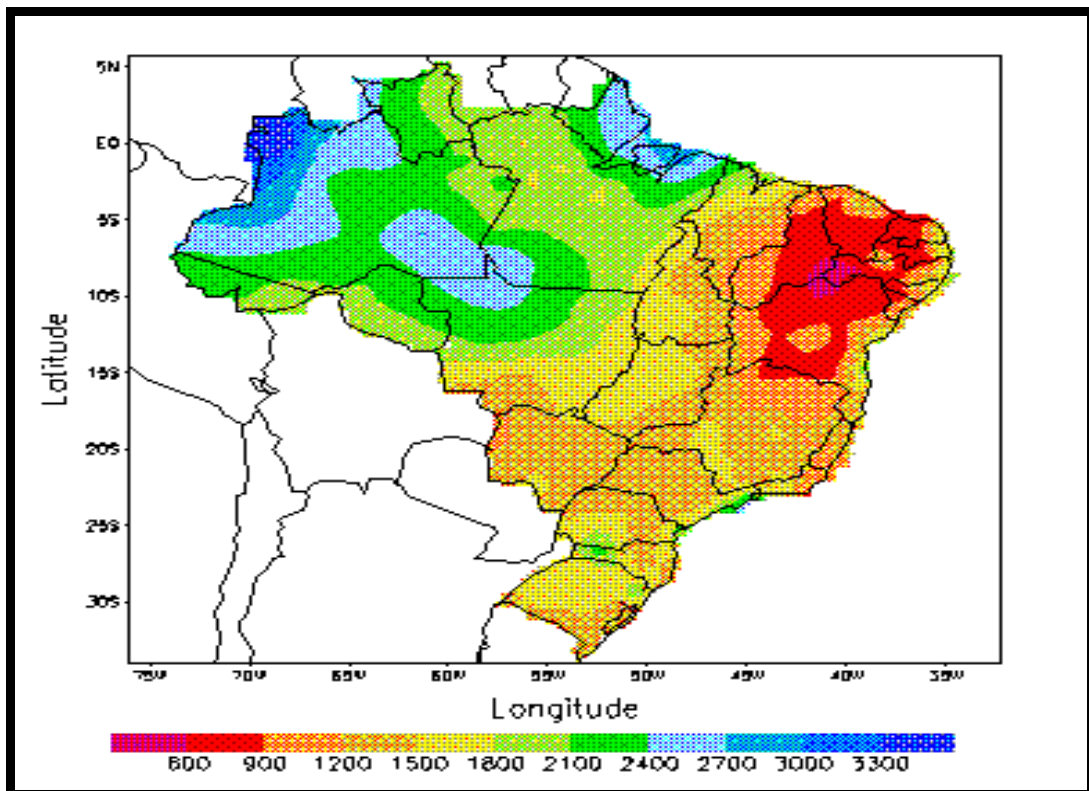


Figura 1 Climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) referente ao período de 1961 a 1990.  
Fonte: INMET

O centro localizado na parte leste da bacia Amazônica, próximo à Belém, deve-se possivelmente às linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa, durante o fim de tarde, forçadas pela circulação de brisa marítima (KOUSKY, 1979, 1980).

As linhas de tempestade, as linhas de instabilidade e os complexos convectivos de mesoescala são tipos particulares de sistemas convectivos de mesoescala. Linhas de tempestade são tempestades individuais próximas umas das outras, porém sem interação entre si. Já as linhas de instabilidade são sistemas de tempestades dispostos ao longo de uma linha, conectados pela região estratiforme, com interação entre si, estendendo-se por várias centenas de quilômetros. Geralmente, formam-se junto à interface entre uma massa de ar úmido e quente e uma massa de ar fria (PINTO JR.e PINTO, 2000).

## **2. 1.2. Nuvens de Tempestades**

As nuvens de tempestades, cumulonimbos ou CB's, são as responsáveis pelas alterações mais significativas do campo elétrico de tempo bom, e pela produção de raios. Devido aos gradientes térmicos no interior dessas nuvens, os processos de transporte são muito intensos e suas estruturas termodinâmicas são bastante complexas.

As nuvens cumulonimbos, são nuvens em forma de torre que em geral se expandem lateralmente no topo, assumindo a configuração de uma “bigorna”. A base de uma cumulonimbos pode situar-se entre 300 e 3.000m de altura, dependendo da umidade relativa do ar próximo ao solo. Esta nuvem apresenta uma considerável extensão vertical, cujo topo usualmente atinge alturas entre 9 a 18 km com um diâmetro de aproximadamente de 10 a 20 km e podem movimentar-se com velocidades de aproximadamente de 40 a 50 km/h e seu tempo de duração é em média de 30 a 90 minutos. Elas apresentam-se como tempestades isoladas ou tempestades locais, ou em grupos, formando tempestades organizadas, conhecidas como sistemas convectivos de mesoescala, em geral, mais severas com chuvas e ventos mais intensos, além de eventualmente produzirem granizo (PINTO JR.; PINTO, 2000).

As nuvens com topos mais altos localizam-se nos trópicos ou, também, nas latitudes médias durante o verão. Durante o processo de desenvolvimento, as velocidades verticais dentro da nuvem podem atingir valores de aproximadamente 100 km/h. O grande

desenvolvimento das cumulonimbos, e conseqüentemente das tempestades locais, encontra-se associado à presença de ar quente, úmido e instável. Estas nuvens apresentam características como: descargas elétricas atmosféricas, trovões, ventos fortes, súbitas variações de temperatura e ocasionalmente, podem transformar-se em tornados (VIANELLO; ALVES, 1991). Por outro lado, a extensão vertical e horizontal das nuvens de tempestade varia em função da região do planeta e das estações do ano. Mais especificamente, os fatores que regulam suas dimensões e suas características físicas, elétricas e morfológicas são a latitude, a topografia da superfície, o perfil de temperatura atmosférico e a circulação dos ventos (PINTO JR.; PINTO, 2000. RAKOV; UMAN, 2003).

#### 2.1.2.1. Fases de Formação de uma Nuvem de Tempestade

Na Figura 2 são apresentadas as três fases da evolução de uma nuvem *Cumulonimbos* isolada, identificadas por Byers e Braham (1949), também chamada de tempestade individual. As fases da evolução são: **Formação, Maturação e Dissipação**.

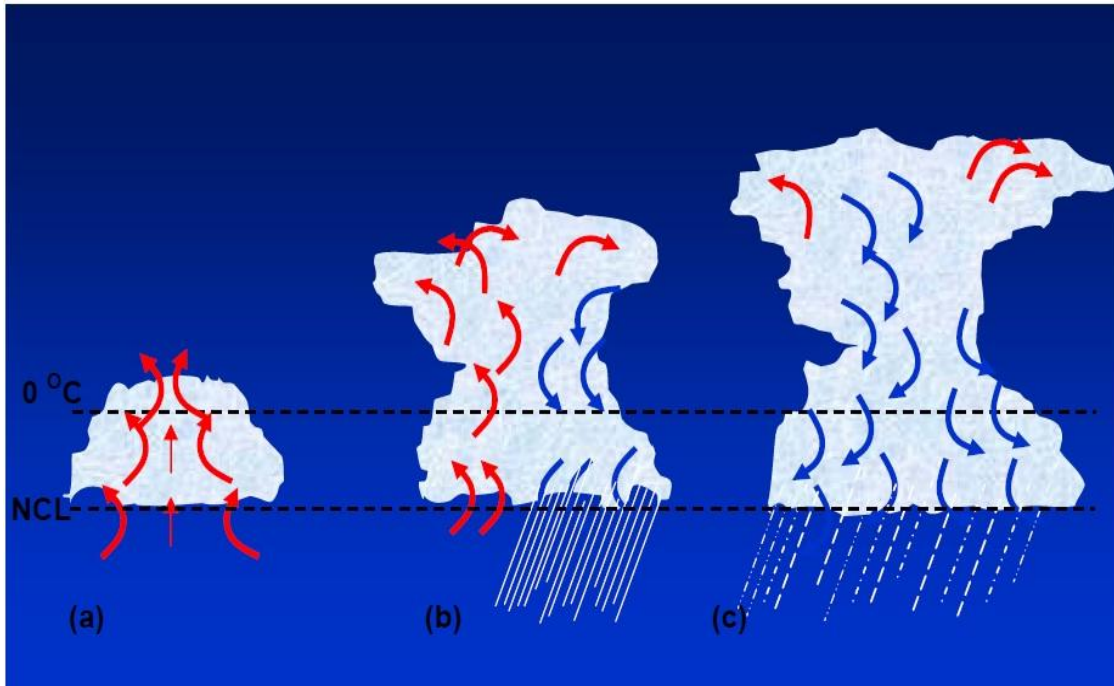
Na **fase de formação**, conhecida também por estágio *Cumulus*, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes, arrastando assim partículas de gelo e gotas de água para cima. Nesta fase, o diâmetro pode chegar a 10 km, estando sua base situada a uma altura de 1,5 km e seu topo a 8 km, aproximadamente.

Na **fase de maturação** coexistem movimentos ascendentes e descendentes. As partículas de gelo e as gotas de água que, no primeiro estágio, são arrastadas para cima, tornam-se maiores e mais numerosas, iniciando-se a chuva a partir da base da nuvem. O movimento descendente que, no início desta fase, era apenas a partir da base, passa a se intensificar horizontalmente e verticalmente.

A temperatura dentro da nuvem irá depender da região. Para uma dada altura, as regiões onde o movimento do ar é ascendente, a temperatura no interior será maior que no exterior e, para regiões de movimentos descendentes, a temperatura no interior é menor que a temperatura no exterior da célula de tempestade. A duração desta fase é de aproximadamente 30 minutos e sua extensão vertical pode ser de 10 a 18 km.

A **fase de dissipação** constitui o último estágio, o qual é caracterizado por movimentos predominantemente descendentes. Nesta fase, a temperatura do interior da

nuvem é menor que a do seu exterior no mesmo nível. A nuvem irá se dissipar até que as temperaturas do interior e do exterior sejam iguais. Esta fase tem duração de aproximadamente alguns minutos.

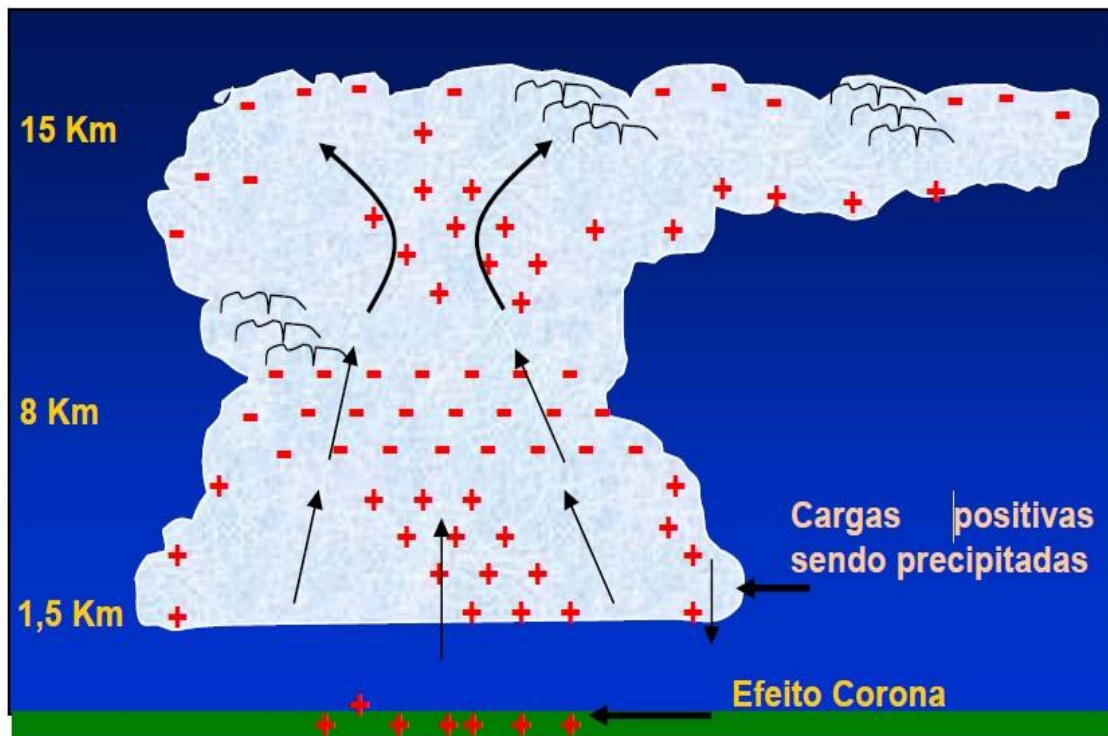


**Figura 2 Estágios de uma nuvem: (a) ao saturar-se, a massa de ar úmido que se elevou da superfície aquecida da Terra cria uma nuvem cúmulos, estágio inicial, (b) estágio maduro, (c) inicia-se o processo de dissipação devido ao decréscimo das correntes ascendente. Fonte adaptada de Heilmann (2006).**

#### 2.1.2.2. Estrutura Elétrica das Nuvens de Tempestades

As nuvens de tempestades isoladas possuem uma estrutura elétrica devido ao acúmulo de partículas carregadas, produzidas por processos microfísicos e macrofísicos. No início do século XX foi proposto o primeiro modelo de estrutura elétrica das nuvens de tempestade isoladas, representado por dois centros principais de cargas, sendo um centro positivo de cargas ocupando a metade superior do volume da nuvem, e outro negativo de cargas ocupando a metade inferior do volume a nuvem, ilustrado na Figura 3. O centro positivo principal de cargas depende do desenvolvimento vertical da nuvem e situa-se geralmente a 1 km abaixo de seu topo (MAGONO, 1980). Esses centros principais de cargas geralmente apresentam a mesma magnitude, que varia desde uma dezena a algumas centenas de Coulombs (PINTO JR.; PINTO, 2000).

Observações do campo elétrico no interior de nuvens sugerem um modelo de dipolo ou tripolo eletrostático conforme mostra a Figura 3. (WILLIAMS, 1998). O modelo de dipolo eletrostático possui um volume de concentração de cargas negativas aproximadamente entre os níveis de temperatura de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e um volume de cargas positivas em temperaturas inferiores a  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  enquanto o modelo de tripolo eletrostático admite uma segunda concentração de cargas positivas, porém de magnitude menor que a anterior, entre os níveis de temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3** Modelo de tripolo, os perfis verticais de  $E$  indicam uma terceira região de cargas. No detalhe a precipitação das cargas positivas no estágio de dissipação.

Fonte adaptada de Heilmann(2006).

Dados de radar revelam que os centros de cargas das nuvens de tempestades se organizam junto às regiões de precipitação, localizadas em faixas de temperaturas bem definidas. Essas análises também mostram que o rápido desenvolvimento elétrico está associado ao crescimento da precipitação. A importância da eletrificação das nuvens no crescimento das gotas de chuva, por colisão e coalescência, foi destacada por Colgate (1967). Observações feitas com radares meteorológicos e sistemas eletromagnéticos por Moore et al (1962,1964), Battan e Theiss (1970), Hiser (1973) e Proctor (1983) mostraram que as regiões das chuvas de onde raios se originam, apresentam um subsequente abrupto crescimento de gotas precipitáveis.

A teoria do processo colisional indutivo tem sido utilizada como um mecanismo primário de geração de cargas para as tempestades (MASON, 1988). Experimentos de laboratório têm mostrado que apenas na presença de fortes campos elétricos, da ordem de 10 kV/m ou mais, o processo indutivo torna-se importante (VOLLAND, 1982), indicando que o campo elétrico atmosférico de céu claro (campo elétrico existente na atmosfera em condição de céu claro) não é suficiente para que ocorra a geração de cargas. Portanto, este processo apenas passa a ser efetivo no estágio maduro de uma tempestade, não podendo ser responsável pela formação das cargas no início da tempestade.

### 2.1.2.3. As Teorias de Eletrização das Nuvens

Em geral, numa nuvem existe vapor d'água, hidrometeoros, íons e partículas de aerossóis. Os hidrometeoros são partículas formadas por água (líquida ou sólida). A formação dos hidrometeoros começa com a nucleação do vapor d'água sobre alguma pequena partícula de aerossol (núcleo de condensação para a água e núcleo de deposição para o gelo). Este processo é altamente dependente da densidade de vapor no ar, da temperatura e da natureza do núcleo. Os núcleos de condensação de gotas podem ser ativados em várias temperaturas, inclusive abaixo de 0 °C. Os núcleos de gelo possuem certas características especiais de tamanho, forma e composição e somente se ativam abaixo de 0 °C. Quando coexistem numa mesma região gotas e cristais de gelo, este último aumenta de volume em função da redução no volume das gotas, devido a pressão de saturação de vapor ser menor no gelo.

Do ponto de vista fenomenológico, existem duas hipóteses que são utilizadas para explicar a eletrificação das nuvens de tempestades: (a) hipótese da Precipitação e (b) hipótese da Convecção. Em geral estas hipóteses admitem uma estrutura elétrica das nuvens na forma de um dipolo elétrico vertical com o centro de cargas positivo na parte superior da nuvem, acima de um centro de carga negativa ou até mesmo um centro secundário de cargas positivas abaixo de centro de cargas negativas (MACGORMAN, 1998; WILLIAMS, 1988):

#### 2.1.2.4. Tipos de Raios

O termo descarga atmosférica tem sido freqüentemente empregado de forma equivalente a relâmpago; e neste trabalho, trataremos como “raios”. Existem dois tipos fundamentais de raios: (1) na atmosfera e (2) que atingem o solo. Entre os raios na atmosfera, pode-se identificar três tipos principais:

- **Raios Intranuvem (IN)**, os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade;
- **Raios Entre-Nuvens (EN)**, que ocorrem entre nuvens diferentes;
- **Raios no Ar (AR)**, que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo.

Os raios que atingem o solo, são classificados em dois tipos básicos:

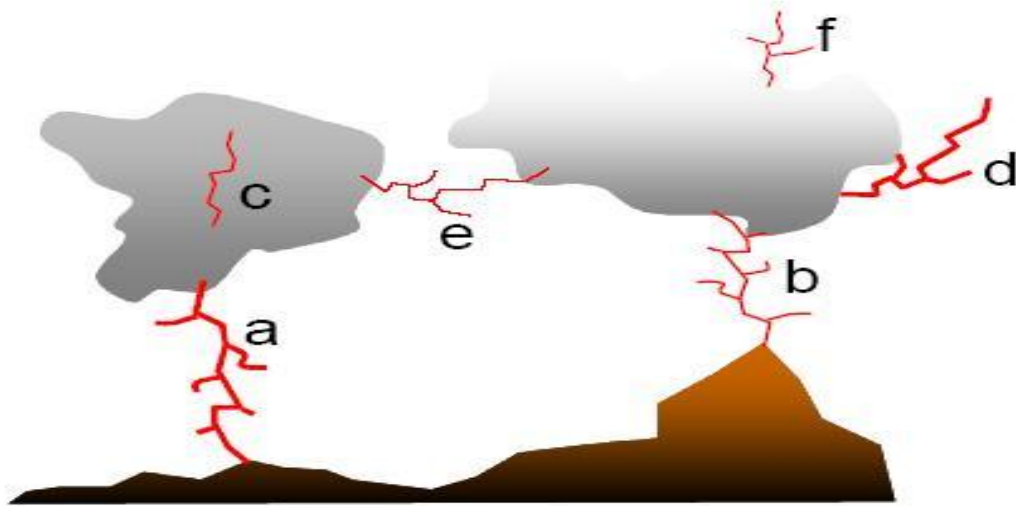
- **Raios Nuvem-Solo (NS)**, caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra. Nos raios NS as descargas completam o trajeto entre os centros em que se formam e o solo em tempos da ordem de 3 ms a 50 ms;
- **Raios Solo-Nuvem (SN)**, que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem.

Os raios NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos **raios positivos** (transferência de cargas positivas) e **negativos** (transferência de cargas negativas).

Os raios IN são os mais comuns, seguidos pelos raios NS (BOCCIPPIO et al, 2001; PINTO JR.; PINTO, 2000; RAKOV; UMAN. 2003). Já os raios SN, EN e AR são bem mais raros. Embora os raios que atingem o solo não sejam os mais freqüentes, eles são os mais estudados, não só pela maior facilidade na realização de medidas como também por sua ação destrutiva na superfície terrestre. Por outro lado, os raios na atmosfera ainda são bem menos conhecidos, devido a grande dificuldade em obter-se informações detalhadas de seus mecanismos físicos. Entretanto, os sensores do LPATS IV são fabricados para detectarem mais raios nuvem solo ou solo nuvem.



De todos os tipos, os raios dentro das nuvens são os mais frequentes, em parte devido ao fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura. Elas representam cerca de 80% do número total das descargas elétricas atmosféricas. Este percentual varia com a latitude geográfica da região, sendo em torno de 90% em regiões de baixas latitudes, próximas ao equador geográfico, e em torno de 50% em regiões de altas latitudes, próximas aos pólos geográficos. Os raios NS apresentam em sua maioria polaridade negativa, representando em média 90% de seu total. A frequência dos raios NS com polaridade positiva, entretanto, parece ser bastante variável, sendo em alguns casos até superior à dos negativos (CAREY et al 2003, HUFFINES. 2001; NACCARATO et al, 2003c ORVILLE ; RAKOV; UMAN, 2003). A estrutura da nuvem de tempestade e os diversos tipos de raios são apresentados na Figura 4.



**Figura 4** Estrutura de nuvem de tempestades, identificando os tipos de raios : a) nuvem-solo,(b) solo-nuvem, (c) intranuvem, (d) da nuvem para um ponto qualquer da atmosfera - denominados então descargas no ar, (e) entre nuvens (f) da nuvem para a Ionosfera.  
Fonte; SHIGIHARA(2005)

Os raios NS positivos, por sua vez, costumam ser, em sua maioria, simples e sua única descarga de retorno transfere ao solo uma quantidade de carga maior quando comparado a um raio negativo. Desta forma, a intensidade da corrente dos raios positivos tende a ser maior que a dos negativos (BALLAROTTI, 2005,NACCARATO, 2001. ORVILLE, 2004b.).

A intensidade da corrente da descarga de retorno em raios positivos também costuma ser maior do que nos negativos, ultrapassando em cerca de 5% dos casos, 200 mil

ampères Nos raios negativos apenas 0,1% dos casos ultrapassa este valor. Raios positivos também apresentam corrente contínua mais freqüentemente que os negativos. Em geral, também é mais intensa (algumas centenas de ampères) e perdura por um período mais longo (PINTO JR, 1996). É esta maior duração da corrente contínua que faz com que os raios positivos sejam mais destrutivos que os negativos. Quando maior a duração da corrente, maior chance ela tem de provocar um incêndio. É a corrente contínua a responsável pela maior parte dos incêndios provocados por raios. É por esta razão que os raios com corrente contínua são algumas vezes chamados de raios “quentes”.

Os raios do solo para a nuvem também podem ser negativos ou positivos, dependendo da polaridade das cargas contidas na região da nuvem a que se dirigem. Os negativos são aqueles que encontram uma região de cargas negativas dentro da nuvem, e os positivos, uma região de cargas positivas. Em geral os raios do solo para a nuvem também se iniciam a partir de um líder escalonado que se move para cima criando várias ramificações. Os raios bipolares da nuvem para o solo são caracterizados por apresentar descargas de retorno que transportam cargas de ambas as polaridades para o solo.

As descargas elétricas atmosférica da nuvem para o solo são em sua maioria negativas. Em média eles representam 90% do total. Os 10% restantes são raios positivos (9%) ou bipolares (1%) (PINTO JR., 1996).

Uma nuvem carregada desenvolve um potencial eletrostático muito intenso através de mecanismo interno. O campo eletrostático resultante abaixo das nuvens possui valores entre 10 a 30 mil volts por metro de elevação acima da terra durante uma tempestade. Este campo induz uma carga igual, porém de sinal contrário na superfície da terra logo abaixo da nuvem. A “sombra de carga induzida” acompanha a movimentação da nuvem. Quando a nuvem entra em uma área considerada, ela induz esta carga em todos os objetos e construções que estão sob sua influência (isto inclui os tanques e depósitos de inflamáveis ) e as tensões elétricas resultantes, podem atingir valores superiores a milhões de volts com respeito à área fora da influência da nuvem (área descarregada).

Quando a carga dentro da nuvem alcança um nível crítico, o potencial resultante causa a ionização do ar na proximidade, formando um fluxo de carga descendente chamado “steps leaders” (líder escalonado); conforme o líder escalonado caminha em direção ao solo, ele traz em sua ponta a mesma voltagem da nuvem. Isto provoca a

movimentação contínua e em degraus do líder escalonado em direção a terra. Com a aproximação do solo, centelhas ascendentes são formadas nas partes elevadas (árvores, torres, tanques ou edifícios) que tentam “encontrar” o líder escalonado descendente. A primeira entre muitas outras centelhas ascendentes que fechar o circuito, iniciará o processo de neutralização de cargas.

Muitas têm sido as técnicas utilizadas para estudar os raios na Natureza, como filmagem mediante câmeras de alta velocidade, as quais permitem observar todas as etapas do fenômeno físico (BALLAROTTI, 2005; SABA et al, 2003, 2004b); medição dos campos eletromagnéticos irradiados próximos e distantes do evento através de antenas capacitivas ou indutivas (RAKOV ; UMAN, 2003), as quais permitem recuperar a informação da corrente que circula pelo canal; medição da luminosidade do canal a partir de sensores ópticos (CHOWDHURI et al, 2005) e medidas diretas da corrente do canal por meio de raios induzidos artificialmente (SOLORZANO, 2003). Todas essas técnicas utilizam sistemas de aquisição de alta velocidade que possibilitam analisar detalhes das variações dos campos eletromagnéticos, da luminosidade e da corrente no canal, relacionando-as com os processos físicos que ocorrem durante o fenômeno. Porém, devido ao seu caráter pontual, ficam restritas às regiões onde as medidas são realizadas.

As descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo produzem pulsos de corrente elétrica que excedem os 100 kA, conforme demonstrou Schonland (1938) em descargas naturais a pára-raios instrumentados. Esses resultados foram corroborados por estudos de raios com ocorrências provocadas, feitos por Idone & Orville (1985). Eventos de raios dessa magnitude, potencialmente podem danificar e/ou provocar desligamentos nas linhas de transmissão dos sistemas elétricos, mesmo por indução, isto é, sem incidência direta das descargas nas linhas (KOSTENKO, 1995; RUSCK, 1977).

É necessário conhecer os mecanismos físicos de eletrificação de nuvens, nas diversas situações de tempo e clima, que propiciam aumento do número de eventos e de intensidade de corrente dos raios nuvem-solo (SOUZA, 1980; BAKER et al, 1995), em virtude da necessidade de proteção não só de sistemas de geração e transmissão de eletricidade, mas também de seres vivos, aeronaves, embarcações (KRIDER, 1982, UMAN e VIEMEISTER, 1972;), instalações de comunicação, computação e edificações (BAUM et al, 1987; HOFFERT, 1989). Rocha et al (2007), utilizando os dados de raios registrados pela RDR do SIPAM, realizaram um estudo sobre as características dos raios

em quatro localidades do Este da Amazônia: São Luis -MA, Belém -PA, Paragominas -PA e Tucuruí -PA, onde foram analisados os mapas ceráunicos e a ocorrência de raios durante os meses de novembro de 2006 a março de 2007 e analisaram as frequências de ocorrências de raios e a suas respectivas distribuições mensais e horárias, essas localidades e Belém, Paragominas, Tucuruí e São Luís. As localidades de Belém e Paragominas apresentaram um número considerável de ocorrências de raios (NS e IN), com um total acima de 1500 ocorrências. Sendo que Belém registrou um número máximo de ocorrências de raios no mês de dezembro, e Paragominas teve seu máximo número de raios registrados no mês de março. Nesse estudo foi possível verificar que localidades litorâneas tendem a apresentar um número menor de raios.

Estudo recente de Almeida et al. (2007) realizou uma análise das características dos raios em cinco eventos de tempestades severas em Belém, com precipitações acima de 40 mm em menos de três horas, registradas por pluviômetro do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Através desse trabalho foi possível verificar que em todos os eventos analisados ocorreu um máximo da frequência de raios com antecedência de 20 a 70 minutos em relação ao máximo de precipitação. Sendo que, essas análises se mostraram independentemente do horário das tempestades severas que ocorreram entre 13 e 19 horas locais. Com esse estudo foi possível verificar a importância do monitoramento da frequência de ocorrência dos raios, já que eles podem servir para alertar em tempo real, o acontecimento de tempestades severas. Rocha et al (2008), apresentou um estudo preliminar da influencia da Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT) sobre as atividades de raios na Amazônia Oriental, durante os meses de outubro de 2006 a março de 2007, período de transição dos meses mais secos para os meses mais chuvosos. Ribeiro et al (2008), analisou a relação entre raios e precipitação pluviométrica nos meses mais chuvosos (fevereiro e março) e os meses menos chuvoso (julho e agosto) durante o ano de 2007 em Belém, mostrando que a frequência de ocorrência horária dos raios apresentaram seus máximos valores sempre antecedendo os máximos de precipitação, sendo que esse retardamento é maior na estação seca.

### 2.1.3. Rede de Detecção de Raios

Uma rede de detecção de raios é usada para detectar a existência de descargas atmosféricas, tanto as nuvem-solo quanto as intra-nuvens, e identificar precisamente a localização da descarga do raio nuvem-solo na terra. Isto é realizado através do uso de múltiplos sensores remotos que detectam os sinais emitidos pela descarga e filtram completamente os sinais de outras fontes não provenientes de raios. Cada sensor ao detectar um evento de uma descarga envia os dados sobre este evento para um sistema de processamento localizado em uma base central, conhecido como um analisador de posição avançado (APA) ou uma central analisadora (CA).

Segundo SILVEIRA (2005), as principais redes detecção de descargas atmosféricas existentes que operam no mundo são:

**EUCLID**, Na Europa, com 77 sensores; **NALDN**, nos EUA e Canadá; **SAFIR**, Alemanha; **CELDN**, na Europa central; **RINDAT**, **BLDN**, **WWLL**, **SIDDEM**, **SIPAM**, no Brasil; **UKMO ATD**, na Ásia; **STARNET**, na África, Caribe e Brasil. Estas redes podem ser divididas basicamente em duas classes:

- **Sistemas em baixa frequência**, com sensores que utilizam as técnicas da indicação da direção do campo (**MDF**-Magnetic Direction Finding), Diferença no Tempo de Chegada (**TOA** - Time of Arrival) e tecnologia combinada **TOA-MDF**. São usados para detectar descargas nuvem-solo e intra-nuvens;

- **Sistemas em alta frequência**, com sensores de interferometria ou **SAFIR**, que detectam tanto raios nuvem-solo quanto raios intra-nuvens.

O Brasil possui cinco redes de detecção que diferem de acordo com sua frequência, ou seja, estas redes detectam descargas atmosféricas nuvem-solo e intra-nuvem ou apenas descargas nuvem-solo. A maioria opera sobre a responsabilidade de setores governamentais, e são:

**RINDAT** - Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas, abrange grande parte da área monitorada do Brasil, opera em alta e baixa frequência. É um consórcio entre companhias do setor elétrico e institutos de pesquisa brasileiros.

**BRDR** - Rede de Detecção de Raios do Brasil, que cobre o estado de Rondônia, e também funciona em alta e baixa frequência. É operada pela NASA (Agência Espacial Norte Americana), pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

**SIDDEM** - Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos, cobrindo o sul do Brasil.

**WWLL** - World Wide Lightning Location Network, opera em baixa frequência. É um consórcio entre o INPE e a Universidade de Washington. Cobre o Brasil inteiro. Mas com baixa eficiência e precisão.

**STARNET**- operada pelo IAG-USP, oferece dados de esféricos de baixa frequência, com ampla cobertura, mas com baixa eficiência de detecção.

**RDR-SIPAM** - Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia.

#### 2.1.3.1. RINDAT- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) é uma rede de sensores e centrais que permitem detectar em tempo real as descargas atmosféricas nuvem-solo, isto é, a maior parte das descargas que atingem o solo, em parte do território brasileiro. Esse Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas gera pesquisa científica e produtos destinados a aplicações na previsão de tempo, na análise e manutenção de sistemas elétricos de transmissão, de distribuição e na emissão de laudos de análise de eventos severos para seguradoras e empresas de engenharia. O sistema utiliza as tecnologias denominadas "Sistema de Localização e Rastreamento de Raios" ("Lightning Positioning and Tracking System" - LPATS) e "Localização da Direção Magnética" ("Magnetic Direction Finder" - MDF). A precisão das informações de localização de raios do sistema é, em média, de 500 metros dentro do perímetro definido pela posição das estações remotas de recepção. O sistema opera através do Sistema de Posicionamento Global ("Global Positioning System"- GPS). Entre os produtos de visualização gerados pelo sistema, se destacam: a)-Localização geográfica e

temporal de descargas atmosféricas nuvem-terra; b)-Localização de tempestades; c)- Determinação de características de descargas como: valor estimado do pico da corrente de retorno, polaridade e número de componentes (multiplicidade) se a descarga for de natureza múltipla.

A RINDAT tinha até junho de 2003, um total de 22 sensores, sendo 10 sensores LPATS III, 6 sensores LPATS IV e 6 sensores IMPACT. A RINDAT passou por uma melhoria a partir de Junho de 2003, sendo acrescentados à distribuição de sensores, outras 2 antenas do tipo IMPACT de propriedade do INPE, estando elas localizadas em Campo Grande/MS e Pirassununga/SP e atualmente encontram-se integrados à essa rede, os 12 sensores da RDR-SIPAM.

#### 2.1.3.2. STARNET - Sferics Tracking and Ranging NETWORK

A STARNET foi concebida pela Resolution Display Inc (RDI) a partir do programa de desenvolvimento inovativo de pequenas empresas da NASA. O sistema, construído pela RDI, consiste em uma rede de treze receptores de ondas de rádio de baixa frequência (7-15 kHz - VLF) espalhados sobre os continentes europeu, africano e americano. Estes receptores detectam e localizam descargas atmosféricas baseando-se na detecção dos “sferics” (ANAGNOSTOU et al, 2004). Os “sferics” são ruídos de rádio emitido pelo relâmpago em uma vasta banda do espectro eletromagnético. Sendo que na faixa do VLF os sferics podem se propagar a milhares de quilômetros de distância dentro do guia de onda formado pela Terra e a Ionosfera. Para a determinação da localização dos Sferics proveniente das descargas atmosféricas é utilizando o método do ATD (Arrival Time Difference) (LEE, 1986; LEE, 1989). A rede STARNET consiste em duas configurações: Configuração para Europa (de 7 sensores localizados na Inglaterra, Roskilde, Romênia, Larnaca, Portugal, Configuração para a África (7 sensores localizados em (Etiópia, Dar es Sallam, África do Sul, Nigéria, Dakar) e no Brasil (São Paulo, Fortaleza e Manaus).

### 2.1.3.3. Detecção de raios na Amazônia

Estudos realizados na Amazônia mostraram que esta é uma região com grande ocorrência de raios no mundo, tendo sido primeiramente estudados com base em dados de trovoadas registrados por observadores em estações meteorológicas (SERRA, 1977; NECHET, 1994). Estes estudos mostraram que esta região apresenta um dos maiores índices ceráunicos do mundo. Isso era esperado, em decorrência da formação frequente de nuvens cumulo nimbos sobre toda a região, que apresenta elevados índices pluviométricos nas sub-regiões leste e extremo oeste (SOUZA et al, 2003). O estudo de raios com equipamentos modernos de detecção e localização teve início quando ao final de 1994, foi instalado no campus da UFPA, em Belém, um sistema adquirido pelo INPE, da Lightning Location and Protection Inc. (LLP), com sensor modelo 430 TSS. Esse sistema tinha grande precisão no tempo de ocorrência (milissegundos) e direção de evento ( $\pm 2,5^\circ$ ) em ângulo azimutal, medido em um círculo de cerca de 160 km de raio, de cobertura, a partir do sensor. Os dados obtidos no período 1995-1998 permitiram diversas análises das características peculiares dos raios regionais no que tange: aos campos elétricos e magnéticos produzidos (ROCHA et al, 1996), a estatística das distribuições espaciais e temporais dos eventos, bem como suas intensidades e polaridades (SOUZA et al 1997, ROCHA; SOUZA, 1998), estimativas de precipitação a partir de correlações com a frequência de ocorrência das descargas detectadas (ALMEIDA et al, 2007, ROCHA et al, 1997; SOUZA et al, 1997.), correlações com desligamentos no sistema telefônico de Belém (RIBEIRO et al, 1998; ROCHA et al, 1998), e finalmente, efeitos detectados das descargas no sistema de distribuição de energia elétrica em torno de Belém (ROCHA et al, 1996, LESSA et al, 2008).

### 2.1.3.4. Rede de detecção de raios- RDR-SIPAM

O Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM – foi criado para integrar informações e gerar conhecimentos atualizados para articulação, planejamento e coordenação de ações globais de governo na Amazônia Legal Brasileira, visando à proteção, a inclusão social e o desenvolvimento sustentável da região. Para tanto, o Sistema utiliza dados gerados por uma complexa infra-estrutura tecnológica, composta por



subsistemas integrados de sensoriamento remoto, radares, estações meteorológicas e plataformas de dados, instalada na região. É devido a este aparato que o SIPAM é capaz de promover o complexo monitoramento da região e produzir informações em tempo próximo do real. Este sistema possui 12 sensores LPATS IV, situados na maior parte ao longo de uma configuração meridiana, cobrindo partes de quatro estados brasileiros de Amazônia oriental, sendo seis sensores no estado do Pará, quatro sensores no estado do Maranhão, um sensor no estado de Mato Grosso e um sensor no estado de Tocantins, como mostra a Figura 5. À exceção de dois sensores encontrados a leste de São Luis e de Barra do Corda, cidades no estado de Maranhão, a RDR do SIPAM mostra uma distribuição espacial quase axial, com extremos para o norte em Breves e Belém, no estado de Pará; e os extremos do sul em São Félix do Araguaia - estado do Mato Grosso, e Natividade - estado do Tocantins. A central de processamento fica situada na cidade de Belém.

O LPATS é um sistema que localiza descargas atmosféricas (NS) avaliando o tempo de chegada do sinal (TOA) a partir das medidas de campo elétrico. O LPATS determina a localização de um relâmpago pela diferença do tempo de chegada do sinal eletromagnético (MACGORMAN, 1998). Os sensores LPATS sofreram inúmeros aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo dos anos, dando origem a diferentes séries de produtos, entre elas as séries III e IV em uso atualmente em vários sistemas de localização, inclusive no Brasil. Os aperfeiçoamentos concentraram-se essencialmente nos circuitos eletrônicos utilizados para a amostragem do sinal eletromagnético de uma descarga no que se refere ao aumento da taxa de amostragem, memória, precisão e parâmetros amostrados e na sincronização temporal com o sinal de GPS com o objetivo de aumentar a precisão na localização (GAI. 1995; 1998).



Figura 5 Localização geográfica dos 12 sensores da Rede de Detecção de Descargas Atmosféricas - RDR-SIPAM e área de estudo.

A RDR-SIPAM, além dos 12 sensores LPATS IV, possui um receptor de rádio que opera na faixa de VLF (Very Low Frequency) que detecta pulsos eletromagnéticos, produzidos pela corrente de descarga da nuvem. O sinal eletromagnético recebido é digitalizado em um PSD (Processador de Sinais Digital), que é analisado, avaliando-se entre outros, perdas por propagação e forma de onda do sinal, a fim de decidir se o mesmo trata-se de um raio.

A RDR-SIPAM é composta pela Central de Processamento CP 8000 e, pelos sensores constituídos por três placas de circuito impresso, removíveis, montadas sobre um chassi com abertura frontal, com antenas de GPS e de detecção de descargas atmosféricas montadas fora da estrutura do chassi e conectadas ao receptor via cabo coaxial. A comunicação, da CP 8000 com o sensor, é feita pelo RSD (Remote Sensor Diagnostics), e por meio dele podem ser enviados comandos aos receptores individualmente. O esquema de uma rede de detecção de raios é apresentado na Figura 6 (a) e o diagrama dos subsistemas do sensor é apresentado na Figura 6 (b).

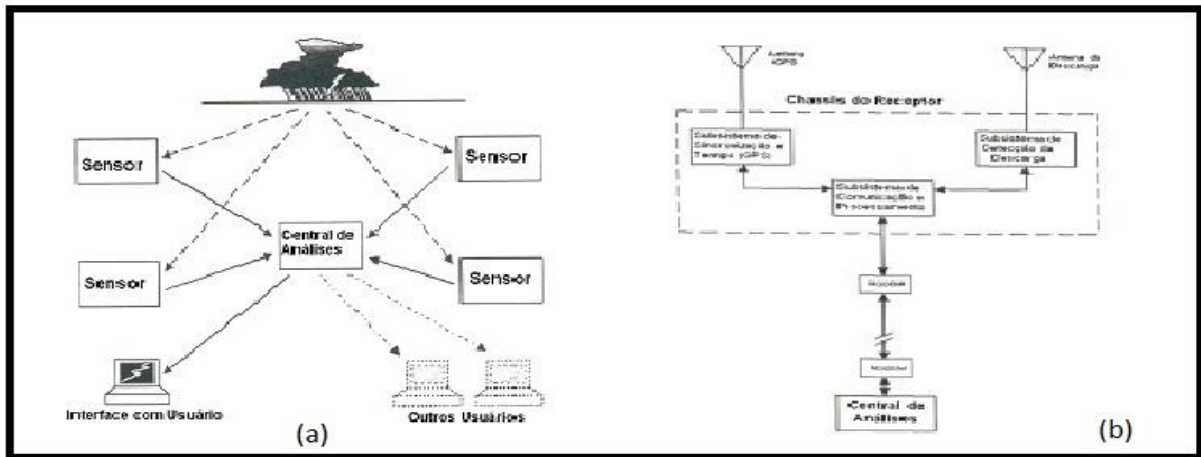


Figura 6.(a) Esquema de uma rede de detecção de raios. (b) - Subsistemas do receptor LPATS

Recentemente, a central de processamento do RDR-SIPAM foi configurada para envio dos dados dos sensores do SIPAM para FURNAS, INPE, e para recebimento dos sensores de Rio Verde (LPATS IV) e Brasília (IMPACT) da RINDAT, integrando a rede do SIPAM à de FURNAS, sendo o início da integração da RDR-SIPAM ao RINDAT.

Atualmente a RDR-SIPAM está fora do ar e em processo de recomposição com novos sensores que estão sendo adquiridos.

#### 2.1.4. Cobertura Vegetal

A região Norte é a região brasileira de maior extensão territorial. Nela existe a maior floresta equatorial do mundo, a floresta Amazônica, com coberturas vegetais bastante heterogêneas abrangendo aproximadamente 80% da região Norte.

A Amazônia brasileira tem sido alvo de atividades antrópicas que estão transformando regiões de florestas em áreas destinadas à agropecuária, contribuindo para a alteração do ambiente (OLIVEIRA, 1993).

A floresta Amazônica possui distinções quanto à formação vegetal que varia de acordo com a altitude do relevo: mata de igapó, mata de várzea, mata de terra firme e floresta semi-úmida. A cobertura vegetal da Amazônia é composta por plantas do tipo latifoliadas e perenifólias.

As variações sazonais da radiação solar, temperatura e chuva determinam o ciclo de vida da cobertura vegetal e esta, por sua vez, modifica as trocas de energia, massa e

momento, entre a superfície e a atmosfera, possuindo um papel importante na variação sazonal da hidrologia superficial. Assim, os processos de superfície estão associados ao clima por meio de várias interações, como as alterações da superfície, as trocas de água, calor e momento. A variação geográfica e sazonal do albedo de superfície é largamente determinada pela distribuição da vegetação da superfície terrestre.

Vários estudos observacionais e de modelagem tem sido apresentados pelo IPCC (2007) e apontam causas de origem antrópicas como fonte das mudanças climáticas. Dentre as causas de origem antrópica, destacam-se as alterações do uso e cobertura da terra. Para a região amazônica Nobre et al. (2007) relataram que “tais alterações estão ligadas diretamente ao desmatamento de sistemas florestais para transformação em sistemas agrícolas e/ou pastagem, o que implica transferência de carbono (na forma de dióxido de carbono) da biosfera para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global, o qual por sua vez acaba atuando sobre a região amazônica.

Diversas pesquisas visam encontrar sistemas de produção sustentáveis e eficazes no sequestro de Carbono na biomassa e no solo. Montagnini e Nair (2004) destacam que a busca por sistemas de baixo custo está emergindo como um dos principais objetivos da política internacional no contexto dos mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) por meio de créditos de carbono.

A estimativa de biomassa de sistemas florestais é relevante no planejamento do uso sustentável dos recursos naturais, assim como nas questões relacionadas ao clima, onde a biomassa é utilizada para estimar o estoque de carbono da vegetação e a quantidade de CO<sub>2</sub> que é liberado à atmosfera devido à adoção de diferentes usos da terra (BROWN,1997).

A cobertura vegetal do Estado do Pará é composta por floresta ombrófila aluvial explorada, formações pioneiras, campos naturais inundáveis, vegetação secundária em diversos estágios de desenvolvimento e pastagens inundáveis (IBGE,1992).

Com o desenvolvimento da informática ficou muito mais fácil a utilização de modelos numéricos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs), onde é possível se estudar o efeito das trocas de energia entre a superfície e a atmosfera (FISCH; MARENGO; NOBRE, 2005).

## CAPITULO 3

### 3.1 RELAÇÕES ENTRE RAIOS, PRECIPITAÇÃO E TIPOS DE SUPERFÍCIE

#### 3.1.1. Introdução

A região Amazônica ocupa uma área de cerca de 6,3 milhões de km<sup>2</sup> e é considerada a maior floresta tropical úmida de todo o globo, tendo uma grande importância como fonte de calor na determinação da circulação geral da atmosfera (NOBRE et al, 1991). A Amazônia apresenta características climáticas e meteorológicas diferentes em suas sub-regiões, com diferentes características de superfície, em termos de vegetação e solos e com diferentes impactos de atividades humanas. Existe uma reciprocidade na relação clima e vegetação na região Norte do Brasil, uma vez que ocorre uma interdependência entre os dois elementos, pois a vegetação contribui diretamente para as características climáticas da região, principalmente em relação à umidade do ar e a quantidade de chuva.

Nas últimas décadas, a necessidade de monitorar, compreender e prever o clima, bem como a crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelas atividades antrópicas, em escala regional e global, ampliaram a importância das observações ambientais. Pesquisas recentes indicam uma espécie de simbiose entre as emissões da floresta, a formação das nuvens e a chuva na Amazônia. Por isso, o funcionamento do sistema climático da Amazônia, e a complexa relação entre a floresta e o clima amazônico sempre foram aspectos intensamente investigados pelos cientistas. Outras relações também tem sido alvo de pesquisas; por exemplo, Dissing e Verbyla (2003) estudaram a relação entre a distribuição de raios e a vegetação, constatando que as circulações de mesoescala desencadeada pelo aquecimento diferencial entre dois tipos de vegetação contrastantes foram capazes de produzir raios. Vidale e Pielke (1995) observaram que um maior fluxo de calor sensível sobre um tipo particular de vegetação aumentou a temperatura do ar, provocando convecção. Anagnostou e Morales (2002) e Carvalho et al.(2002) apontaram dois modos básicos de convecção: um associado à presença de ZCAS e outro a períodos de ausência de ZCAS (NZCAS). Do ponto de vista da circulação de baixos níveis, os dois distinguem na parte sudoeste da Amazônia uma diferença marcante na direção dos ventos que são de oeste durante as ZCAS e de leste durante a NZCAS.

No Brasil, de acordo com Gin e Guedes (2000), as cidades equatoriais de Manaus, São Luís e Belém, que têm o maior índice anual de raios em relação a outras localidades apresentam, entretanto, uma variação significativa em número de raios observados entre o verão e o inverno.

Segundo Pinto Jr.(2004) no Brasil ocorrem cerca de 50 a 70 milhões de raios todo ano que produzem em média uma centena de mortos e trazem perdas estimadas em R\$ 500 milhões, na maior parte ao setor elétrico. O Brasil, devido à enorme extensão territorial e sua posição geográfica, predominantemente tropical, pode ser considerado como o país de maior incidência de raios em todo o mundo, embora a região com maior densidade de raios por Km<sup>2</sup>/ano esteja na África Central.

Na Amazônia, os raios foram primeiramente estudados com base em dados de trovoadas registrados por observadores em estações meteorológicas (SERRA, 1977; NECHET, 1994). Estes estudos mostraram que esta região apresenta um dos maiores índices ceráunicos do mundo. Isso era esperado, em decorrência da formação freqüente de nuvens cumulo nimbos sobre toda a região, que apresenta elevados índices pluviométricos nas sub-regiões leste e extremo oeste (SOUZA et al, 2003).

As relações entre as ocorrências de raios e precipitação de um determinado lugar sobre a terra, dependem das características fisiográficas, do clima, da cobertura da superfície vegetal e usos da terra, bem como, sobre a topografia local e condutividade elétrica do solo.

Recentemente pesquisadores da UFPA iniciaram um programa de monitoramento de raios na Amazônia, utilizando dados provenientes da Rede de Detecção de Raios - RDR-SIPAM, patrocinado pela FINEP e CELPA Rede Energia, que almeja definir as características e as ocorrências de raios e sua associação com sistemas produtores de chuva e as características fisiográficas da superfície em nossa região.

### 3.1.2. Materiais e Métodos

#### 3.1.2.1. Localização da área de estudo

O presente trabalho foi realizado, quase que em sua totalidade, em uma área situada no Estado do Pará, localizada numa posição estratégica na Região Norte ou Amazônica e, para efeito de planejamento econômico. É atravessada no extremo norte pela linha do Equador, possuindo terras, portanto, nos dois hemisférios, com predominância territorial no hemisfério sul. Limita-se ao Norte com a Guiana e o Suriname, através do Planalto das Guianas (representado pelas Serras de Acarai e Tumucumaque); a Nordeste com o Estado do Amapá (através do rio Jarí) e com o Oceano Atlântico; a Leste, com o estado do Maranhão (através do rio Gurupi); a Sudeste com o Estado do Tocantins (através do rio Araguaia); ao Sul e Sudeste com o Estado do Mato Grosso (através do Planalto Central, representado pelas Serras dos Gradaús e Cachimbo e o rio Teles Pires); a Oeste com o Estado do Amazonas (através de uma linha imaginária e do rio Jamundá); e no Extremo Noroeste com o Estado de Roraima (através do Planalto das Guianas, representado pelo prolongamento da Serra do Acarai).

Dentro dessa área foi delimitado um quadrilátero de 6° de latitude por 3° de longitude, que compreende a área definida pelas coordenadas geográficas de 0° S a 6° S e 47° W a 50° W, abrangendo partes dos estados do Pará, Maranhão, extremo norte de Tocantins. Essa região de estudo, Figura 7, foi escolhida por estar localizada em uma área central em relação à localização dos sensores da RDR SIPAM, de modo que a eficiência na detecção e precisão na localização dos raios fosse a maior e melhor possível. A região de estudo foi subdividida em 03 subáreas, dentro dos mesmos limites de longitude, definidas como Área 1 (0°S a 2° S), Área 2 ( 2° S a 4° S ) e Área 3 (4° S a 6° S), conforme mostrada na Figura 8.

Na Área 1 deste estudo, encontram-se a Ilha do Marajó e a microrregião Bragantina. A Ilha do Marajó com 65.394 km<sup>2</sup> de área é o maior arquipélago fluvio marítimo do planeta. Localizado na foz do Rio Amazonas, o arquipélago, além da ilha que lhe dá o nome, é formado pelas ilhas de Caviana, com 5 mil km<sup>2</sup>, um dos pontos mais atingidos pela violência da pororoca, Mexiana, com 1,5 mil km<sup>2</sup>, e Ilha Grande de Gurupá, a menor das três, coberta por floresta densa. A microrregião Bragantina, localizada no leste do estado do Pará, possui uma história de uso da terra com mais de um século. A paisagem

natural se encontra bastante modificada pela intensa atividade antrópica e enfrenta atualmente grandes problemas causados pela ocupação desordenada.

Na Área 2, onde o crescimento populacional acelerado, a velocidade e a intensidade das atividades antrópicas como a formação de pastagens, a agricultura e a exploração madeireira, tiveram papel de destaque na ocupação e no uso da terra na Amazônia, ocasionando mudanças e diferenciações acentuadas na cobertura vegetal e no ambiente dessa região. A vegetação original e a Floresta Ombrofila, Floresta Densa de Platôs e de Baixos Platôs, foram bastante alteradas, ensejando o surgimento das florestas secundárias.

A partir da década de 30 iniciou-se a imigração de agricultores japoneses, no município de Tomé Açu, onde o cultivo da pimenta-do-reino fomentou o desenvolvimento rural regional. Com o declínio do ciclo da pimenta a partir de 1970, causado por questões fitossanitárias, esses agricultores buscaram novos sistemas de produção. Segundo Homma (2003) uma saída para esta “crise ecológica”, foi a diversificação das culturas por meio dos sistemas agro florestais.

Segundo Fearnside (1992) e Vieira et al (1993), a pecuária toma a maior parte das terras desmatadas na Amazônia, inclusive maior parte daquilo que é, primeiramente, desmatado para culturas anuais, considerando a atividade pecuária como responsável pelo desequilíbrio dos ecossistemas e das áreas degradadas. Por exemplo, no Município de Paragominas, um pólo agropecuário situado nas margens da Rodovia Belém Brasília, onde 23% da área desmatada serviu para implantação de pastagens, sendo que aproximadamente 36% dessas áreas já se encontram degradadas.

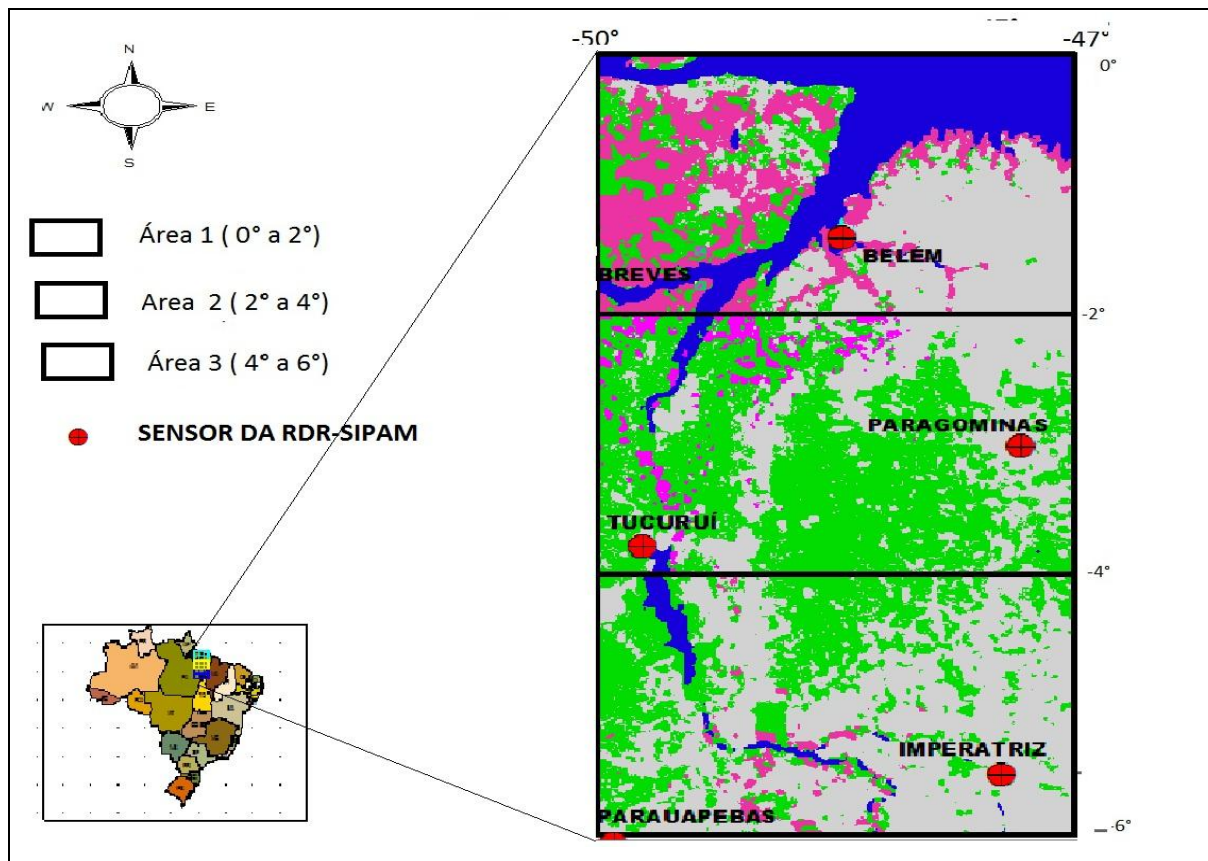
Kitamura (1993) concluiu que a pecuária extensiva, em áreas florestadas, é o sistema de uso da terra que tem contribuído para o aumento do desmatamento na Região, e tem sido seriamente questionada, devido suas implicações socioeconômicas e ecológicas negativas, que lhes conferem baixos níveis de sustentabilidade e que apesar da baixa produtividade e das evidentes conseqüências ambientais, a pecuária continua a se expandir, ainda sendo a principal forma de ocupação de terras e de desmatamento na Amazônia.

A Área 3, encontra-se no centro leste do Pará. Entre 1984 e 1997 a região conhecida como “Polígono dos Castanhais”, teve sua área de cobertura florestal primária reduzida de 80% para 27%. Em 2002 a cobertura com pastagens já representava 68,03% das áreas pesquisadas. Da área de floresta que representava 73,70%, atualmente restam



apenas 22 %, ou seja, na média as propriedades já ultrapassaram os limites legais de desmatamento.

As atividades antrópicas, tais como a formação de pastagens, a agricultura e, mais recentemente, a exploração madeireira, têm contribuído para causar distúrbios significativos no meio ambiente em algumas áreas críticas. A expansão da agricultura na Amazônia é bastante discutida, tanto pela dificuldade de sustentabilidade como em função da preocupação mundial com o desmatamento de áreas florestais, áreas estas, consideradas importantes na conservação dos solos, no abrigo de recursos genéticos pouco conhecidos e no controle do clima global (VEIGA; HEBETTE, 1992).



**Figura 7** Mapa do Brasil, identificando a área de estudo com detalhamento das três subáreas. Os círculos vermelhos representam as localizações dos sensores da RDR-SIPAM.

### 3.1.2.2. Observações de Raios

Os dados de ocorrências de raios utilizados neste trabalho foram coletados pela rede de detecção de raios do Sistema de Proteção Amazônia (RDR-SIPAM), que inclui 12 sensores LPATS IV fabricados pela VAISALA. Esses dados são gerados no formato internacional UALF (Universal ASCII Lightning Format) em uma plataforma estável

UNIX® que computa as soluções com as características de descargas a partir dos dados brutos provenientes de no mínimo três sensores, envia as soluções diretamente para dispositivos de visualização em tempo real ou para processadores de arquivo para aplicações na investigação de acidentes ou ocorrências provocadas por descargas atmosféricas, e ainda para monitores de desempenho de redes. Esse sistema monitora continuamente a frequência de ocorrência dos raios, a localização geográfica dos eventos, o número de pulsos por relâmpago, tipo de relâmpago, polaridade dos pulsos e correntes máximas, bem como o instante da ocorrência com precisão de milissegundos. A precisão detectada está entre 0,5 a uma milha para raios distantes até 480 km do centro da rede. Esta precisão é graças a tecnologia TOA (Time-Of-Arrival) tempo de chegada. Vários receptores localizados em um amplo espaço receberão o mesmo evento de relâmpago em tempos levemente diferentes. Esta diferença de tempo pode ser relacionada a uma distância física de cada um dos sensores receptores. Assim a técnica de tempo de chegada (TOA) requer que a diferença da chegada do sinal de uma descarga seja precisamente conhecida pela central. A precisão é conhecida usando os sinais de tempo dos satélites do GPS e o tempo de referencia externa de cada receptor. Todos os receptores na malha são sincronizados em fase em relação ao outro. Cada sensor possui um GPS que fornece um tempo de resolução de 50 ns. O tempo de todos os sensores estão sincronizados pelo GPS. Quando uma descarga é detectada pelo sensor, o tempo exato em que ocorre o pico da forma de onda é registrado e enviado para a central.

A central CP 8000 correlaciona as informações de três ou mais sensores e usa as diferenças de tempo de chegada dos sinais eletromagnéticos emitidos pelas descargas elétricas atmosféricas para determinar o local exato do evento fornecendo suas coordenadas (latitude e longitude). Assim que a localização é calculada, a central utiliza as informações para estimar a corrente de pico da descarga. Esta informação junto com a polaridade, localização e outras características, são gravadas em um banco de dados para acesso, imediato ou posterior, dos usuários.

Os sensores LPATS IV estão situados na maior parte ao longo de uma configuração meridiana, cobrindo partes de quatro estados brasileiros da Amazônia Oriental (Figura 5) e localizados geograficamente conforme Tabela 1. Ressalta-se que essa é a configuração máxima dos sensores, porém nem todos os sensores estavam funcionando normalmente durante o período em estudo, havendo paralisações alternadas de sensores.

Tabela 1 Localização geográfica dos sensores VAISALA-LPATS IV da RDR-SIPAM.

| Localidade            | UF | Latitude      | Longitude     |
|-----------------------|----|---------------|---------------|
| Barra do Corda        | MA | 05° 30' 29" S | 45° 14' 41" W |
| Imperatriz            | MA | 05° 31' 50" S | 47° 27' 30" W |
| Carolina              | MA | 07° 20' 01" S | 47° 26' 02" W |
| São Luis              | MA | 02° 30' 7" S  | 44° 16' 58" W |
| São Félix do Araguaia | MT | 11° 37' 54" S | 50° 41' 18" W |
| Redenção              | PA | 08° 01' 50" S | 49° 58' 50" W |
| Belém                 | PA | 01° 24' 43" S | 48° 27' 39" W |
| Tucuruí               | PA | 03° 50' 2" S  | 49° 40' 39" W |
| Breves                | PA | 01° 41' 36" S | 50° 28' 40" W |
| Paragominas           | PA | 03° 0' 25" S  | 47° 20' 24" W |
| Parauapebas           | PA | 06° 4' 19" S  | 49° 54' 15" W |
| Natividade            | TO | 11° 42' 00" S | 47° 45' 00" W |
| <b>Fonte: SIPAM</b>   |    |               |               |

### 3.1.2.2.1. Distribuição espacial e temporal dos raios

Para análise dos dados de raios foram utilizados vários métodos e programas. Primeiro utilizou-se a planilha do EXCEL para passar os dados recebidos da central CP 8000 da RDR SIPAM para um formato de texto. No ambiente do software Arc View 3.2, do arquivo de dados, já no formato de texto, foram feitas seleções de dados, através da opção **View – Geoprocessing–Clip**, onde foi possível criar sub arquivos no espaço e no tempo, de modo a considerar apenas os raios detectados dentro da área em estudo.

Após selecionar apenas os dados correspondentes à área, foi feita uma nova seleção, onde foram filtrados, em planilhas do EXCEL, apenas os raios nuvem–solo, por serem aqueles que apresentam maiores danos aos seres vivos e aos sistemas elétricos e de telecomunicações.

Para o cálculo da densidade de raios foi utilizado o Arc View 3.2, através da extensão “**Spatial Analyst**” que é um estimador de densidade Kernel, em que é usada a técnica de interpolação exploratória, gerando uma superfície de densidade para a identificação visual de “áreas quentes” indicativas de alguma forma de aglomeração.

### 3.1.2.3. Dados de precipitação

Os pluviômetros digitais integram às estações meteorológicas automáticas que registram o horário e a intensidade da chuva acumulada continuamente . Os dados de precipitação acumulada selecionados para análise diária foram medidos por pluviômetros basculantes (Campbell Instruments, Inc) das estações meteorológicas automáticas do INMET, [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br) e do banco de dados Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA) <http://hidroweb.ana.gov.br/>, assim distribuídas: 18 estações na Área 1, 13 estações, Área 2 e 15 estações na Área 3, conforme Tabela .2, 3 e .4, respectivamente

#### 3.1.2.3.1. Distribuição espacial da precipitação

Em cada subárea foi selecionada um determinado número de estações meteorológicas, conforme a disponibilidade dos dados, tanto no portal da Hidroweb-ANA quanto no portal do INMET na internet. Após a coleta dos dados foram calculadas as médias mensais em cada área e agrupadas por trimestre e tratados em planilhas EXCEL, onde foram considerados os trimestres de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) e o trimestre março, abril e maio (MAM) como período chuvoso e os trimestre de junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON), período seco ou menos chuvoso, conforme Tabela 2, 3 e 4, respectivamente

Para análise espacial da precipitação foi utilizado o método da interpolação. Utilizando o software Arc View 3.2 foi possível fazer uma interpolação através do interpolador IDW. Esse interpolador utiliza o modelo estatístico denominado “Inverso das Distâncias”. O modelo baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores

Após fazer a interpolação dos dados de chuva, foram geradas as isolinhas pelo software Arc View 3.2, através da opção Surface – Create Contours.

**Tabela 2** Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva, na Área1.

| NOME DA ESTAÇÃO                  | RESPONSÁVEL | OPERADOR | LATITUDE  | LONGITUDE  | DJF        | MAM        | JJA        | SON       |
|----------------------------------|-------------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Chaves                           | ANA         | CPRM     | -0.165556 | -49.978610 | 344        | 497        | 274        | 55        |
| Maruda                           | ANA         | CPRM     | -0.633611 | -47.658330 | 323        | 421        | 113        | 4         |
| Soure                            | INMET       | INMET    | -0.733333 | -48.516667 | 293        | 353        | 114        | 7         |
| Vigia                            | ANA         | CPRM     | -0.868056 | -48.110280 | 257        | 407        | 205        | 38        |
| Primavera                        | ANA         | CPRM     | -0.929444 | -47.099440 | 248        | 547        | 223        | 20        |
| Terra Alta                       | ANA         | CPRM     | -1.038611 | -47.913330 | 204        | 368        | 192        | 56        |
| Tracuateua                       | INMET       | INMET    | -1.066667 | -46.900000 | 223        | 472        | 177        | 18        |
| Capanema                         | ANA         | CPRM     | -1.203611 | -47.178060 | 193        | 435        | 169        | 48        |
| Nova Timboteua                   | ANA         | CPRM     | -1.211110 | -47.386390 | 226        | 326        | 160        | 38        |
| Viseu                            | ANA         | CPRM     | -1.231389 | -46.187780 | 130        | 376        | 162        | 1         |
| Belem DEPV                       | DEPV        | DEPV     | -1.383333 | -48.466670 | 307        | 403        | 187        | 112       |
| Santa Cruz do Arari              | ANA         | CPRM     | -1.416389 | -48.959170 | 341        | 393        | 127        | 10        |
| Belem INMET                      | INMET       | INMET    | -1.435000 | -48.437780 | 423        | 379        | 183        | 32        |
| Belem 4 DN                       | ANA         | CPRM     | -1.464722 | -48.504400 | 232        | 310        | 130        | 83        |
| Santa Luzia do Para              | ANA         | CPRM     | -1.516110 | -46.906110 | 178        | 311        | 217        | 33        |
| Bujaru                           | ANA         | CPRM     | -1.521110 | -48.046110 | 192        | 239        | 77         | 51        |
| Breves                           | INMET       | INMET    | -1.683333 | -50.483333 | 279        | 331        | 125        | 67        |
| Abaetetuba                       | ANA         | CPRM     | -1.738056 | -48.858890 | 249        | 358        | 163        | 64        |
| Acara                            | ANA         | CPRM     | -1.958333 | -48.207500 | 340        | 421        | 156        | 113       |
| <b>MÉDIA TRIMESTRAL - ÁREA 1</b> |             |          |           |            | <b>262</b> | <b>387</b> | <b>166</b> | <b>45</b> |

**Tabela 3** Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva na Área 2.

| NOME DA ESTAÇÃO                  | RESPONSÁVEL | OPERADOR | LATITUDE  | LONGITUDE  | DJF        | MAM        | JJA       | SON       |
|----------------------------------|-------------|----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Oeiras do Para                   | ANA         | CPRM     | -2.001940 | -49.863610 | 408        | 512        | 127       | 80        |
| Fazenda Jauara                   | ANA         | CPRM     | -2.035556 | -47.750560 | 302        | 437        | 131       | 52        |
| Cametá                           | INMET       | INMET    | -2.250000 | -49.500000 | 299        | 339        | 111       | 73        |
| PA-256 (rio capim)               | ANA         | CPRM     | -2.420556 | -48.245280 | 280        | 336        | 56        | 41        |
| Tome-Acu                         | ANA         | CPRM     | -2.421389 | -48.149167 | 374        | 511        | 70        | 61        |
| Fazenda São Raimundo             | ANA         | CPRM     | -2.426111 | -47.532780 | 386        | 426        | 32        | 45        |
| PA-256 (Tome acu)                | ANA         | CPRM     | -2.948333 | -47.814440 | 305        | 410        | 39        | 54        |
| Paragominas                      | ANA         | CPRM     | -3.010000 | -47.343330 | 218        | 340        | 23        | 22        |
| Fazenda Maringa                  | ANA         | CPRM     | -3.160560 | -48.100000 | 258        | 371        | 35        | 47        |
| Fazenda Planalto                 | ANA         | CPRM     | -3.160560 | -48.100000 | 216        | 250        | 9         | 21        |
| Tucuruí                          | INMET       | INMET    | -3.76667  | -49.66667  | 284        | 349        | 70        | 53        |
| Tucuruí                          | DEPv        | DEPv     | -3.776667 | -49.719170 | 282        | 376        | 66        | 92        |
| Goianesia                        | ANA         | CPRM     | -3.828611 | -49.099170 | 299        | 245        | 22        | 110       |
| <b>MÉDIA TRIMESTRAL - ÁREA 2</b> |             |          |           |            | <b>301</b> | <b>377</b> | <b>61</b> | <b>58</b> |

**Tabela 4** Relação das estações meteorológicas e suas respectivas localizações geográficas e médias trimestrais de chuva na Área 3.

| NOME DA ESTAÇÃO                  | RESPONSÁVEL | OPERADOR | LATITUDE  | LONGITUDE  | DJF        | MAM        | JJA       | SON       |
|----------------------------------|-------------|----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Novo Repartimento                | ANA         | CPRM     | -4.24111  | -49.93583  | 326        | 433        | 65        | 51        |
| Km zero Pa-70                    | ANA         | CPRM     | -4.29444  | -47.55806  | 205        | 271        | 2         | 29        |
| Nova Jacunda                     | ANA         | CPRM     | -4.463056 | -49.11778  | 356        | 242        | 57        | 108       |
| Nova Ipixuna                     | ANA         | CPRM     | -4.911667 | -49.06972  | 184        | 256        | 52        | 77        |
| Itupiranga                       | ANA         | CPRM     | -5.128889 | -49.32417  | 263        | 184        | 16        | 80        |
| Maraba                           | DEPv        | DEPv     | -5.35     | -49.15     | 255        | 212        | 7         | 89        |
| Esperantina                      | ANA         | CPRM     | -5.3625   | -48.53778  | 191        | 200        | 4         | 57        |
| Marabá(INMET)                    | INMET       | INMET    | -5.366667 | -49.133333 | 269        | 234        | 12        | 67        |
| Imperatriz                       | DEPv        | DEPv     | -5.530278 | -47.45778  | 161        | 195        | 4         | 61        |
| Imperatriz                       | INMET       | INMET    | -5.533333 | -47.483333 | 251        | 243        | 4         | 36        |
| Serra dos Carajas                | DEPv        | DEPv     | -5.58333  | -50.4      | 192        | 205        | 6         | 73        |
| Araguatins                       | ANA         | CPRM     | -5.648333 | -48.20778  | 283        | 273        | 4         | 63        |
| Km60                             | ANA         | CPRM     | -5.803056 | -49.18333  | 324        | 307        | 17        | 83        |
| Ananas                           | ANA         | CPRM     | -6.36389  | -48.07139  | 245        | 225        | 3         | 69        |
| Xinguara                         | ANA         | CPRM     | -7.09861  | -49.9597   | 274        | 270        | 11        | 140       |
| <b>MÉDIA TRIMESTRAL - ÁREA 3</b> |             |          |           |            | <b>252</b> | <b>250</b> | <b>17</b> | <b>72</b> |

#### 3.1.2.4. Tipos de Superfície.

Para classificação dos tipos de superfície predominantes em cada subárea, foram utilizados dados do Projeto de Sistematização das Informações sobre Recursos Naturais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE, que tinha como tema a Vegetação. Esses dados foram originalmente levantados com nível de detalhe compatível com a escala de 1:250.000, apresentados no recorte extraído dos limites da Amazônia Legal, datados em julho 2008-Versão I. Projeção: Albers - Datum SAD 69, Longitude de origem: -59:00:00 Latitude de origem: 5:00:00.

##### 3.1.2.4.1. Distribuição e classificação espacial dos tipos de superfície.

Foi feita uma análise superficial dos tipos de superfície do solo, em cada uma das áreas de estudo. Para isso, foram utilizados dados da classificação da vegetação do Instituto Brasileiro de Geografia - IBGE. Esses dados foram analisados em um Sistema de Informação Geográfica –Arc View 3.2. Devido ao fato do arquivo de dados da vegetação estar em formato de vetor, primeiramente ele foi transformado em formato de grade ou matriz, onde já se definiu o tamanho da célula de 1 km<sup>2</sup>, facilitando assim, o cálculo da área de ocupação da cobertura vegetal, em cada área de estudo.

Em seguida, foi feita uma classificação da vegetação bem detalhada das três áreas, obtendo-se varias subdivisões de florestas, campos e pastos, mangues, savanas, corpo d'água e áreas urbanizadas, totalizando 19 tipos de áreas. Essa distribuição foi calculada no Arc View e após obter os valores de cada área foi feito um histograma no EXCEL. Como as florestas apresentaram varias subdivisões, foi feito uma nova reclassificação, criando-se assim cinco grupos; (a) em um grupo foram agrupadas todos os tipos de florestas, (b) outro com áreas alagadas, várzeas e igapós; (c) outro grupo com rios e toda massa d'água, (d) outro grupo com áreas urbanas; (e) um grupo com áreas de agricultura e pastagens, diminuindo assim, o número de classes. Utilizando-se o comando “**Reclassify**” do menu “**Analysis**” o grid resultante dessa reclassificação apresentou 05 classes de cobertura vegetal, ficando apenas as classes de florestas, pastagens, várzeas, água e área urbana. Observa-se na Figura 3.5 que a Área 1 é bem distribuída, sendo que a sua maior ocupação é de áreas alagadas com 54% (várzeas( 25%) e rios(29%)), parte dessa área encontra-se a Ilha do Marajó. Na Área 2, 60% de sua área é ocupada por florestas. Área 3 encontra-se localizada no sudeste do Pará, onde 62% de sua superfície do solo é coberta por áreas agrícola ou pastagens. Essa reclassificação foi feita para cada área individualmente, conforme Figura 8.

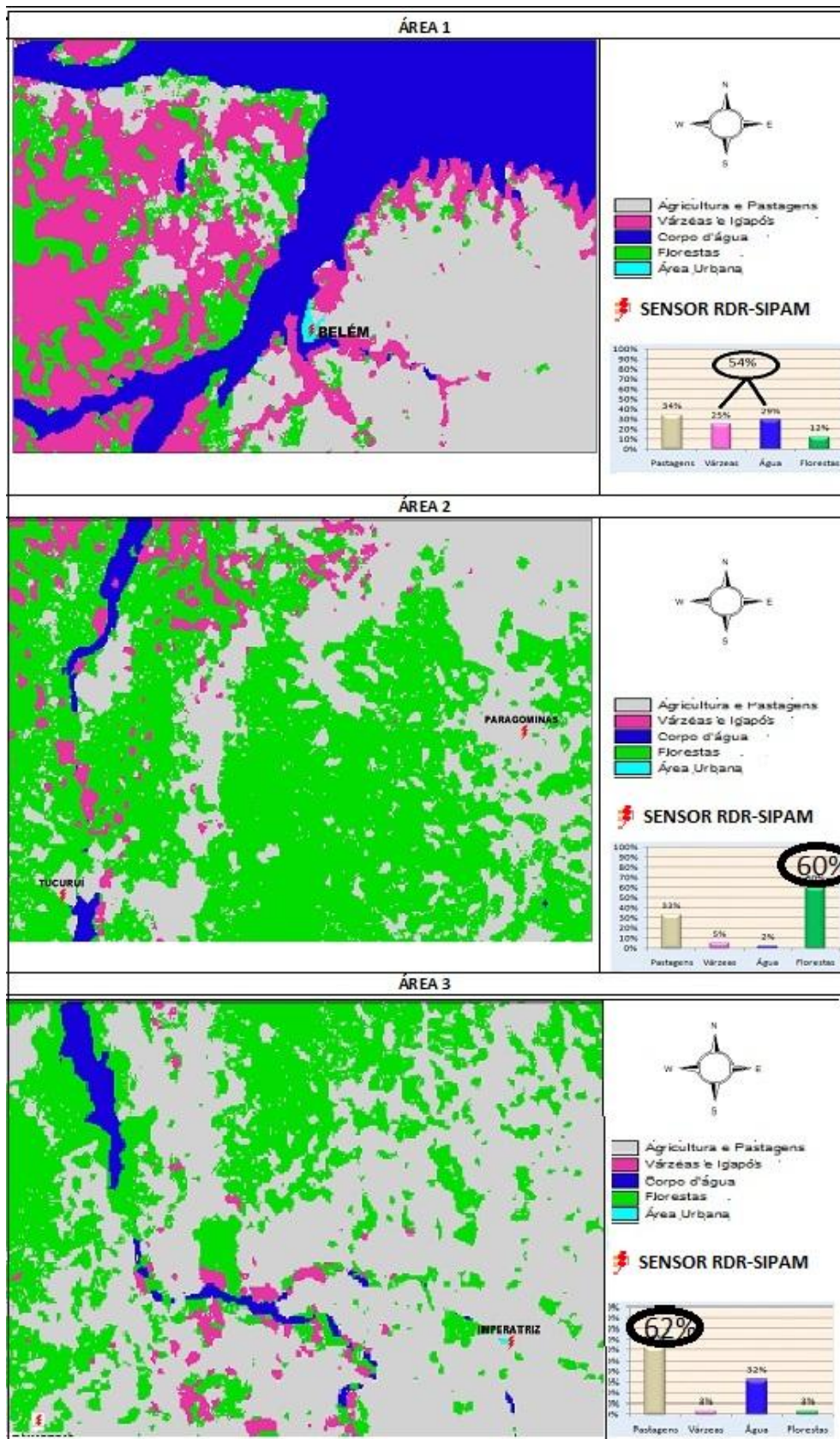


Figura 8 Reclassificação dos dados interpolados da cobertura vegetal, para redução do número de classes da Área 1, 2 e 3, ficando apenas as classes: Agricultura e Pastagens, Áreas Urbanizadas, Corpos D'água, Florestas e Várzeas, Igapós e Mangues. Ao lado direito encontra-se o histograma com percentuais de ocupação dos tipos de superfície encontrados em cada subárea.



Após o cálculo da densidade de raios, interpolação de chuva e reclassificação da cobertura vegetal, no Arc View 3.2, foram criados mapas temáticos da densidade de raios e as isoietas (isolinhas da chuva), sobre o mapa de cobertura vegetal com o objetivo de analisar a relação entre os raios, chuva e tipos de superfície, em cada área estudada.

### 3.1.3. Resultados e Discussões

#### 3.1.3.1. Média mensal da precipitação

Na Figura 9 estão apresentadas as médias mensais pluviométricas no período de dez/2006 a dez/2008. Observa-se que março é o mês que apresenta maior índice pluviométrico das três Áreas (1,2,3) em estudo, com 452, 473 e 374 mm/mês, respectivamente. O mês menos chuvoso foi novembro, na Área 1, setembro, na Área 2 e julho, na Área 3, com 35 mm, 38 mm e 6 mm/mês, respectivamente.

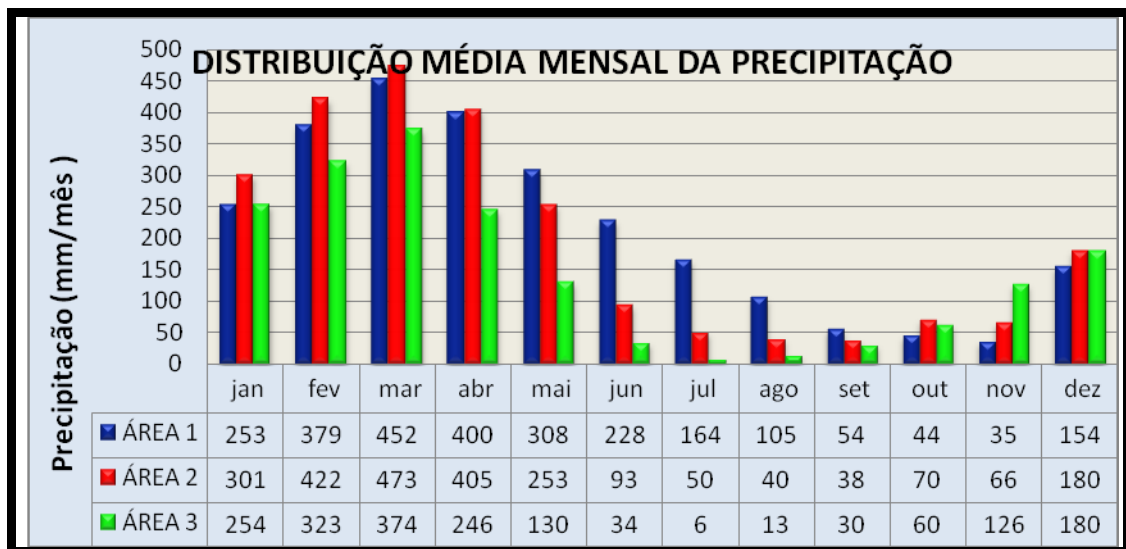
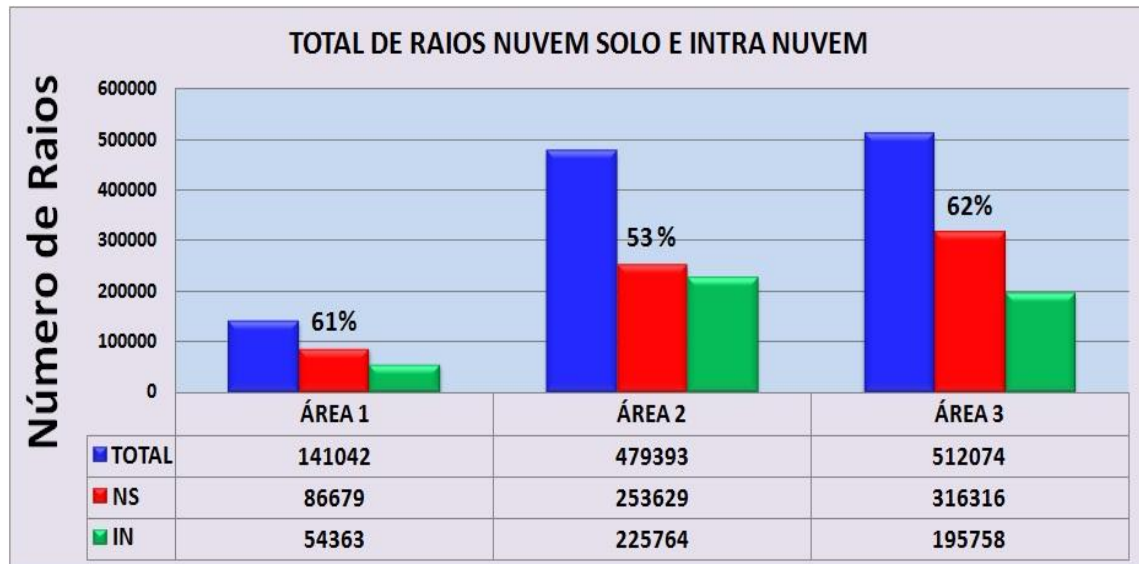


Figura 9 Média mensal da precipitação pluviométricas, nas Áreas 1,2 e 3. Período de dez/2006 a dez/2008.

#### 3.1.3.2. Número total de raios detectados nas Áreas 1,2 e 3

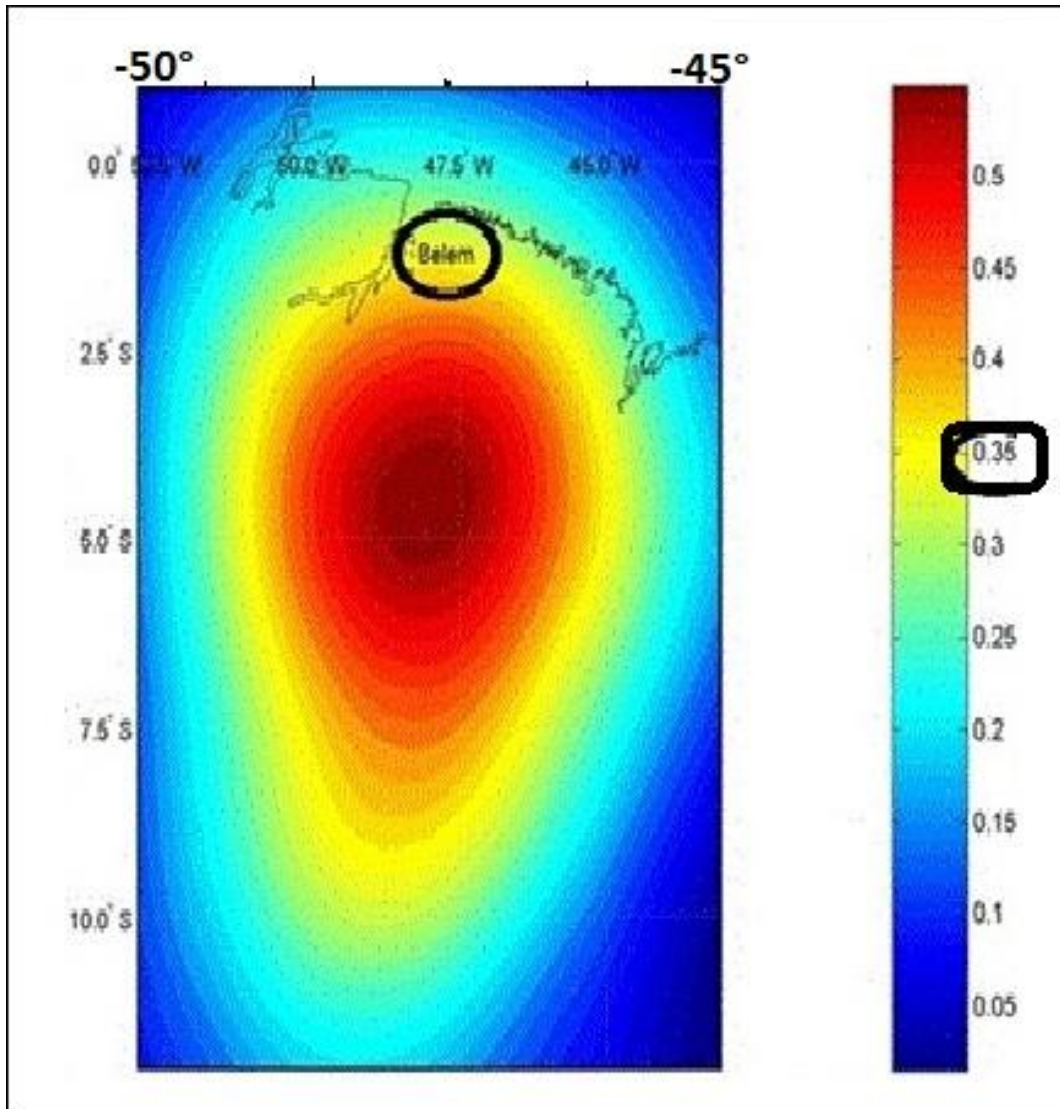
Nesse trabalho foram analisados um total de 1.132.509 raios detectados nas Áreas 1,2 e 3, respectivamente 141.042, 479.393 e 512.074 raios. Deste total, 58% são raios nuvem-solo, assim distribuídos: Área 1, 61% dos raios detectados são nuvem-solo; Área 2,

53% e Área 3, com 62%, conforme é mostrado na Figura 10. Quando analisamos o número de raios NS detectados em cada área, observa-se que a Área 1, obteve-se o menor número de raios detectados e a Área 3, o maior número, dentro do período estudado dez/2006 a dez/2008.



**Figura 10** Total dos raios nuvem-nuvem e nuvem-solo, detectados nas áreas de estudo 1,2 e 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008.

Essa diferença entre a Área 1 e as demais áreas, principalmente em relação à Área 3, pode ser atribuída a baixa eficiência de detecção na RDR-SIPAM na Área 1. Conforme modelo de distribuição geográfica de Souza (2009) a eficiência máxima da rede de sensores do RDR-SIPAM fica em torno de 57% de detecção e esse máximo está localizado entre as latitudes de 3°S a 5,5°S e longitudes de 47°S a 48,5°S. A Área 1, localiza-se entre 0°S e 2°S, ficando apenas, com aproximadamente 35% dessa eficiência, isso foi mostrado na Figura 11.

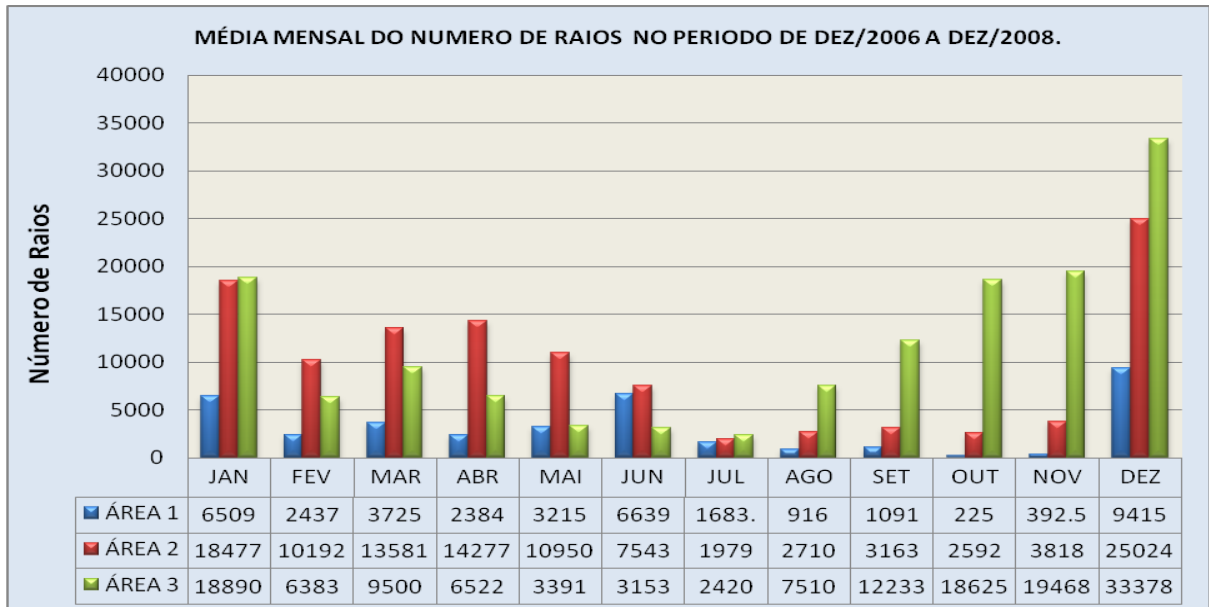


**Figura 11 Modelo de Distribuição Geográfica - Caso ideal com uma probabilidade máxima de detecção aproximadamente 57%, localizada entre as latitude 3° S a 5,5° S e longitude 47° a 48,5°W.**

Na Figura 12 foi mostrada a distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo, detectados nas áreas de estudo 1,2 e 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008. Observa-se que nos meses de fevereiro a junho a Área 2, que é coberta com 60% de floresta, teve o maior número de raios detectados, porém no período de julho a janeiro, a Área 3, que tem sua superfície coberta com 62% de área agrícola e pastagens, supera as demais áreas em número de raios detectados nesse período, tendo o máximo de raios no mês de dezembro com 33378 raios/mês. Isso demonstra que efeitos sazonais de posicionamento e deslocamento da ZCIT e ZCAS podem ter contribuído mais decisivamente para a produção de raios na seqüência de tempo observada, do que a própria diferença de cobertura vegetal.

A Área 1, com exceção do mês de junho, manteve o menor número de raios detectados, atingindo o seu mínimo no mês de outubro, com 225 raios/mês. Esse fato pode

estar ligado à superfície dessa área ter grande proporção de água, e como é sabida a densidade de raios sobre a água é menor do que sobre o continente.



**Figura 12 Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo detectados nas áreas de estudo 1, 2 e 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008.**

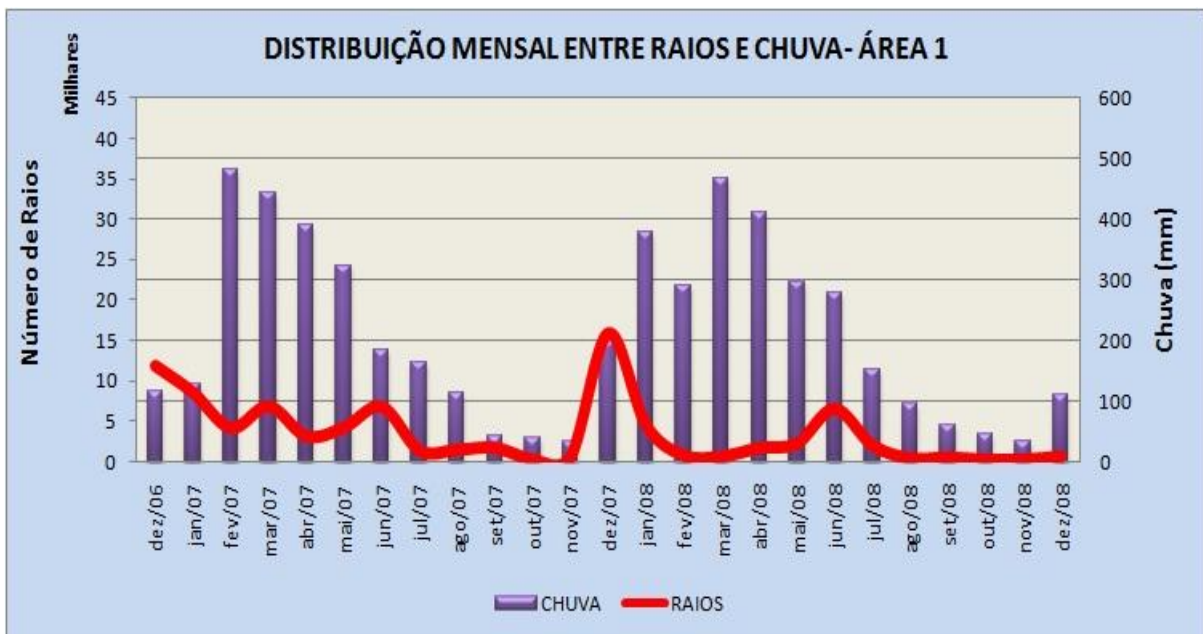
### 3.1.3.3. Relação entre raios e chuvas

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão apresentadas a relação entre a média mensal da chuva e o número mensal de eventos de raios detectados pela RDR-SIPAM. Esses dados são do período de dez/2006 a dez/2008 na Área1, Área 2 e Área 3. Pode-se observar que os meses com maior média mensal pluviométrica foram fevereiro/2007, na Área 1 e março/2008 nas Áreas 2 e 3, e os meses com menores valores pluviométricos foram novembro/2007 e novembro/2008, na Área 1, setembro/2007, na Área 2 e julho/2008, na Área 3. Enquanto que o maior número de raios NS detectados na Área 1, ocorreram no mês de dezembro/2007, na Área 2, em dezembro/2006 e na Área 3, dez/2008 e o meses com menor número de eventos foram novembro/2008, na Área 1, outubro/2007, nas Áreas 2 e 3.

A distribuição da precipitação mensal na Amazônia mostra de forma mais clara os máximos de precipitação ligados com o posicionamento da ZCIT. Gandu (2004) sugeriu que, embora as características sobre o leste da Amazônia sejam determinadas pela circulação de grande escala, a proximidade com o oceano e grandes rios, cria áreas

específicas com variabilidades espaciais e temporais de precipitação. A circulação de mesoescala associada com a brisa marítima é um exemplo de um sistema bastante atuante, uma vez que a convecção estruturada pelas linhas de instabilidade costeiras, bem como sua propagação, é responsável por uma parte significativa da precipitação nessa região (COHEN et al,1995).

A relação entre raios e precipitação acumuladas não é direta em nenhuma das três áreas. Embora a frequência de ocorrência de raios apresente tendência geral de ser maior nas estações com maior precipitação, existem defasagens de dois a três meses entre os máximos e mínimos dessas duas variáveis.

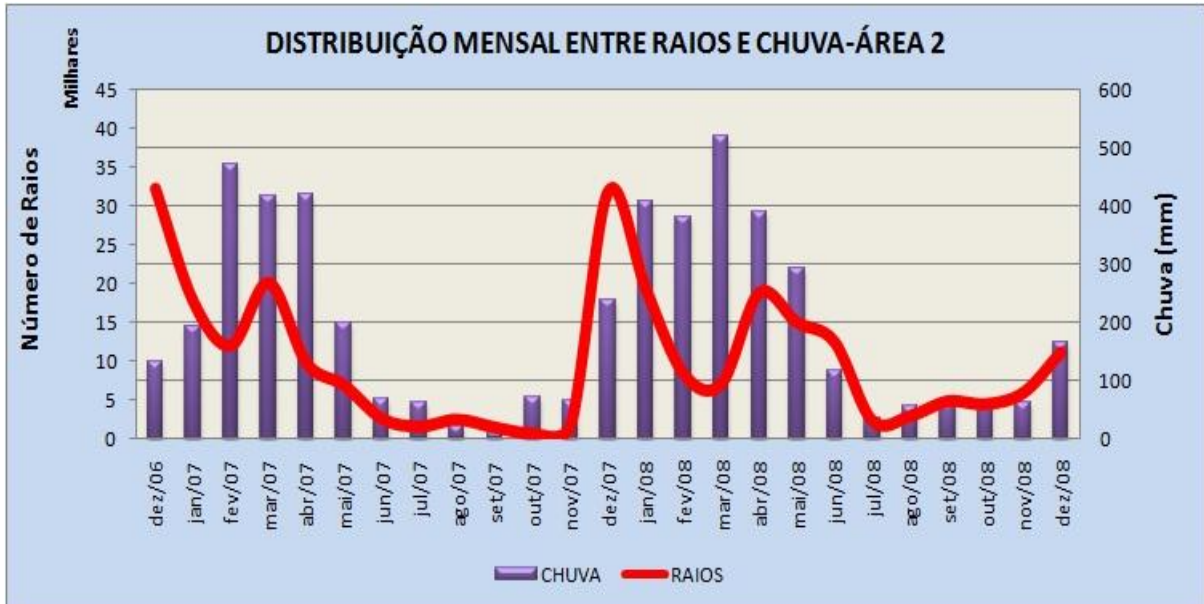


**Figura 13** Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a média mensal de precipitação na Área 1, durante o período de dez/2006 a dez/2008.

Os máximos de ocorrências de raios nas três áreas foram observados em dezembro de 2006 e 2007, enquanto que os máximos de precipitação ocorreram em fevereiro ou março dos mesmos anos. Na realidade, observou-se que nesses dois meses de maior precipitação o número de eventos de raios NS decaiu proporcionalmente, embora fique num patamar superior à frequência de ocorrência de raios no período seco.

Segundo o Boletim Climanálise de dezembro/2007, o aumento dos raios nesse mês deve-se ao fato da interação dos sistemas de grande escala como Alta da Bolívia que encontrava-se bastante intensificada, além da convecção tropical associada à penetração dos sistemas frontais na região sudeste do Brasil, que se organizam e formam uma

nebulosidade no sentido NW-SE, que alguns autores como Fisch et al (1996) chamam de ZCAS, que contribui para o aumento das chuvas na região nessa época do ano.



**Figura 14** Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a media mensal de precipitação na Área 2, durante o período de dez/2006 a dez/2008.

Na Área 3 observou-se um grande incremento de raios NS a partir de agosto de 2008, com máximo antecedendo em dois meses ao máximo da precipitação. Tudo indica que nessas áreas, os meses com maior atividade de raios ocorrem com cerca de dois meses de antecedência da transição entre o período seco e o chuvoso. Parece que mais raios são produzidos nessas áreas no período de aproximação da borda frontal da ZCIT.

Quando a ZCIT se instala sobre a área, as nuvens altas que produzem muita precipitação crescem mais vagarosamente e com baixos cisalhamentos verticais dos ventos, produzem proporcionalmente menos eletrificação nas nuvens cumulonimbos e conseqüentemente, menos raios que no período de transição entre a estação seca e a chuvosa.

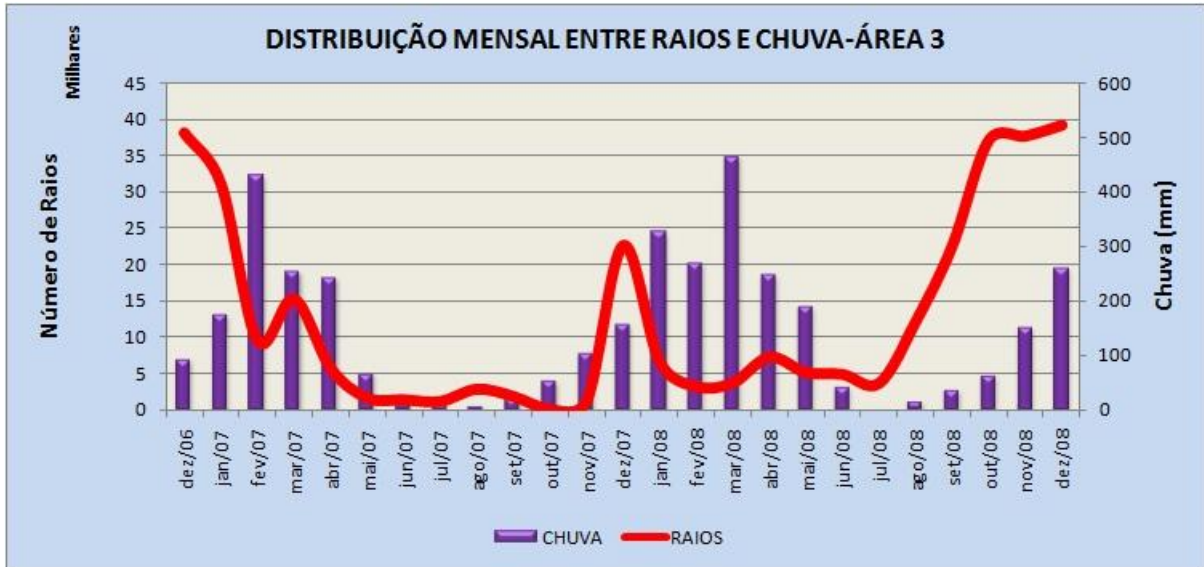


Figura 15 Distribuição da média mensal dos raios nuvem-solo e a media mensal de precipitação na Área 3, durante o período de dez/2006 a dez/2008.

#### 3.1.3.4. Distribuição trimestral entre raios e chuvas

Verifica-se que a relação entre raios e chuva não é simples nem direta. Parece haver melhor correspondência às vezes nos meses menos chuvosos, conforme é mostrado na Figura 16, onde foi feita uma media aritmética dos raios e da chuva, durante o período seco e chuvoso. Interessante observar que as curvas de raios e chuvas seguem uma mesma tendência durante o período seco, em todas as áreas, enquanto que no período chuvoso não se observa essa tendência. Também se observa a diferença da variabilidade dos raios e a chuva nas Áreas 1 e 3, no período seco. Na Área 1, ambos decrescem de junho a agosto, enquanto que na Área 3, os dois crescem de agosto a novembro. No período menos chuvoso nos meses de dezembro a fevereiro a frequência de ocorrência de raios diverge da chuva, os raios diminuem, enquanto que a chuva aumenta atingindo seu máximo em março, mas quando chega os meses de março a maio a tendência de ambos é diminuir. Isto é observado nas três áreas em estudo.

Aparentemente, pelas figuras do período chuvoso, as ocorrências de raios chegam ao máximo em dezembro, enquanto que o máximo de precipitação ocorre em março, havendo uma relação inversa de raios e chuvas entre dezembro e fevereiro.

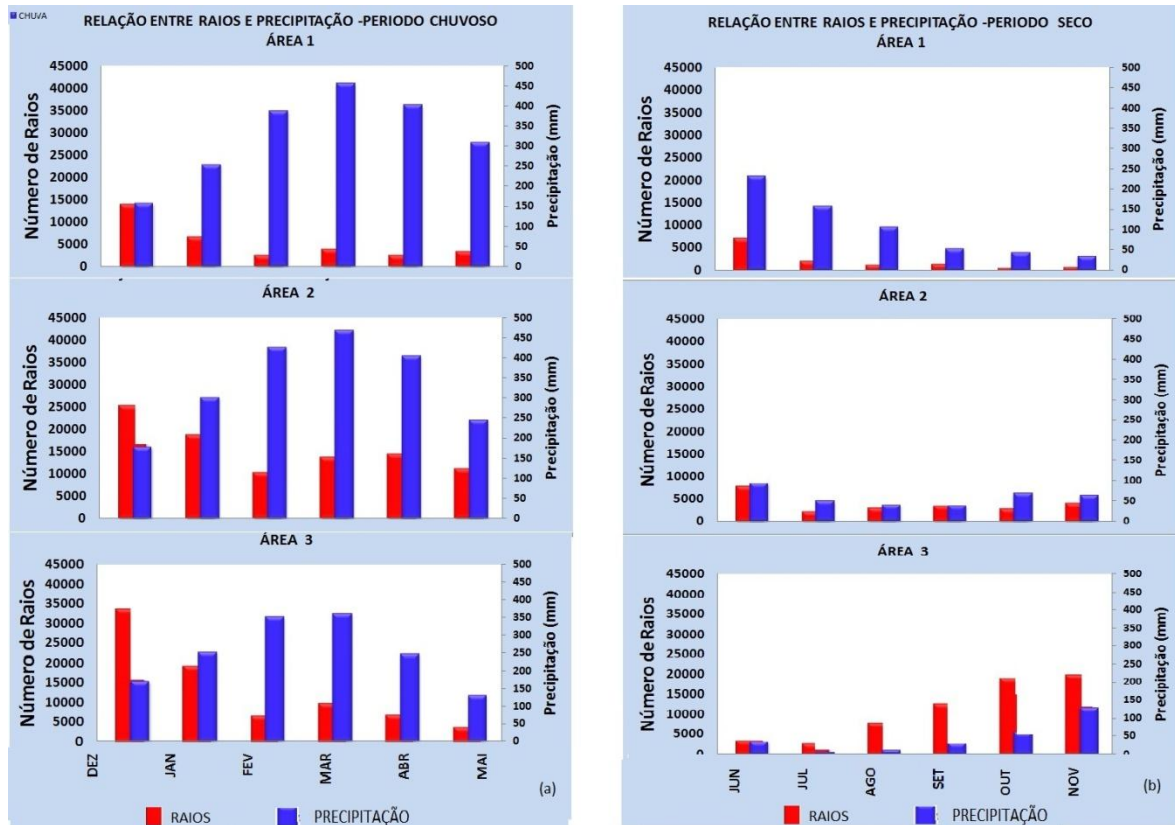


Figura 16 Distribuições mensais das médias de raios e a de chuva no período chuvoso (a) e seco (b), nas Áreas 1,2 e 3

Na Tabela 5 é mostrada a relação entre raios e chuvas nas três áreas de estudos. No trimestre DJF, a Área 1 apresentou uma frequência de eventos de raios maior em 2007, em todos os trimestres, com exceção do trimestre DJF, que os eventos de raios em 2007 excederam os de 2008. Na Área 3, o período chuvoso em 2007, o número de raios, 2007 excedeu o número de raios em 2008, mas no período seco ou menos chuvoso, o número de raios em 2008, foi muito maior do que em 2007.

Quando observamos a média pluviométrica, a Área 1 apresentou em 2008, valores superiores à 2007, com exceção o trimestre de SON. Nas Áreas 2 e 3, em todos os trimestres a média pluviométrica de 2008 excederam a média de 2007. É interessante verificar o aumento considerável de raios e chuva na Área 3, em 2008, durante o trimestre SON, com 85 mm e 32520 raios, sendo que no trimestre anterior (JJA) teve apenas 21 mm de chuva e 6908 raios.

A Região Amazônica, durante o verão austral (DJF) possui uma marcha anual de precipitação bem definida e influenciada principalmente pelo deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Inter Tropical – ZCIT, que representa o início da estação chuvosa (RAO E HADA, 1990). Durante esse trimestre a Amazônia Oriental apresenta altos índices pluviométricos. Na Figura 3.15 é mostrada a distribuição espacial da precipitação média



mensal observada nas estações meteorológicas em cada área de estudo e densidade de raios detectados pela RDR-SIPAM no trimestre DJF. Pode-se observar que a Área 1, apresentou pontos com máxima densidade de raios de 22 raios/ km<sup>2</sup> e precipitação variando de 190 mm a 420 mm. Os máximos de precipitação coincidem em alguns pontos com a densidade máxima de raios. Nota-se também que nesse trimestre a maior concentração de raios se encontra distribuída no continente, enquanto que os maiores volumes de chuva, encontram-se sobre a Ilha do Marajó e Belém.

**Tabela 5 Distribuição sazonal da média trimestral dos números de raios nuvem-solo e da chuva (mm) nas Áreas 1,2 e 3 , durante o período de dez/2006 a dez/2008.**

|        |       | DJF   |            | MAM   |            | JJA   |            | SON   |            |
|--------|-------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
|        |       | RAIOS | CHUVA (mm) | RAIOS | CHUVA (mm) | RAIOS | CHUVA (mm) | RAIOS | CHUVA (mm) |
| ÁREA 1 | 2007  | 8136  | 242        | 4720  | 385        | 4508  | 154        | 832   | 52         |
|        | 2008  | 7040  | 290        | 1497  | 392        | 2974  | 175        | 307   | 48         |
|        | MÉDIA | 7588  | 266        | 3109  | 389        | 3741  | 165        | 570   | 50         |
| ÁREA 2 | 2007  | 20618 | 266        | 12254 | 345        | 2240  | 39         | 1300  | 50         |
|        | 2008  | 19810 | 342        | 13618 | 401        | 5915  | 70         | 5081  | 63         |
|        | MÉDIA | 20214 | 304        | 12936 | 373        | 4078  | 55         | 3191  | 57         |
| ÁREA 3 | 2007  | 26307 | 234        | 7560  | 189        | 1813  | 15         | 1030  | 60         |
|        | 2008  | 10830 | 252        | 5381  | 302        | 6908  | 21         | 32520 | 85         |
|        | MÉDIA | 18569 | 243        | 6471  | 246        | 4361  | 18         | 16775 | 73         |

#### 3.1.3.4.1. Distribuição espacial dos raios e chuvas sobre os tipos de superfície durante o trimestre dezembro-janeiro-fevereiro (DJF).

Neste trimestre a Área 1, foi a área que apresentou maior densidade de raios (22 raios/km<sup>2</sup>) e maior índice pluviométrico, com uma média trimestral de 423 mm de chuva em Belém. A Área 2 apresentou a maior média trimestral de raios com aproximadamente , 20214 raios, e pontos de máxima densidade de 17 raios/km<sup>2</sup>. Quanto a precipitação, a Área 2 apresentou máximo índice pluviométrico de 408 mm em Oeiras do Pará, conforme pode ser observado na Tabela.3. A Área 3, apresentou 18569 raios detectados no trimestre DJF,

com densidade máxima de 17 raios/km<sup>2</sup> e precipitação variando de 160mm a 360 mm, observa-se que a média de chuva nesse trimestre foi inferior as outras duas áreas, isso é visto na Figura 17.

Os altos índices pluviométricos e a grande densidade de raios ocorridas nesse trimestre nas três áreas podem ter sido influenciados pela ZCIT e a Alta da Bolívia (AB) que durante o verão austral favorecem a formação de um cavado em altos níveis da troposfera sobre o NEB que pode fechar-se, constituindo um vórtice ciclônico em altos níveis (VCAN) com circulação direta, ou seja, ar frio e subsidente no centro, e quente e ascendente nas bordas. Este sistema, de acordo com o seu posicionamento, pode provocar chuvas no Nordeste do Pará, quando desloca-se de Leste para Oeste, visto que a borda do vórtice adquire grande vorticidade, causando instabilidade em baixos níveis (GAN e KOUSKY, 1986).

Durante os meses de verão (DJF), o Sul do estado sofre a influência das incursões de sistemas frontais ou mesmo de ZCAS, provocando elevados níveis pluviométricos, especialmente, no Sudoeste em razão da orientação Noroeste/Sudeste da ZCAS e, também, pela convecção organizada pela Alta da Bolívia (AB), que surge em decorrência do forte aquecimento no altiplano boliviano (AMBRIZZI,COELHO;DRUMOND;1999 FIGUEROA; NOBRE, 1990; SOUSA, 2004).

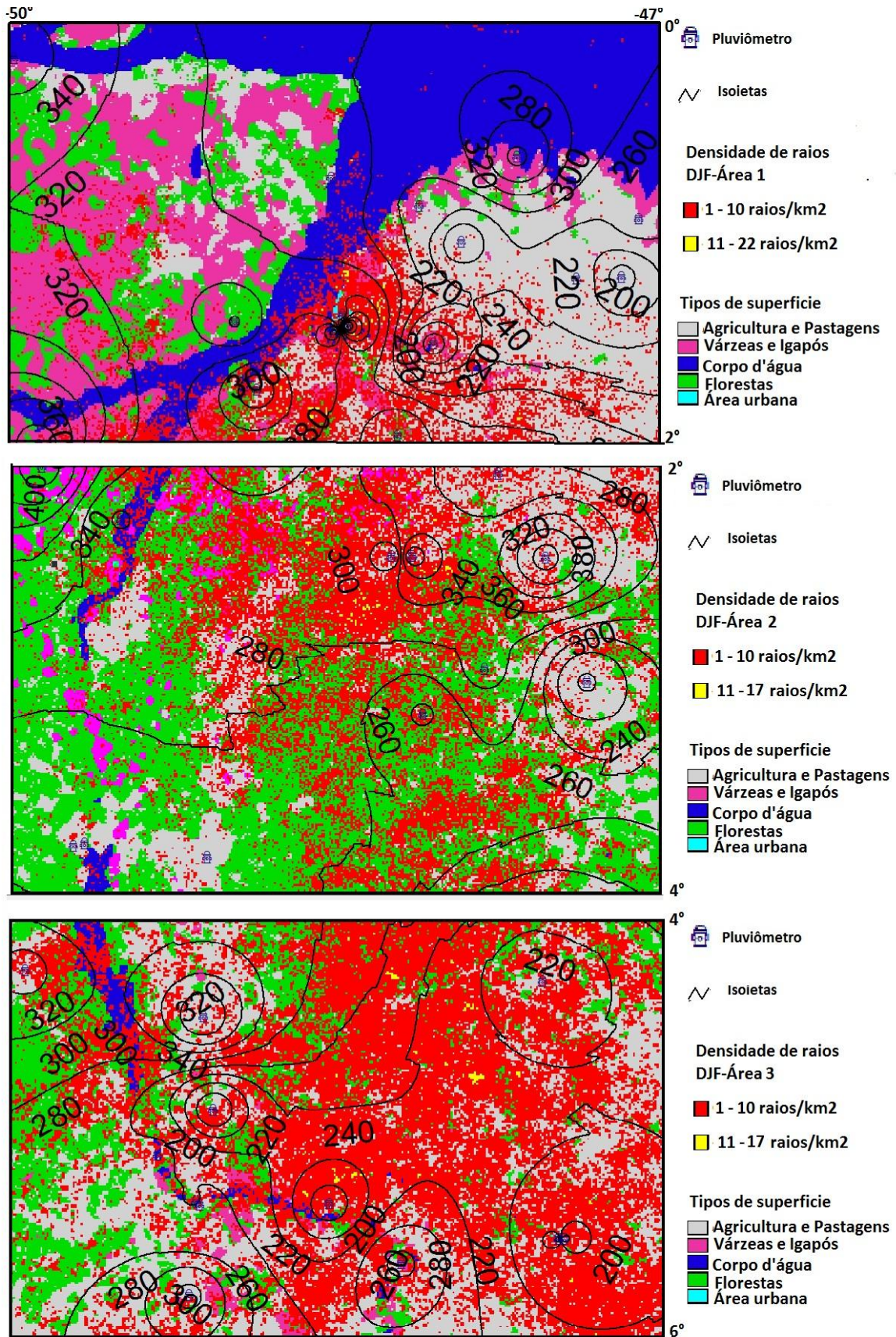


Figura 17 Distribuição espacial da média trimestral de DJF, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2006, 2007 e 2008, nas Áreas 1, 2 e 3.

*3.1.3.4.2. Distribuição espacial dos raios e chuvas sobre os tipos de superfície durante o trimestre março-abril-maio (MAM).*

Na Figura 18 é mostrada a distribuição espacial dos raios e da chuva no trimestre MAM. Neste trimestre, a Área 1 apresentou o menor número de raios em relação as outras duas áreas, com densidade máxima de apenas 7 raios/km<sup>2</sup>, mas teve o maior volume de água durante esse trimestre, onde algumas localidades tiveram suas médias de precipitação trimestrais acima de 400 mm, com o seu máximo de precipitação em Primavera com 547 mm e o mínimo em Bujaru com 239 mm

Neste trimestre a Área 2 apresentou o maior número de raios no trimestre MAM com pontos de densidade máxima de 28 raios/km<sup>2</sup> e valores pluviométricos variando de 240 mm em Goianésia e 550 mm em Oeiras do Pará.

A Área 3, foi a menos chuvosa nesse trimestre com uma média variando de 180 mm - 430 mm de chuva e uma densidade máxima de raios de 14 raios/km<sup>2</sup>, localizados próximos as cidades de Ulianópolis e Rondon do Pará.

Em março de 2007 a banda de nebulosidade associada à ZCIT oscilou preferencialmente ao norte da sua posição climatológica, porém manteve a sua inclinação favorável às chuvas sobre o norte do Brasil. Em abril de 2008, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) apresentou valores até 3°C abaixo da média adjacente à costa do Equador e norte do Peru, onde os alísios também estiveram ligeiramente mais intensos. Uma extensa área com anomalias negativas de TSM nas águas sub-superficiais foi observada no Pacífico Equatorial Leste. Esta configuração foi indicativa do desenvolvimento do fenômeno La Niña (BOLETIM CLIMANÁLISE, abril/2008).

Durante o trimestre MAM houve uma maior atuação da ZCIT e as LI's que se deslocaram para o interior da Amazônia ocorrendo com maior frequência entre os meses de abril à agosto (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE,1989). Esses fenômenos meteorológicos de grande e meso escala, ocorridos durante esse trimestre foram os principais causadores do grande volume de precipitação e raios, principalmente na Área 2, coberta na sua maior parte por floresta, onde teve o maior número de raios detectados neste trimestre.

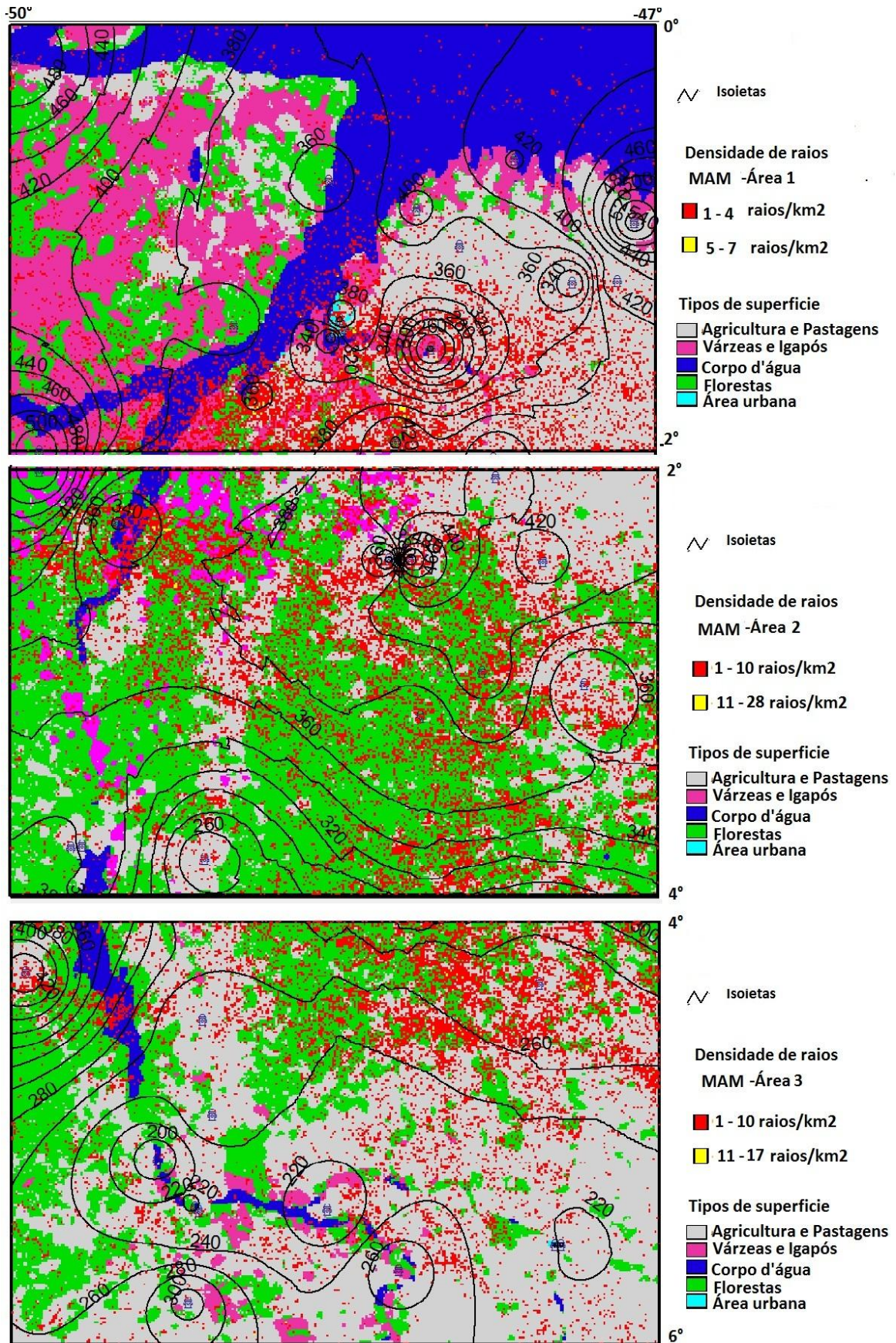


Figura 18 Distribuição espacial da média trimestral de MAM, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.

#### *3.1.3.4.3 Distribuição espacial dos raios e chuvas sobre os tipos de superfície durante o trimestre junho-julho-agosto (JJA)*

Neste período do ano a ZCIT esteve localizada mais ao norte de sua posição climatológica. É provável que a precipitação neste trimestre tenha sido modelada principalmente pela atuação das ondas de leste (MOTA,1997) e LΓ's que são predominantes neste trimestre (COHEN; SILVA DIAS; NOBRE,1989).

No trimestre JJA sobre a Área 1, observou-se que algumas localidades tiveram suas médias trimestrais acima de 200 mm, conforme Tabela 2, sendo que o máximo de precipitação ocorreu no município de Chaves, na Ilha do Marajó, com 274 mm e o mínimo em Bujaru com a média trimestral de 77 mm. Quanto a densidade de raios, pode-se observar que esse trimestre a Área1 teve a maior densidade de raios com 18 raios/km<sup>2</sup>. sendo que nesse trimestre o mais importante não foi o número de raios detectados nessa área, e sim, a distribuição desses raios, contornando a Ilha do Marajó, conforme visto na Figura 19, .possivelmente associadas as linhas de instabilidade que se formaram devido às brisa marítima e fluvial e ao aquecimento local.

Na Área 2 observa-se um baixo índice pluviométricos, variando de 9 mm , na Fazenda Planalto e 131 mm, na Fazenda Jauara, conforme visto na Tabela 3. Quanto a densidade de raios, teve seu máximo com 11 raios/km<sup>2</sup>, conforme pode ser observado em alguns pontos da área , Figura 19.

Na Área 3, o trimestre JJA foi o mais seco, apresentando médias trimestrais de precipitação de 2 mm em Km 0-PA-70 e máxima de 65 mm, em Novo Repartimento , porém , é possível visualizar na Figura 19, uma linha de raios com densidade de até 12 raios/km<sup>2</sup>, nas proximidades das cidades de Marabá e Rondon do Pará.

Nesse trimestre a ZCIT apresentou inclinação mais próxima à costa norte do Brasil no período de 16 a 20 de junho de 2007, intensificando a formação de Linhas de instabilidade (LI's) sobre a costa norte da Região Nordeste do Brasil, Linhas de Cumulonimbos na Costa Norte/Nordeste da América do Sul (Boletim Climanálise). No mês de junho a Área 2 apresentou o maior número de raios. Nos meses de julho e agosto, esses máximos de raios passaram a ser na Área 3, provavelmente causadas pelas linhas de instabilidade que estão configurada na Figura 19.

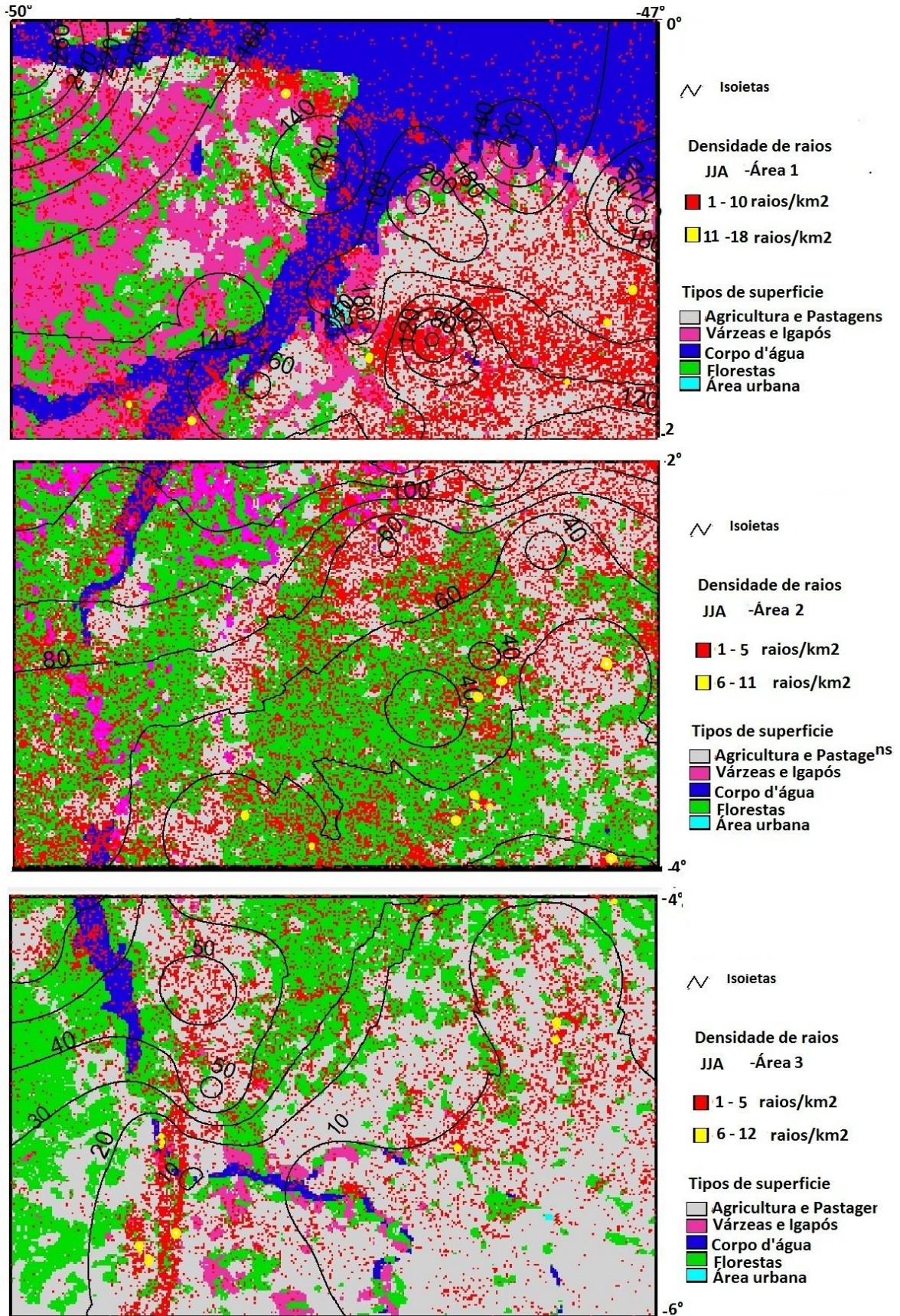


Figura 19 Distribuição espacial da média trimestral de JJA, dos raios e da precipitação, durante os anos de 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.

#### *3.1.3.4.4. Distribuição espacial dos raios e chuvas sobre os tipos de superfície durante o trimestre setembro-outubro-novembro (SON)*

O trimestre SON, foi o trimestre menos chuvoso durante o período em estudo, com exceção da Área 3. As Áreas 1 e 2 além de apresentarem seus menores índices pluviométricos também apresentaram a menor densidade de raios, enquanto que na Área 3, a média da precipitação e dos raios houve um aumento considerável em relação ao trimestre anterior. Pode-se observar um aglomerados de raios nas Áreas 2 e 3, possivelmente causados pela presença de linhas de instabilidade sobre essas áreas.

Na Área 3, houve o maior número de ocorrências de raios, uma média trimestral de 16775 raios, com densidade máxima de 17 raios /km<sup>2</sup>, conforme Figura 20 ,enquanto que o menor número de raios detectados nesse trimestre ocorreu na Área 1, com uma média de apenas 570 raios e densidade máxima de 10 raios/km<sup>2</sup>.

Conforme análises climatologias do Boletim Climanálise, set/2007, no trimestre SON, ocorre o início do período chuvoso no centro-sul da Região Norte, no sul da Amazônia, os índices significativos de precipitação ocorrem a partir da segunda quinzena de outubro. Esses índices relativamente altos estão relacionados com a formação de aglomerados convectivos já associados a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que vieram a provocar uma grande quantidade de raios, principalmente no sudeste do Pará, onde está localizada a Área 3, o reflexo desses aglomerados convectivos podem ser visto com bastante definição na Figura 20.

No mês de setembro de 2007, a chuva esteve acima da média no norte do Amazonas, leste do Acre e sudoeste do Pará, rajadas de ventos fortes e conseqüentemente muitos raios, conforme é mostrado na Área 3 (BOLETIM CLIMANÁLISE, set/2007).A atuação da Alta da Bolívia, ZCAS e a formação de áreas de instabilidade associadas ao calor e umidade no interior do continente, foram os principais sistemas responsáveis pelas chuvas observadas e conseqüentemente pelos raios ocorridos dentro deste trimestre.



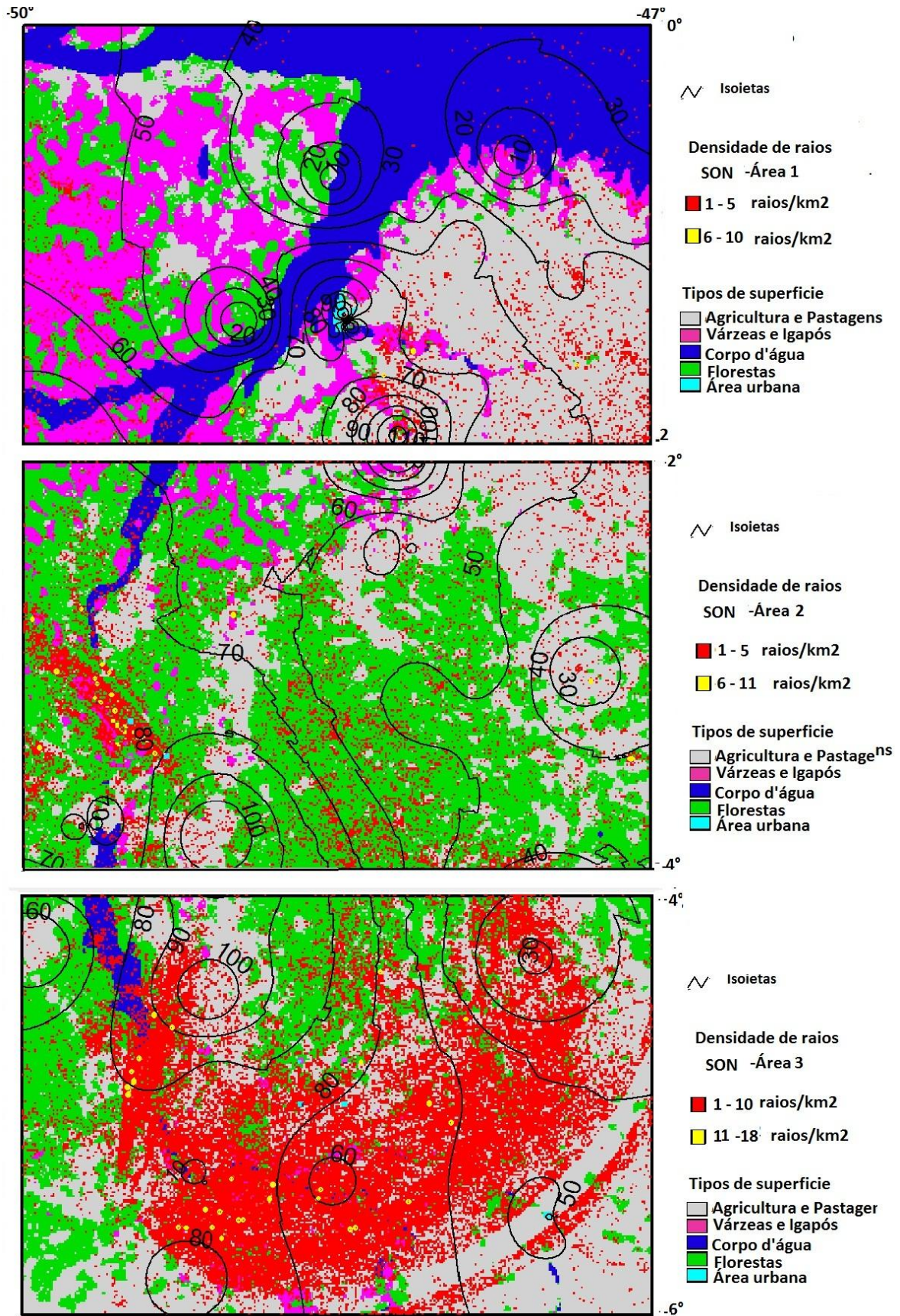


Figura 20 Distribuição espacial da média trimestral de SON, dos raios e da precipitação, o durante os anos de, 2007 e 2008, nas Áreas 1,2 e 3.

## CAPITULO 4

### 4.1. TEMPESTADES SEVERAS – ESTUDO DE CASOS

#### 4.1.1.Introdução

Belém é uma cidade cercada por duas grandes massas de água (a Baía do Guajará, do lado esquerdo; e, do lado direito, o Rio Guamá), entrecortada por igarapés em 14 bacias, onde chove em torno de 2000 a 3000 mm por ano, (FIGUEROA; NOBRE, 1990), principalmente nos meses de dezembro a maio em associação aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala, que originam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (SOUZA et al.2004, SOUZA; ROCHA, 2006).A precipitação é fortemente influenciada pela variabilidade inter-anual da circulação geral da atmosfera. Eventos de El Niño no Pacífico parecem diminuir os totais pluviométricos na Amazônia, enquanto durante anos de La Niña se observa anomalia positiva de precipitação (CUTRIM et al, 2000). Marengo et al. (2001), analisando os dados de precipitação, re-análises do NCEP (National Center for Environmental Prediction), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) e ROL do início e final da estação chuvosa da Bacia Amazônica (5°N – 15°S, 50° - 72.5°W) no período de 1979-1996 mostraram alta correlação entre as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico e Pacífico Tropical com a duração da estação chuvosa. Quando ocorre anomalia positiva de TSM no Pacífico, favorece uma estação chuvosa curta na Amazônia. Entretanto, quando ocorre anomalia positiva no Atlântico, uma estação chuvosa longa na mesma região é favorecida.

A convecção na região amazônica é um importante mecanismo de aquecimento da atmosfera tropical, e suas variações, em termos de intensidade e posição, exercem um papel fundamental na determinação do tempo e clima desta região. Molion (1993) estudou as circulações de macro e mesoescala que atuam na Amazônia e os processos dinâmicos que organizam e promovem a precipitação naquela área. Os mecanismos que provocam

chuva na Amazônia podem ser agrupados em tres tipos: convecção diurna resultante do aquecimento da superfície e condições de larga escala favoráveis; linhas de instabilidade originadas na costa N-NE do litoral do Atlântico; aglomerados convectivos de meso e larga escala, associados com a penetração de sistemas frontais na região S-SE do Brasil e que interagem com a região Amazônica.

As linhas de instabilidade (LI) que se formam na costa atlântica da Amazônia são responsáveis pela formação de chuva próximo à costa dos estados do Pará e Amapá, bem como na Amazônia Central. Estudos preliminares feitos por Cohen et al. (1989) mostraram que estas LI's contribuem com 45% da chuva que cai durante o período chuvoso no nordeste paraense. Estas linhas são caracterizadas por possuir grandes conglomerados de nuvens cumulonimbos e são formadas ao longo da costa devido à circulação de brisa marítima. O desenvolvimento de uma nuvem cumulonimbos está associado à presença de ar quente, úmido e instável e traz consigo as tempestades locais com grande incidência de descargas atmosféricas, trovões, ventos fortes, súbitas variações de temperatura e, ocasionalmente, podem se transformar em tornados (VIANELLO; ALVES, 1991).

Analisar o comportamento elétrico das tempestades severas permite identificar e caracterizar as descargas atmosféricas quanto ao seu tipo, duração, multiplicidade e ramificação. A descarga elétrica de nuvem à terra, ocorrendo em consequência de processos que variam desde a escala macro até a micro escala, é um fenômeno de vários estágios (MASON, 1970), um dos quais é uma avalanche de elétrons, a partir da nuvem em direção à terra, no canal do raio pré-ionizado pelo primeiro líder escalonado, produzindo a descarga principal.

Nuvens de tempestade são nuvens eletrificadas do tipo Cumulonimbos que apresentam trovões e relâmpagos. Nelas ocorrem processos de geração e separação de cargas elétricas que dão origem aos vários tipos de raios.

Uma nuvem de tempestade tipicamente apresenta um diâmetro de 10 a 20 km, uma extensão vertical de 10 a 20 km, podem movimentar-se com velocidade de 40 a 50 km/h e seu tempo de duração é em média de 30 a 90 minutos. Elas apresentam-se como tempestades isoladas ou tempestades locais, ou em grupos, formando tempestades organizadas, conhecidas como sistemas convectivos de mesoescala (SCM), em geral mais severas, com chuvas e ventos mais intensos, além de eventualmente produzirem granizo (PINTO JR.; PINTO, 2000).

O processo de formação das nuvens de tempestade na atmosfera depende basicamente de três fatores: a umidade do ar, o grau de instabilidade vertical da atmosfera, o qual está relacionado à variação de temperatura com a altura, e a existência de mecanismos dinâmicos denominados forçantes. As forçantes são as frentes, as brisas marítimas, os ventos soprando em direção a uma montanha, áreas com convergência horizontal de ventos, as ilhas de calor e as frentes de rajada associadas às tempestades, que atuam de modo a empurrar o ar para cima, fornecendo energia para que ele possa superar a região estável. As tempestades severas geram simultaneamente chuvas e ventos intensos, sempre associados a um grande número de descargas elétricas na atmosfera.

Na faixa subequatorial, em torno de 10°S, são observadas oscilações intrasazonais de relâmpagos seguidos de mudanças dos ventos predominantes (SILVA DIAS, 2001). Durante a estação chuvosa (janeiro e fevereiro), em Rondônia, os períodos dos ventos de oeste em 850 hPa, associados a passagens de sistemas de grande escala a sudeste e centro oeste do Brasil, o número de raios é quatro vezes menor do que nos períodos intermediários de vento de leste e precipitação isolada.

Estudos observacionais mostram que existe relação entre as condições termodinâmicas do meio ambiente e a precipitação, ou seja, a taxa de precipitação varia com a mudança da Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) (ZAWADZKI, 1978; ZHANG e CHOU, 1999). Contudo, outros fatores como cisalhamento do vento e umidade relativa do ar são também importantes para a formação da precipitação, (YAO; DELGÊNIO, 1999), mostrando que a CAPE é condição necessária, mas não suficiente para formação da convecção profunda.

Em virtude da importância dessas tempestades e dos prejuízos que elas podem causar em vários setores, um projeto que envolve as instituições locais operacionais e de investigação (UFPA, SIPAM, CELPA), foi realizado e este trabalho é parte de um esforço conjunto para utilizar as informações meteorológicas, incluindo capacidades de detecção de raios, para desenvolver um sistema de alerta de eventos severos de chuva em Belém. Com base nos dados da RDR-SIPAM citados, foi proposto como objetivo deste estudo relacionar e analisar treze eventos de tempestades severa na Amazônia oriental, mais precisamente em torno de Belém, e analisá-los quanto à situação meteorológica que originou a tempestade e a quantidade de precipitação e número de raios ocorrida no dia do evento.

Para um melhor entendimento sobre os sistemas atmosféricos atuantes na região Amazônica fez-se necessário uma breve descrição de cada um desses sistemas.

### **Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)**

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos mais importantes sistemas meteorológicos que atua nos trópicos. É uma banda de baixa pressão e convergência dos aliseos em baixos níveis que circunda a faixa equatorial do globo terrestre. Ela se localiza no ramo ascendente da célula de Hadley atuando no sentido de transferir calor e umidade dos níveis inferiores da atmosfera das regiões tropicais para os níveis superiores da troposfera e para as médias e altas latitudes. Devido à sua estrutura física é decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e clima nas áreas da região tropical, possuindo enorme influência na precipitação nos trópicos

### **Circulação Geral (CG) e Alta da Bolívia (AB)**

A circulação geral da alta troposfera sobre a América do Sul tem sido bastante estudada nos últimos anos (SANTOS, 1986; CARVALHO, 1989). Esta região possui uma característica muito particular de apresentar o desenvolvimento de um anti-ciclone em altos níveis (200 hPa), durante os meses de verão, associado com a forte convecção da região Amazônica. Este anti-ciclone foi denominado de Alta da Bolívia (AB), pois situa-se sobre a região do altiplano boliviano. Durante a época de inverno, ocorre a desintensificação da AB, com o seu completo desaparecimento. Já foi demonstrado que as observações da radiação de ondas longas (ROL), emitida pelo topo de nuvens e aglomerados convectivos (HOREL et al., 1989, MARENGO e HASTENRATH, 1993) é um estimador conveniente da precipitação tropical (CARVALHO, 1989). Segundo os resultados de Horel et al. (1989), a atividade convectiva sobre a América Tropical possui um deslocamento sazonal ao longo do eixo SE/NW, permanecendo aproximadamente 5 meses em cada hemisfério.

### **El - Niño**

O evento do El Niño/Oscilação Sul (ENOS) de 1982-1983 foi um dos mais intensos e afetou o tempo e clima da América do Sul de várias maneiras (KAYANO e MOURA, 1986). No caso da região Amazônica, este episódio provocou um período extremamente seco (janeiro/fevereiro) durante a estação chuvosa na Amazônica Central. O desvio da

precipitação neste período (valor climatológico menos o valor observado de 82/83), apresentou valores de até - 70% na área de Manaus (AM), com um valor menor na parte mais próxima do Oceano Atlântico ( -20 % em Belém). Este comportamento foi devido ao ramo descendente da célula de Walker deslocar-se para a região sobre a Amazônia, inibindo a formação de atividades convectivas (Nobre e Rennó, 1985; Nobre e Oliveira, 1986).

### **Brisa Fluvial**

A precipitação é um dos elementos climáticos mais importantes a ser analisado na região tropical, pois induz as características e comportamento dos outros, tais como temperatura, umidade relativa, ventos.. A brisa fluvial é um mecanismo físico no qual o ar, devido ao contraste térmico entre água-terra, move-se em direção do continente durante o dia e vice-versa à noite. Imagens de satélites mostram que as nuvens formam-se preferencialmente sobre o continente durante o dia, com movimentos de subsidência na área dos rios. Oliveira e Fitzjarrald (1993) comprovam a existência desta circulação fluvial nos baixos níveis (até 1500-2000 m), possuindo o sentido floresta/rio durante à noite e início da manhã, revertendo o sentido (rio/floresta) durante a tarde e início da noite

### **Penetração de Sistemas Frontais e organização da convecção na Amazônia.**

Oliveira (1986) realizou um estudo climatológico sobre a interação desta convecção tropical e a penetração de sistemas frontais na região SE do Brasil, utilizando de 5 anos (1977/1981) de imagens de satélites meteorológicos. Estes sistemas frontais provocam a organização e formação de uma banda de nuvens orientada no sentido NW/SE (ZCAS), que possuem sua máxima intensidade nos meses de verão, aumentando o regime de precipitação da região (época chuvosa). Este aumento de convecção está relacionado com a intensificação do cavado em altos níveis, que é gerado pela penetração da frente.

### **Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)**

Convencionalmente definida como uma persistente faixa de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, que se estende do sul da Amazônia ao Atlântico Sul-Central por alguns milhares de km, bem caracterizada nos meses de verão. Estudos prévios

mostram o importante papel dessas bandas de nebulosidade na transferência de calor, momento e umidade dos trópicos para as latitudes mais altas.

### **Linhas de Instabilidade (LIs)**

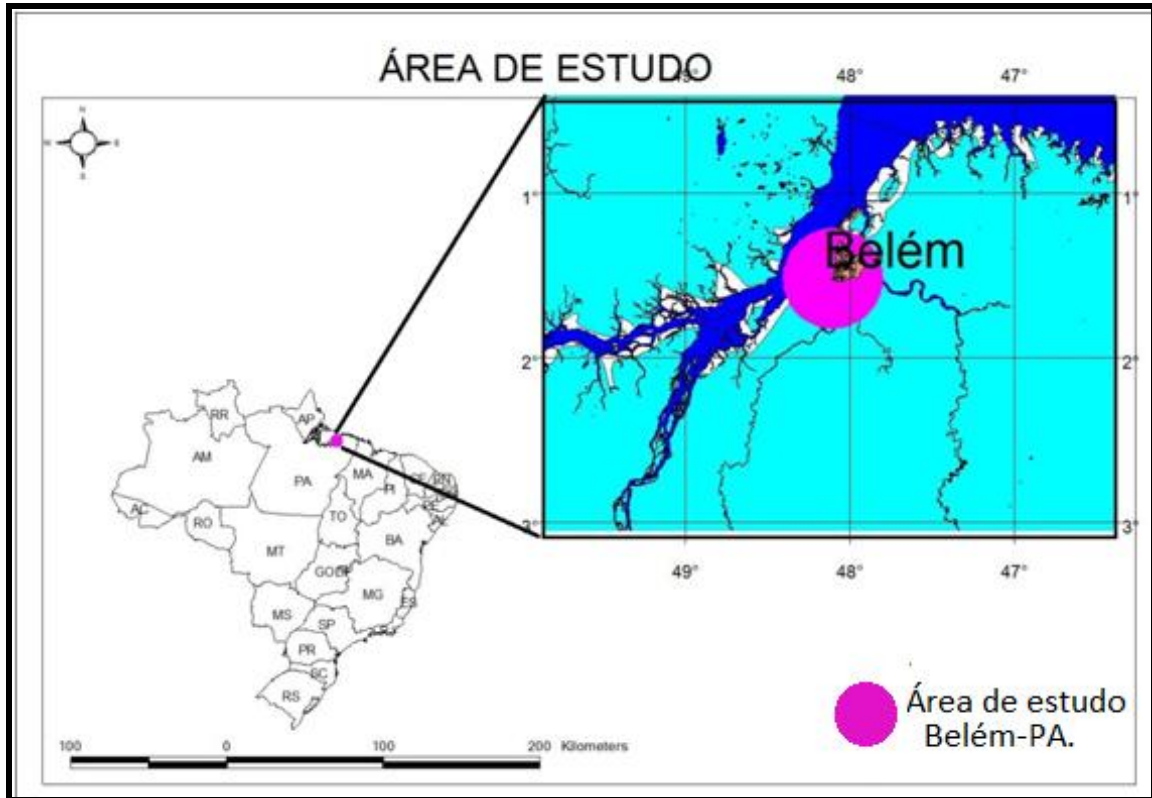
As Linhas de Instabilidade (LIs) que ocorrem na Amazônia são responsáveis pela formação de chuvas próximo à costa litorânea dos estados do Pará e Amapá, bem como de precipitação na Amazônia Central, durante a estação seca. Estudos preliminares (COEHN et al., 1989) mostraram que estas LIs são um dos sistemas atmosféricos atuantes na área leste do Pará e que contribuem com 45 % da chuva que cai durante o período chuvoso. Estas linhas são caracterizadas por possuir grandes conglomerados de nuvens cumulonimbus e são formadas devido à circulação de brisa marítima, podendo propagar-se para o interior do continente.

#### **4.1.2. Materiais e Métodos**

##### **4.1.2.1. Localização da área de estudo**

Para realização e análise dos eventos severos de precipitação e raios, foi selecionada uma área que abrange 30 km, centrados no pluviômetro do 4º Distrito Naval, localizado à latitude de  $-1^{\circ}:47':53''$  e longitude  $-48^{\circ}:30':16''$ , na cidade de Belém, Figura 21.

Os dados de chuva foram medidos por pluviômetro de reservatório (Campbell Instruments, Inc) de estações meteorológicas automáticas de superfície localizadas na sede do INMET e no 4º Distrito Naval.



**Figura 21** Área de estudo, marcada pelo círculo rosa que tem um raio de 30 km, centrado no pluviômetro do 4º Distrito Naval (4º DN) em Belém.

Além dos dados de raios e de chuva, também foram utilizadas imagens de satélites obtidas no site do INPE-CPTEC, os Boletins de Climanálises, Boletins Hidrometeorológicos e Boletins de Análises e Previsão Climática da Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará – RPCH.

Os dados de ocorrências de raios utilizados nesse trabalho foram coletados pela rede de detecção de raios do Sistema de Proteção Amazônia (RDR-SIPAM), que inclui 12 sensores LPATS IV fabricados pela VAISALA. Esses dados são gerados no formato internacional UALF (Universal ASCII Lightning Format) em uma plataforma estável UNIX® que computa as soluções de descargas a partir dos dados brutos de vários tipos de sensores, envia as soluções diretamente para dispositivos de visualização em tempo real ou para processadores de arquivo para aplicações na investigação de acidentes ou ocorrências provocadas por descargas atmosféricas, e ainda para monitores de desempenho de redes. Esse sistema monitora continuamente a frequência de ocorrência dos raios, o número de pulsos por relâmpago, tipo de raios, polaridade dos pulsos e correntes máximas, bem como o instante da ocorrência em milissegundos.



Os sensores LPATS IV estão situados na maior parte ao longo de uma configuração meridiana, cobrindo partes de quatro estados brasileiros de Amazônia Oriental, cinco dos quais, instalados no Estado do Pará, nas localidades de Breves, Paragominas, Tucuruí, Parauapebas, Redenção e Belém, e encontram-se menos de 350 km um do outro, portanto, uma área de cobertura bem razoável no círculo definido.

#### 4.1.2.2. Seleção das Tempestades

Para a seleção dos dias de tempestades severas foi considerada a intensidade de precipitação, sendo selecionados dias em que ocorreram chuvas acima de 25 mm em uma hora ou 40 mm em duas horas que, segundo o Manual de Meteorologia Aeronáutica 105 – 2 da Diretoria de Rotas Aéreas (1964), chuva entre 25,1 e 50 mm é considerada forte, e acima de 50 mm é considerada severa. Entre os dados coletados pelo INMET e 4º Distrito Naval, foram selecionados 13 (treze) eventos que satisfizeram esta condição. Eles ocorreram durante os dias 10,11 e 12 de dezembro de 2006, 02,09,11,21 e 27 de janeiro de 2007; 14 de fevereiro de 2007; 02 de março de 2007; 02 e 04 de abril de 2007 e 05 de julho de 2007.

Devido a falta de dados no 4º Distrito Naval, infelizmente, não foi possível utilizá-los em todos os dias selecionados. Com isso, os dados de chuva dos dias 11 e 12/12/2006, 11 e 27/01/2007, 02/03/2007, 02 e 04/04/2007 e 05/07/2007 foram do pluviômetro do INMET, com resolução temporal de hora em hora, enquanto que os dados de chuva dos dias 10/12/2006, 02, 09 e 21/01/2007 e 14/02/2007 foram utilizados do pluviômetro do 4º Distrito Naval, os quais têm uma resolução temporal de 15 em 15 minutos. Essa resolução seria ideal, quando fossem comparados os intervalos de tempo da ocorrência dos raios em relação a precipitação máxima diária.

Para análises dos dados de intensidade de corrente máxima e mínima e distribuição temporal dos raios, foi utilizado um programa no software MATLAB (MATrix LABoratory) onde foram gerados gráficos das ocorrências de raios com distribuição temporal de 15 em 15 minutos e os totais percentuais para os intervalos de corrente de pico das descargas elétricas.

O aplicativo Excel do software Microsoft Office 2007 foi utilizado para realização de histograma entre raios e chuvas, durante o dia do evento.

#### 4.1.2.3. Análise Meteorológica.

Após a seleção dos dias dos eventos extremos, foram analisadas as condições microclimáticas e climáticas da região que podem ter favorecido a ocorrência do evento extremo, as análises dos sistemas meteorológicos de grande e meso escala.

Através do software GrADS foram elaborados os gráficos de circulação de vento em 850 hPa e em 200 hPa , utilizando os dados diários das componentes zonal e meridional do vento, pressão ao nível médio do mar do NCEP/NCAR (KALNAY et al.,1996) gerados através de um consistente sistema de assimilação de dados empregado no modelo de circulação geral (MCG) do NCEP com resolução T62L28 (aproximadamente 210 km em latitude/longitude e 28 níveis verticais). Os gráficos de radiação de onda longa (ROL) foram gerados através dos dados derivados dos satélites meteorológicos de órbita polar (LIEBMANN et al., 1996) que encontram-se dispostos numa grade regular com resolução de 2.5° latitude por 2.5° longitude.

#### **4.1.3. Resultados e Discussão**

Na Tabela 6 estão apresentados dados dos treze eventos de tempestades severos, ocorridos em Belém do Pará e suas características físicas, onde pode-se observar que o dia mais eletrificado ocorreu no dia 11 de dezembro de 2006, com 699 raios e 65,2 mm de chuva e o evento com menor número de raios ocorreu no dia 05/07/2007, período menos chuvoso. Também pode-se observar que, com exceção o dia 05/07/2007, todos os demais eventos de raios foram detectados por mais de três sensores.

No que se refere a polaridade dos raios, o dia 10/12/2006 45 % dos eventos detectados foram positivos, enquanto que o dia 02/03/2007, apresentou 100% dos eventos com polaridade negativa. A intensidade de correntes de pico variou de 10 - 202 kA, em todos os casos estudados, sendo o dia 12/12/2006, apresentou o maior valor de corrente de pico, igual a 202 kA. As correntes mínimas ficaram acima de 10 kA, com exceção do 02/01/2007.

Para análise temporal da precipitação, foram utilizados dados da estação pluviométrica do 4º Distrito Naval em apenas 5 dias, nos demais dias os dados utilizados foram da estação meteorológica automática de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia –INMET.

**Tabela 6 Dados de raios e chuva ocorridos em 13 eventos com tempestades severas em Belém-PA.**

| BELÉM-PA   | CHUVA (mm) |        |        |       | Número de Sensores |     |     |    | Número de Raios |             |            | Polaridade dos Raios Nuvem-solo |                 |          |                 | Intensidade de Corrente |        |
|------------|------------|--------|--------|-------|--------------------|-----|-----|----|-----------------|-------------|------------|---------------------------------|-----------------|----------|-----------------|-------------------------|--------|
|            |            |        |        |       | 3                  | 4   | 5   | 6  |                 |             |            | Positivo                        |                 | Negativo |                 |                         |        |
|            | DATA       | MÍNIMO | MÁXIMO | TOTAL | FORTE DOS DADOS    |     |     |    |                 | INTRA NUVEM | NUVEM SOLO | TOTAL                           | NÚMERO DE RAIOS | %        | NÚMERO DE RAIOS | %                       | Mínimo |
| 10/12/2006 | 0.2        | 18     | 37.6   | 4° DN |                    | 5   | 13  | 2  | 0               | 20          | 20         | 9                               | 45%             | 11       | 55%             | 14                      | 151    |
| 11/12/2006 | 0.2        | 41.8   | 65.2   | INMET |                    | 183 | 489 | 27 | 0               | 699         | 699        | 33                              | 5%              | 666      | 95%             | 14                      | 184    |
| 12/12/2006 | 0.4        | 34     | 67     | INMET |                    | 19  | 27  | 2  | 0               | 48          | 48         | 7                               | 15%             | 41       | 85%             | 13                      | 202    |
| 02/01/2007 | 0.2        | 18     | 30.6   | 4° DN |                    | 101 | 207 | 16 | 0               | 324         | 324        | 45                              | 14%             | 279      | 86%             | 10                      | 138    |
| 09/01/2007 | 0.2        | 20.6   | 35     | 4° DN |                    | 83  | 85  | 11 | 60              | 119         | 179        | 21                              | 18%             | 98       | 82%             | 12                      | 170    |
| 11/01/2007 | 0.2        | 40     | 53.4   | INMET |                    | 22  | 31  | 4  | 0               | 57          | 57         | 8                               | 14%             | 49       | 86%             | 20                      | 157    |
| 21/01/2007 | 0.6        | 18.6   | 37.4   | 4°DN  |                    | 64  | 38  | 5  | 0               | 107         | 107        | 18                              | 17%             | 89       | 83%             | 13                      | 154    |
| 27/01/2007 | 1.6        | 42.6   | 75.4   | INMET |                    | 47  | 55  | 5  | 0               | 107         | 107        | 9                               | 8%              | 98       | 92%             | 15                      | 128    |
| 14/02/2007 | 0.2        | 21     | 59.4   | 4°DN  |                    | 68  | 46  | 20 | 72              | 62          | 134        | 21                              | 34%             | 41       | 66%             | 14                      | 188    |
| 02/03/2007 | 0.4        | 46.4   | 53.4   | INMET |                    | 25  | 7   |    | 1               | 31          | 32         | 0                               | 0%              | 31       | 100%            | 27                      | 160    |
| 02/04/2007 | 7.2        | 46.8   | 54     | INMET |                    | 37  | 31  | 2  | 13              | 57          | 70         | 5                               | 9%              | 52       | 91%             | 22                      | 133    |
| 04/04/2007 | 1          | 26.6   | 30.2   | INMET |                    | 33  | 14  | 4  | 7               | 44          | 51         | 3                               | 7%              | 41       | 93%             | 20                      | 157    |
| 05/07/2007 | 0          | 25.8   | 25.8   | INMET | 12                 | 11  |     |    | 3               | 20          | 23         | 4                               | 20%             | 16       | 80%             | 21                      | 82     |

Na Tabela 7 estão apresentados a distribuição dos raios conforme sua intensidade de corrente de pico, o número de eventos de raios e os sistemas meteorológicos atuantes em cada dia selecionado para análise de tempestades severas em Belém. Pode-se observar que o dia 14/02/2007, 60% das ocorrências dos raios tiveram uma intensidade de corrente de até 30 kA. O dia 05/07/2007 teve um índice de 64%, dos raios com intensidade de corrente de pico entre 31 e 75 kA e nenhum raio com intensidade acima de 100 kA. Quando observamos os raios com intensidade acima de 75 kA, o dia 02/03/2007 foi o que teve maior percentual desses raios, 22%. O dia 04/04/2007 apresentou o maior percentual de raios acima de 100kA, onde 14% dos raios detectados nesse dia apresentaram com altas intensidades de corrente de pico. Observa-se que o dia em que houve a interação da ZCAS com outros sistemas o número de raios foi muito superior em relação aos outros dias.

**Tabela 7 Intensidade de corrente de pico e sistemas meteorológicos nos dias de tempestades severas em Belém.**

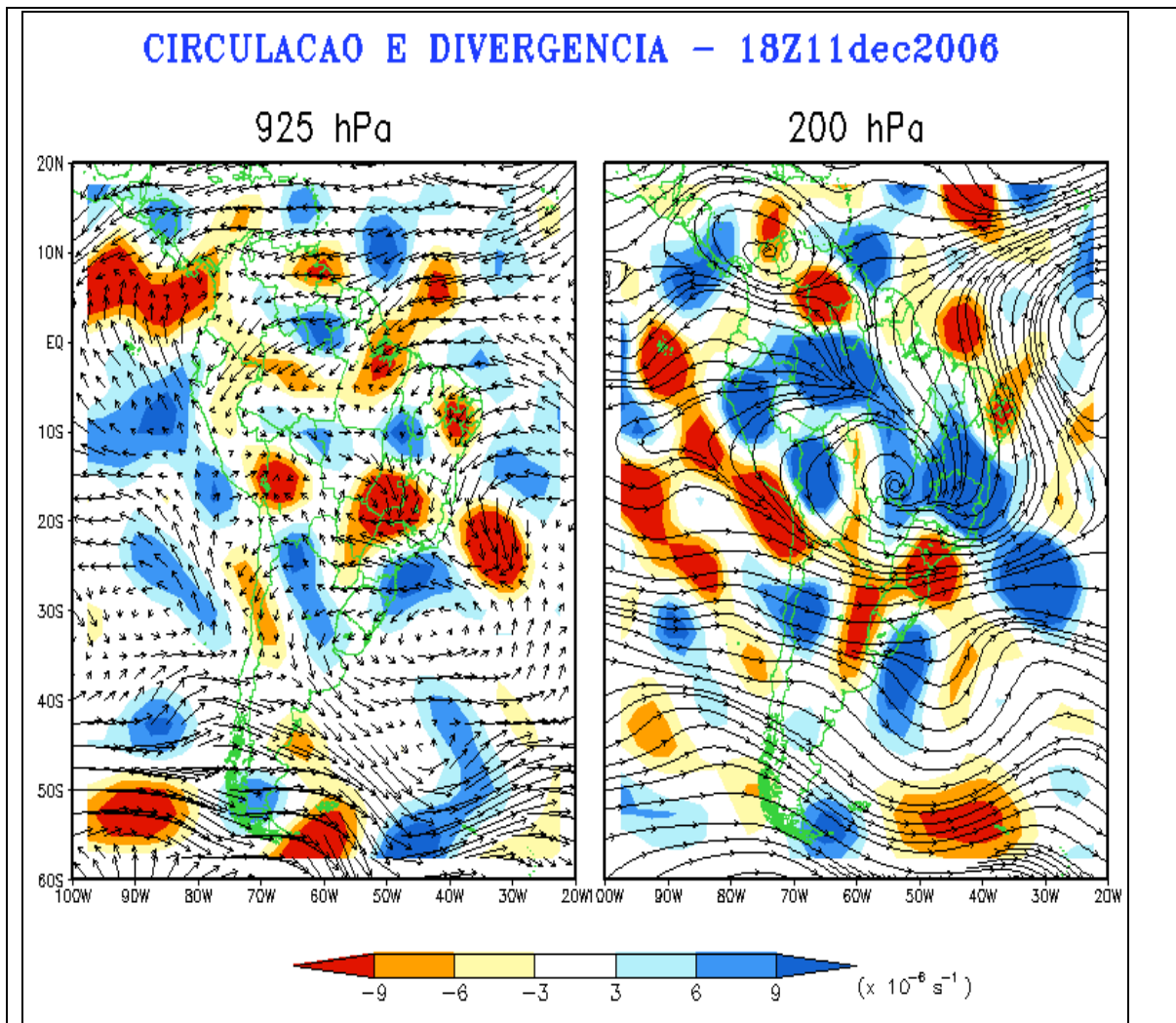
| <b>INTENSIDADE DE CORRENTE</b> | <b>11/12/2006</b> | <b>09/01/2007</b> | <b>14/02/2007</b> | <b>02/03/2007</b> | <b>04/04/2007</b> | <b>05/07/2007</b>  |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| <b>ATÉ 30 kA</b>               | 23%               | 45%               | 60%               | 13%               | 22%               | 32%                |
| <b>31 a 75 kA</b>              | 52%               | 39%               | 28%               | 53%               | 51%               | 64%                |
| <b>76 a 100 kA</b>             | 14%               | 10%               | 5%                | 22%               | 14%               | 5%                 |
| <b>101 a 250 kA</b>            | 11%               | 5%                | 7%                | 13%               | 14%               | 0%                 |
| <b>SISTEMAS METEOROLÓGICOS</b> | ZCIT,AB, ZCAS     | ZCIT+VCAN         | ZCIT, SF,AB       | ZCIT,VCAN ,SF     | VCAN,SF BRISA ,LI | ZCIT, BRISA,CAVADO |
| <b>NÚMERO DE RAIOS</b>         | 699               | 179               | 134               | 32                | 51                | 23                 |

#### 4.1.3.1. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 11/12/2006

##### 4.1.3.1.1 Análise Meteorológica

Para análise meteorológica do dia 11 de dezembro de 2006, foi utilizada a Figura 22 onde são mostradas a circulação atmosférica e divergência, em baixos níveis da atmosfera (vetores em 950 hPa) e altos níveis ( vetores em 200 hPa). Nos altos níveis da atmosfera os ventos caracterizam o campo de escoamento do ar ( movimento bidirecional) em diferentes níveis, observa-se a presença da Alta da Bolívia e do cavado sobre a região do nordeste, associada aos episódios de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN). Os baixos valores de ROL indicam nuvens bem desenvolvidas verticalmente e apresentam topos muito frios. Essas características são de nuvens cumulonimbos ou nuvens de tempestades. Na Figura 23 pode-se observar uma banda de nebulosidade predominantemente convectiva orientada NW/SE, provavelmente a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) , abrangendo desde Amazônia Oriental até o sudeste brasileiro. A ZCAS e o VCAN localizado sobre o oceano atlantico podem ter contribuido com a formação de linhas de instabilidades que consequentemente vieram a provocar tempestades severas em Belém durante o dia 11/12/2006.

A circulação atmosférica em baixos níveis sobre o Brasil mostrou um predomínio de vento do quadrante nordeste sobre grande parte da Amazônia e a presença do jato de baixos níveis de norte transportando umidade em direção aos subtropicais da América do Sul. Quando analisamos a precipitação pluviométrica ocorrida sobre Belém no dia 11 de dezembro de 2006, mostrada na Figura 24, verifica-se uma intensa convergência de massa no nordeste paraense, intensificando a instabilidade da atmosfera provocando chuvas intensas, acompanhadas de grande quantidade de raios. Esta grande quantidade de raios ocorrida neste dia deve-se ao fato de que havia um acoplamento entre vários sistemas meteorológicos interagindo, tais como: ZCIT, Alta da Bolívia e ZCAS.



**Figura 22** Circulação e Divergência do vento em baixos níveis ( 925 hPa) e alto níveis (200 hPa) no dia 11/12/2006 às 18 horas UTC ou 15 horas locais.

Fonte: NCEP.

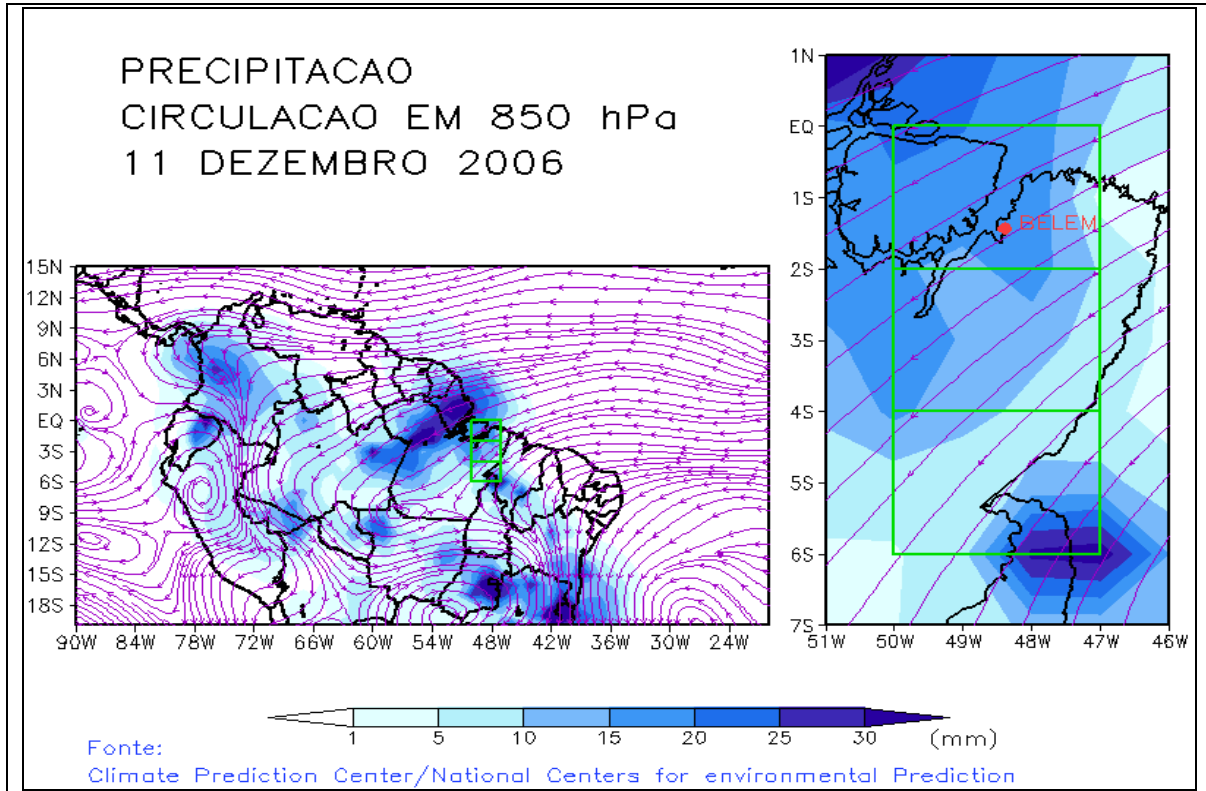


Figura 23 Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 11/12/2006, na qual está evidente o alto índice pluviométrico sobre Belém durante esse dia.

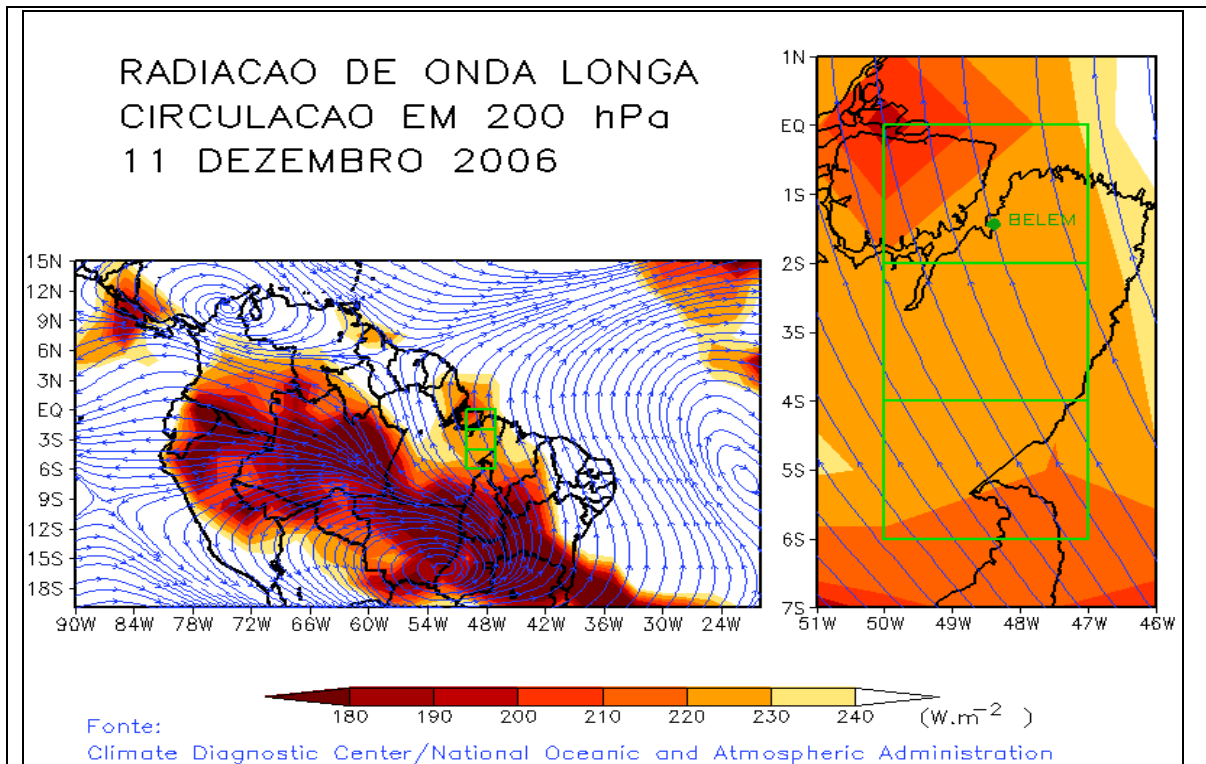
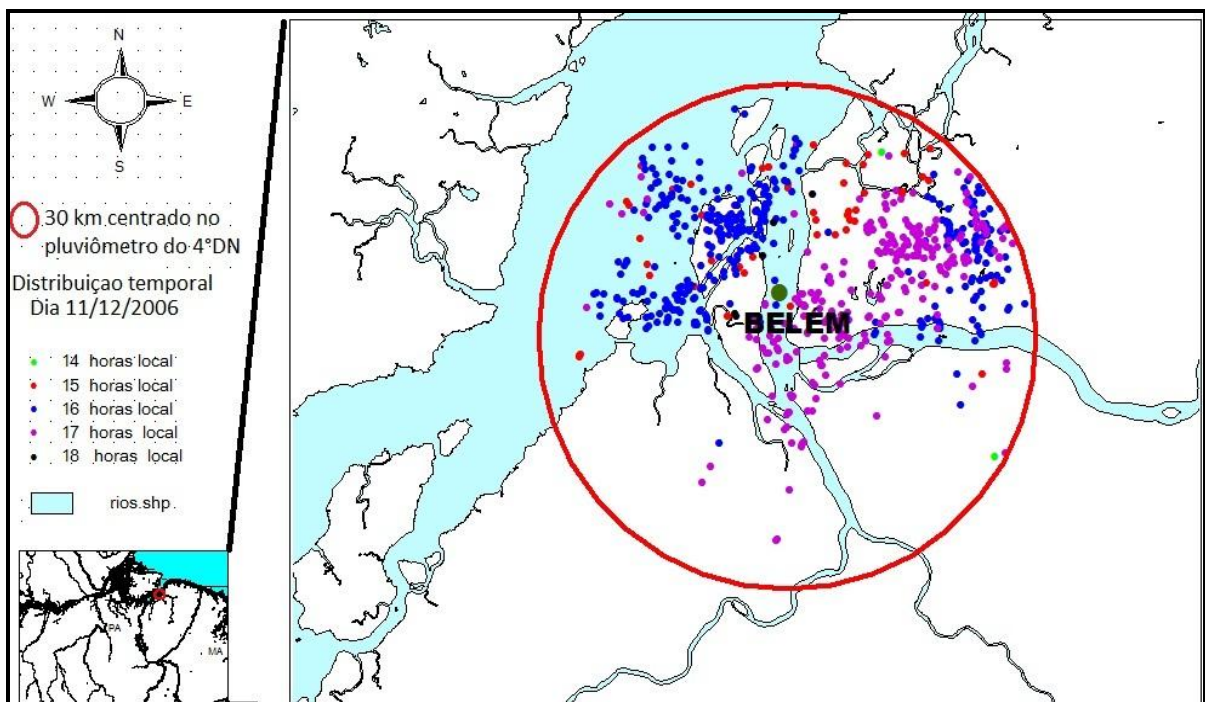


Figura 24 Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas - ROL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 11 de dezembro de 2006, na qual está evidente a influência da ZCIT e da ZCAS, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).

#### 4.1.3.1.2. Distribuição espacial e horária dos raios no dia 11/12/2006

Na Figura 25 são mostradas a distribuição espacial dos raios, durante o referido dia. Pode-se observar que a maior atividade elétrica ocorreu às 16:00 HL provavelmente provocada por intensa atividade convectiva que durante esse dia esteve atuando sobre grande parte da área de estudo. Verifica-se que às 16:00 HL, houve uma grande quantidade de raios à noroeste e nordeste, ou seja, caindo sobre o rio e sobre o continente. Esses raios iniciam com uma grande quantidade vindo de noroeste para nordeste e sudeste, ficando bem definido o sistema convectivo nessa área, caracterizando a influencia da ZCAS na precipitação ocorrida em Belém durante esse dia.



**Figura 25** Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 11/12/2006.

#### 4.1.3.1.3. Distribuição temporal dos raios e da chuva no dia 11/12/2006

A distribuição espacial horária do número de raios e da precipitação ocorridos no dia 11 de dezembro de 2006 em Belém, estão apresentados na Figura 26, onde verifica-se que a maior atividade elétrica ocorreu às 16:00 hora local (HL), com 101 eventos em 15 minutos. Observou-se também que no intervalo de 16:00HL às 18:00 HL foram detectadas 636 eventos nuvem-solo, ou seja, uma média de 70 eventos a cada 15 minutos.

Analisando o comportamento temporal dos raios com relação ao total pluviométrico, foi possível verificar que choveu ao longo do dia, com um total de 14,6 mm às 14:00 HL e 4,6 mm às 17:00 HL, atingindo seu máximo diário às 18:00 HL com 41,8 mm de chuva. Os dados de chuva utilizados nesse dia foram do INMET, portanto não se pode afirmar qual o horário em que ocorreu a máxima precipitação, por isso, para se calcular a variação do tempo entre os máximos de chuva e raios, usou-se um horário médio da chuva, ou seja, como o máximo ocorreu às 18:00 HL, foi considerado a media entre 17:00 HL e 18:00 HL, ou seja, 17:30 HL. Esse procedimento foi utilizado para todos os dias de tempestades severas em que se utilizaram os dados do INMET.

Mediante a explicação acima, observou-se que nesse dia o intervalo de tempo entre o máximo de raios e o máximo da chuva, ficou em torno de 01 hora e 30 minutos. Tempo em que os raios antecederam a máxima precipitação.

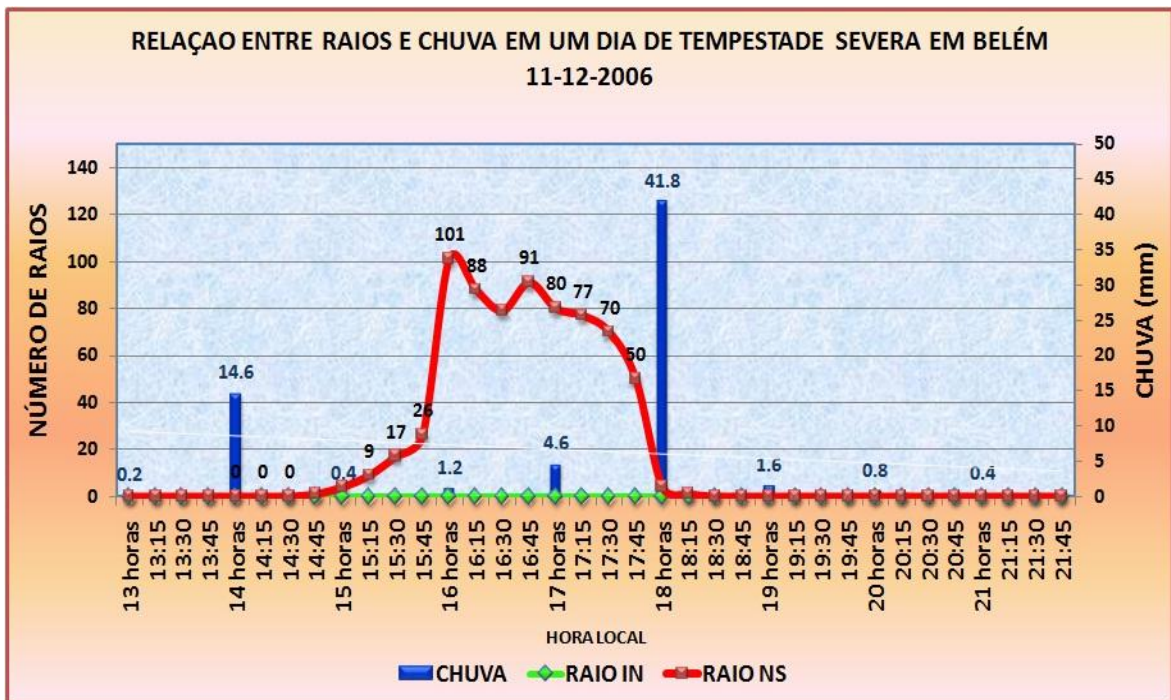


Figura 26 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 11/12/2006. Os dados de chuva utilizados nesta análise são do INMET.

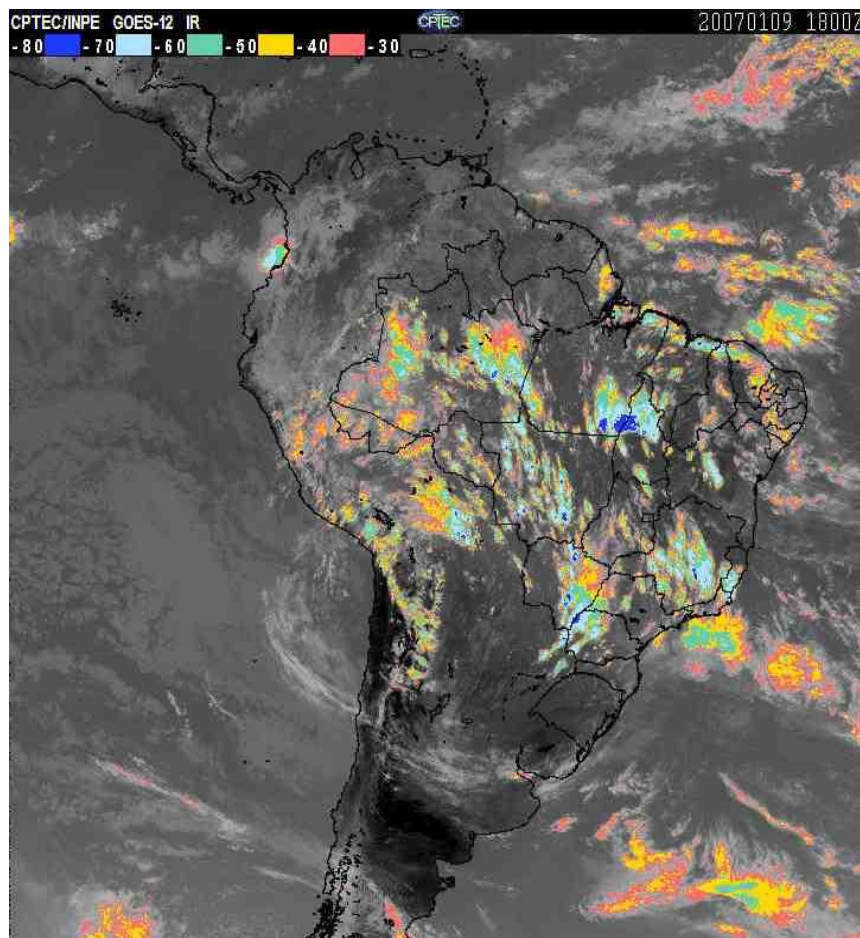


#### 4.1.3.2. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 09/01/2007

##### 4.1.3.2.1- Análise Sinótica do dia 09 /01/2007

Na Figura 27 pode-se observar na imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho, (realçada) do dia 09/01/2007 às 18:00 UTC ou 15:00 HL, mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível ser observadas nuvens, cuja temperatura de seus topos chegaram a -70 °C, significando grande desenvolvimento vertical das nuvens e propício a grande atividade elétrica.

Nota-se também um acoplamento da ZCIT com o VCAN sobre o Nordeste brasileiro favorecendo à ocorrência de chuvas significativas e fortes sobre os estados de MA, TO e PA, devido à forte divergência em altitude.

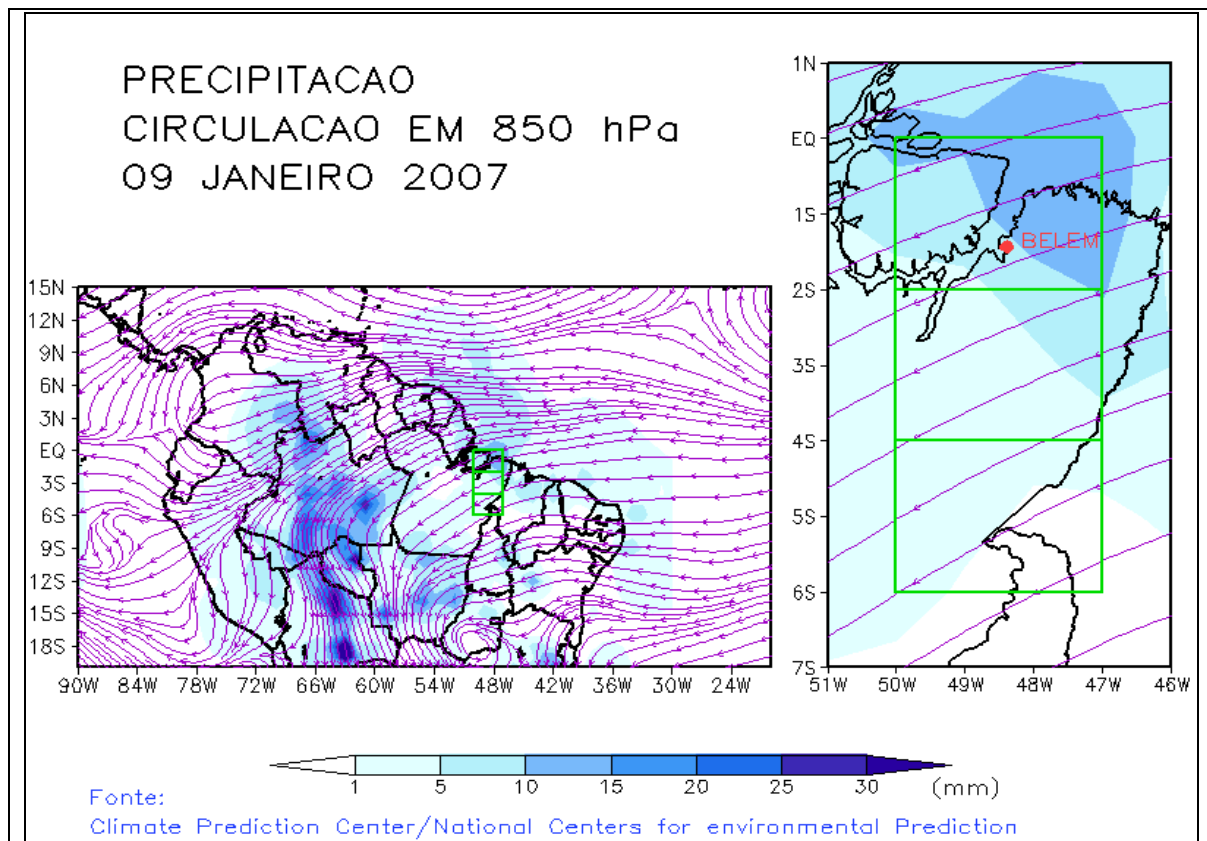


**Figura 27** Imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho (realçada) do dia 09/01/2007 às 18:00Z ,mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível observar nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a -80 °C.

#### 4.1.3.2.2. Precipitação e Circulação de Vento em 850 hPa, no dia 09/01/2007

Na Figura 28, são mostradas a circulação atmosférica em baixos níveis e a precipitação ocorrida no dia 09/01/2007 sobre o Brasil mostrou um predomínio de vento do quadrante nordeste sobre grande parte da Amazônia e a presença do jato de baixos níveis de norte transportando umidade em direção aos subtropicais da América do Sul.

O mês de janeiro foi caracterizado pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Este fenômeno que é típico de verão e apresenta períodos de intensificação e enfraquecimento durante toda a sua atuação, cujos períodos de duração variaram entre 3 e 6 dias aproximadamente com circulação direta, ou seja, ar frio e subsidente no centro, e quente e ascendente nas bordas. Este sistema, de acordo com o seu posicionamento, pode provocar chuvas no Nordeste do Pará, quando desloca-se de Leste para Oeste, visto que a borda do vórtice adquire grande vorticidade, causando instabilidade em baixos níveis (GAN e KOUSKY, 1986).

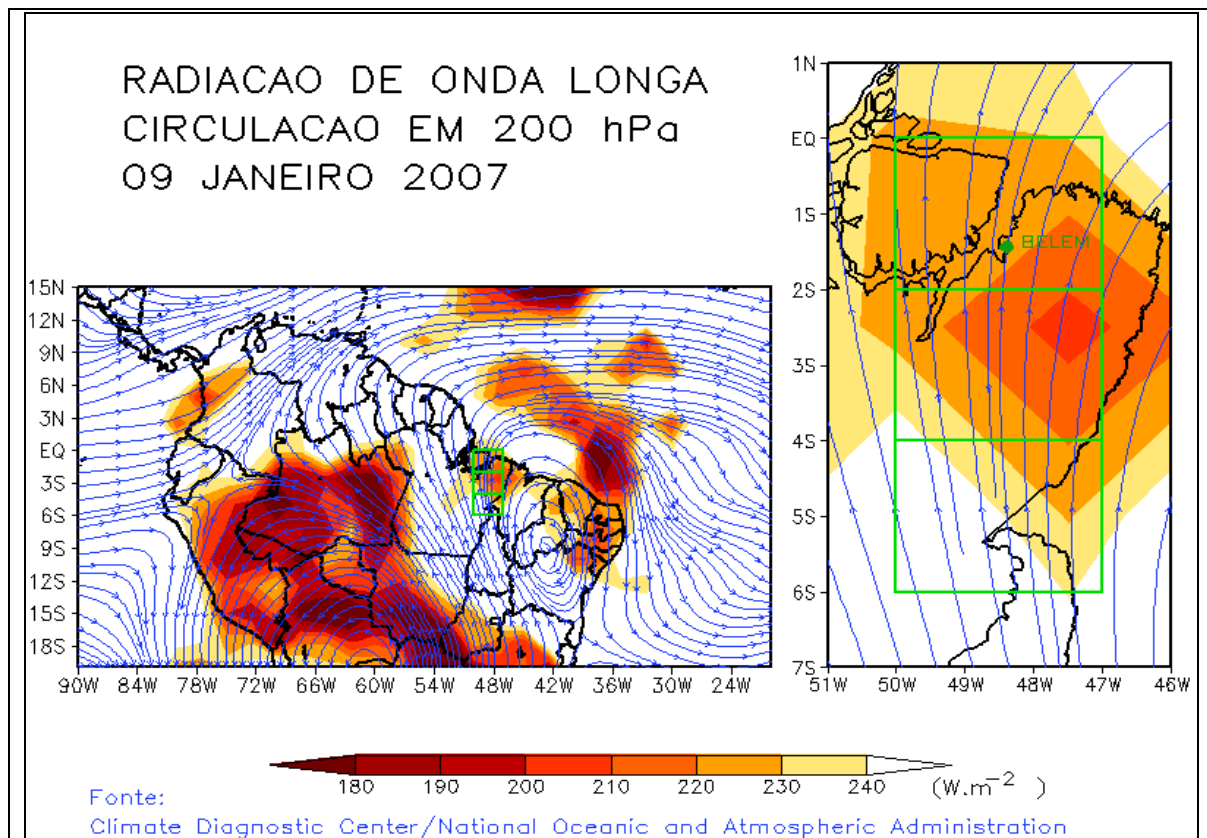


**Figura 28** Ventos em 850 hPa (m s-1) e precipitação durante o dia 09 de janeiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCAS e Vórtice Ciclônico definido no sul de Goiás.

#### 4.1.3.2.3- Radiação de Onda Longa (ROL) e Circulação de Vento em 200 hPa, no dia 09/01/2007

Na Figura 29 são apresentados a Radiação de Ondas Longas (ROL) e ventos em altos níveis da atmosfera (200 hPa), durante a dia 09/01/2007. Observa-se a presença da ZCIT atuando preferencialmente entre o Equador e 5°N, um cavado sobre a região do nordeste, inclusive com circulação ciclônica fechada, associada aos episódios de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN). Esses padrões relacionam-se aos eventos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que favoreceu a ocorrência de chuvas significativas e fortes sobre os estados de MA, TO e PA, devido à forte divergência em altitude.

A interação entre escalas (ZCIT e brisas marítimas) favoreceram a formação de Linhas de Instabilidade e aglomerados convectivos no dia 09/01/2007, também contribuindo para a ocorrência de chuvas mais significativas.



**Figura 29** Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas - ROL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 09 de janeiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, VCAN no NEB, ZCAS, além da circulação anti ciclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).

#### 4.1.3.2.4. Distribuição espacial e horária dos raios no dia 09/01/2007

Na Figura 30 é mostrado a distribuição temporal dos raios, durante o 09/01/2007, onde pode ser observado que a maior atividade elétrica ocorreu às 14:00 HL, provavelmente provocada por grande atividade convectiva causada pela circulação da Alta da Bolívia, e aos episódios de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) sobre o nordeste brasileiro que traz nebulosidade na sua borda, causando chuva e raios sobre o nordeste paraense. A atividade elétrica nesse dia começou às 13:00 HL, vindo de leste para oeste.

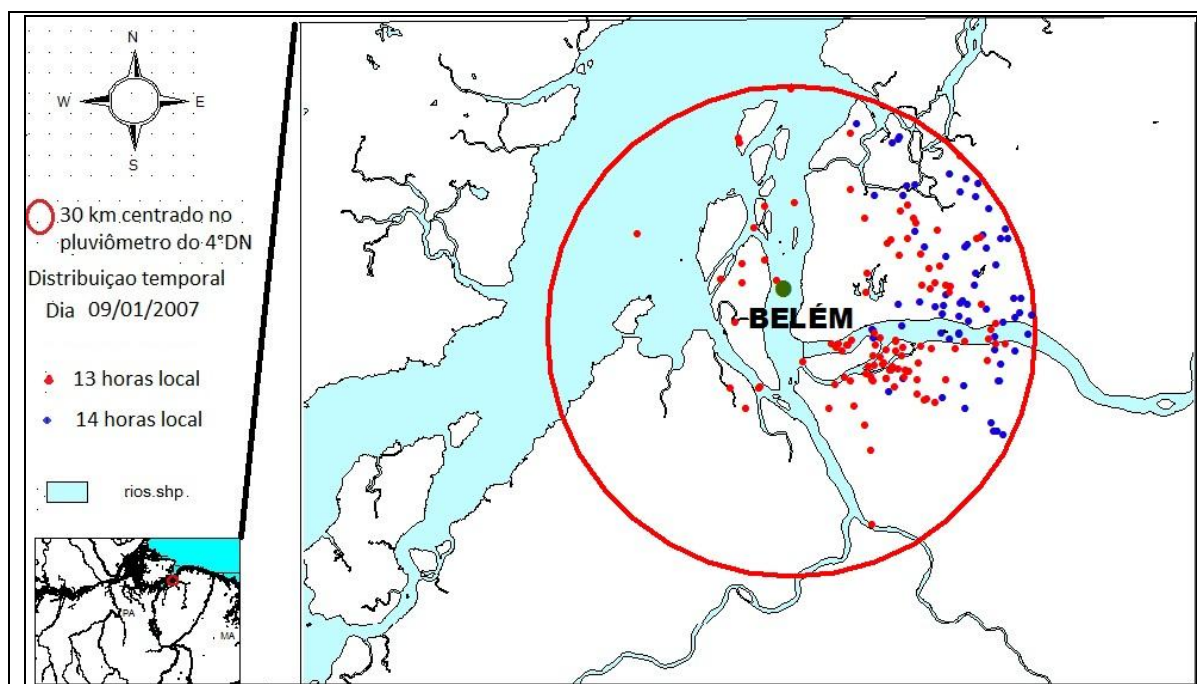


Figura 30 Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 09/01/2007.

#### 4.1.3.2.5. Distribuição temporal dos raios e chuva no dia 09/01/2007

Na Figura 31 é mostrada a distribuição horária do número de raios e da precipitação ocorridos no dia 09 de janeiro de 2007, em Belém do Pará. Verifica-se que nesse dia foram detectados raios intra nuvem e nuvem-solo, ambos tiveram sua maior atividade elétrica ocorrida às 14:00 HL, com 40 e 34 raios, respectivamente.

Os dados de chuva analisados nesse dia foram do 4° DN sendo possível observar que em Belém choveu 32 mm em 15 minutos, tendo o máximo de chuva ocorrido às 14:30 HL, seguido de mais 11,4 mm às 14:45 HL, continuou chovendo com menor intensidade até às 15:30 HL.

Ainda na Figura 31 observa-se que a ocorrência máxima dos raios antecede a máxima da precipitação em 30 minutos. Essa antecipação é vista tanto nos raios NS quanto nos IN.

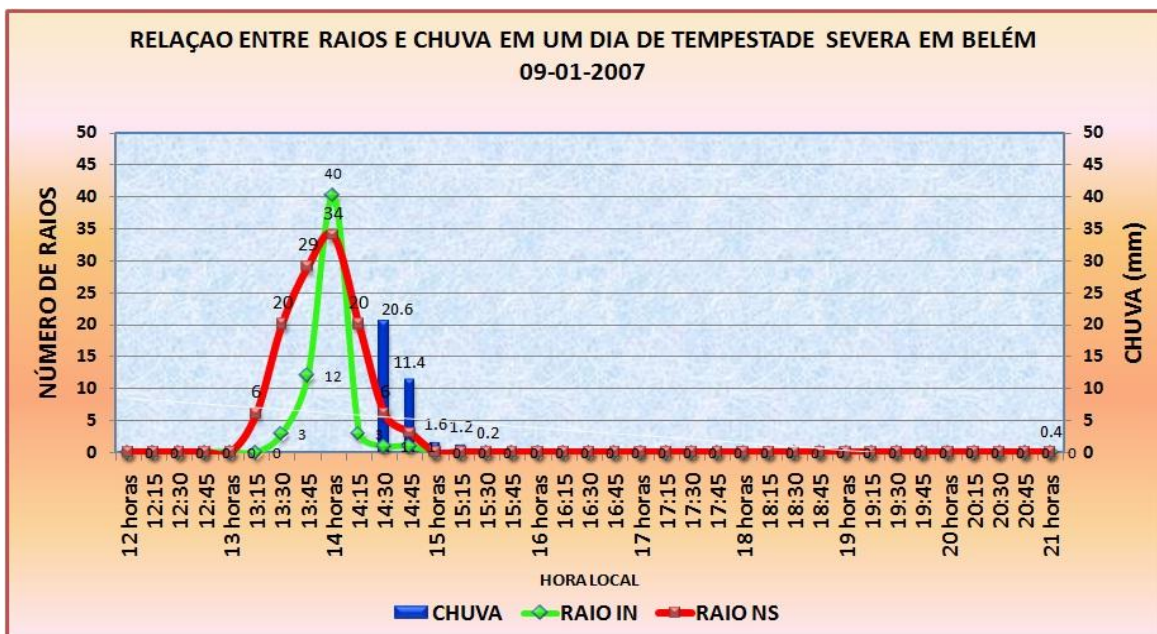


Figura31 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 09/01/2007. Os dados de chuva utilizados neste dia são do 4° DN.

#### 4.1.3.3. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 14/02/2007

##### 4.1.3.3.1. Análise Sinótica do dia 14/02/2007

Na Figura 32 é apresentada a imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho, verifica-se atuação da banda de nebulosidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que esteve com atividade moderada sobre o centro-norte do estado do Pará no dia 14 de fevereiro de 2007, nos horários de 17:30 UTC ou 14:30 HL, essa interação contribuiu para uma grande atividade elétrica e um total de 59,4 mm de chuva e 134 eventos de raios em Belém.

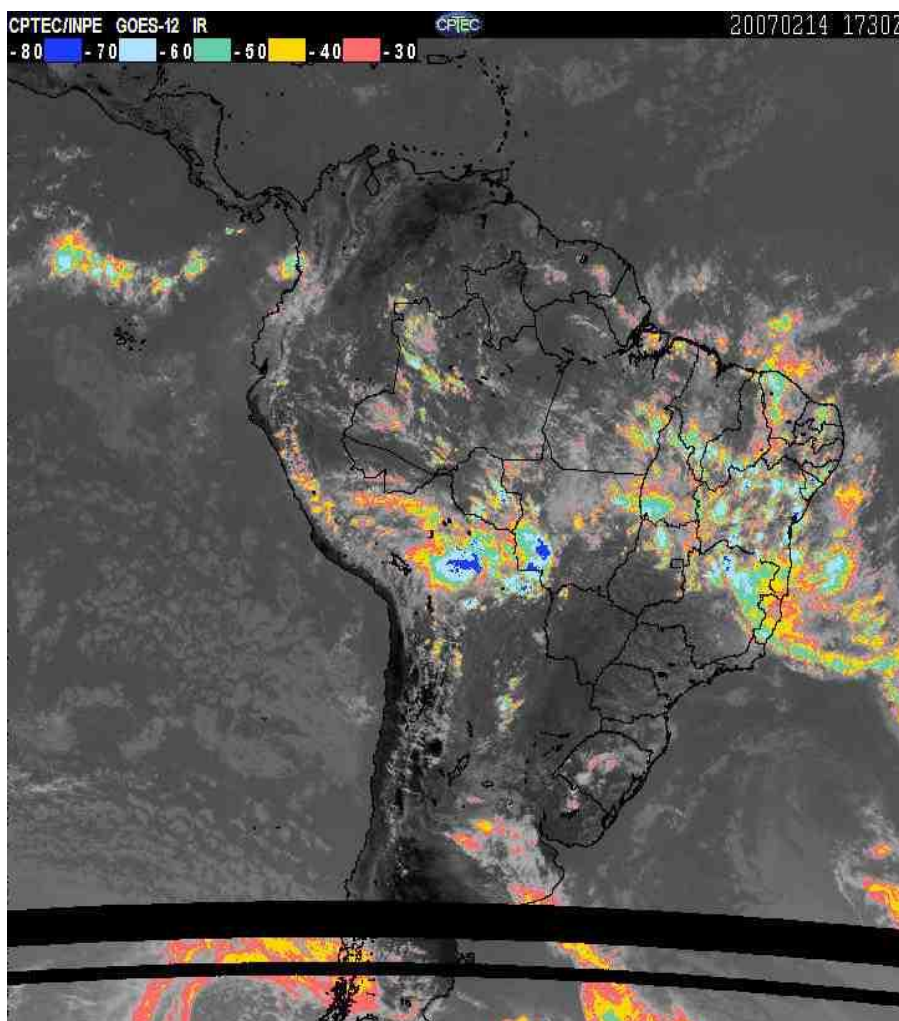
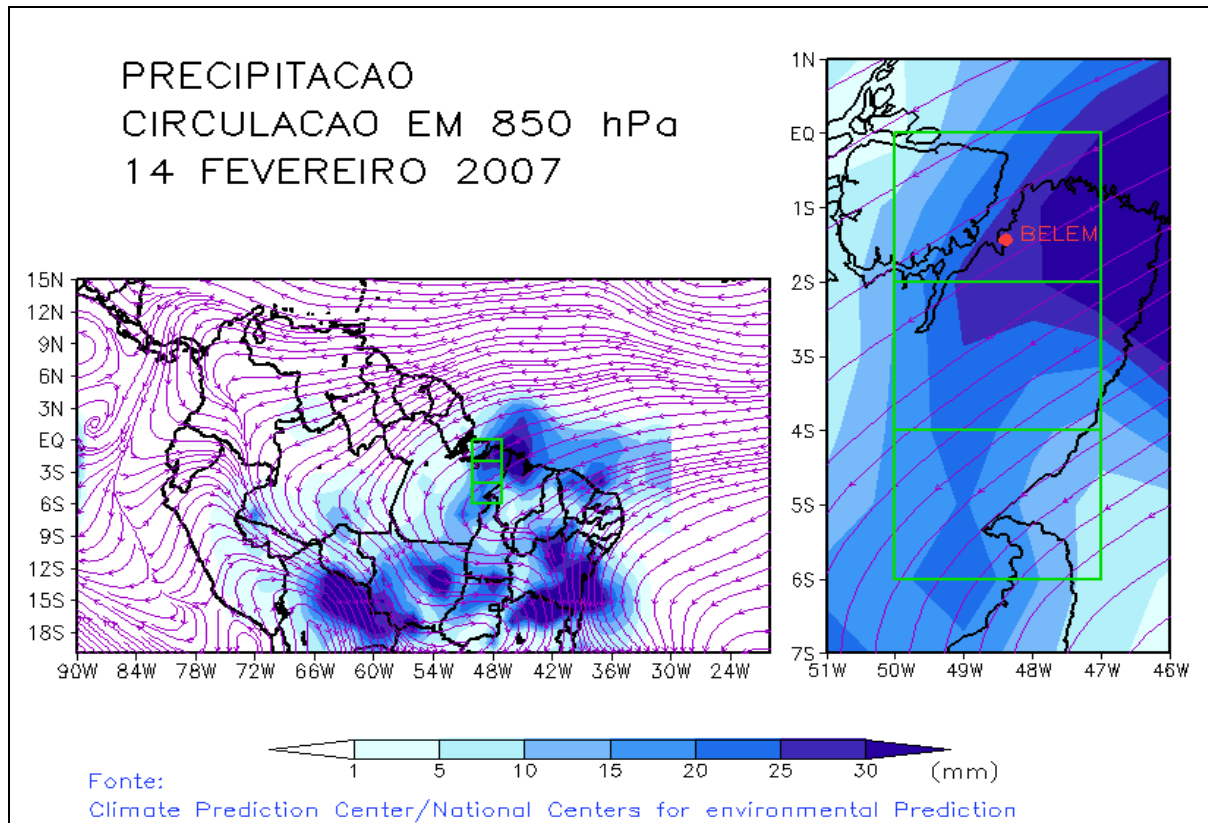


Figura 32 Imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho, do dia 14/02/2007 às 17:30Z mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível ser observadas nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a  $-80^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.1.3.3.2. Precipitação e Circulação de Vento em 850 hPa, no dia 14/02/2007

Na Figura 33 é mostrada a circulação atmosférica em baixos níveis sobre o Brasil e a precipitação pluviométrica no dia 14/02/2007, onde observa-se a confluência dos ventos e a convergência de massa em baixos níveis, associadas à ZCIT, em especial na região do Atlântico Tropical, logo, esses movimentos favorecem o transporte de umidade e o aumento da convecção sobre o norte América do Sul com evidencia da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada às brisas marítimas, favorecendo assim, a formação de Linhas de Instabilidade (LI's). O posicionamento favorável dos vórtices ciclônicos em altos níveis contribuíram para o excesso de chuvas e grande atividade elétrica em algumas localidades no nordeste e leste do Pará, destacando-se os totais registrados em Belém com 59,4 mm no dia 14/02/2007 (4° DN).

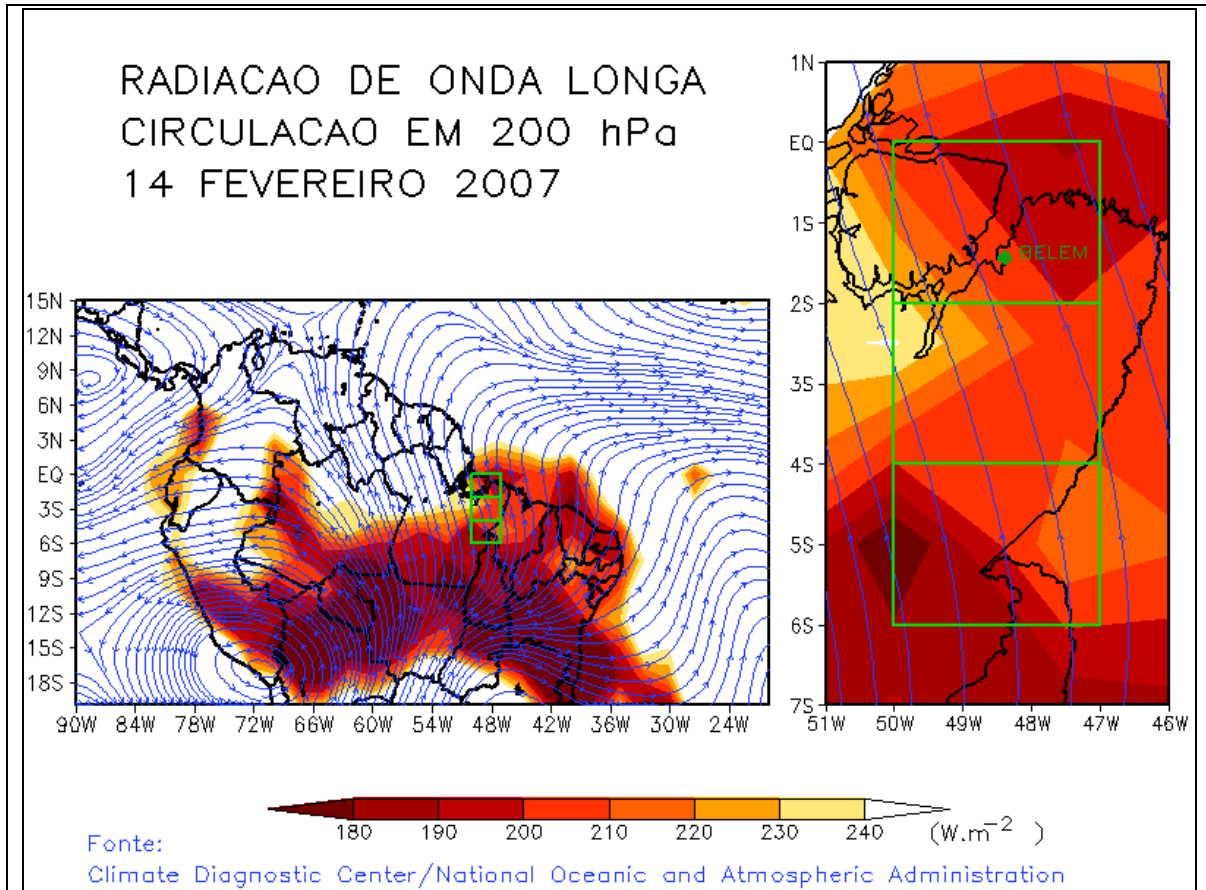


**Figura 33 Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 14 de fevereiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT**

#### 4.1.3.3.3 Radiação de Onda Longa (ROL) e Circulação de Vento em 200 hPa, no dia 14/02/2007

A Figura 34 são mostrados a Radiação de Ondas Longas (ROL) e ventos em altos níveis da atmosfera (200 hPa) observa-se a presença de um sistema frontal no sul da Bahia alimentado pela umidade da Amazônia que contribuiu para os totais de chuva acima da média nos estados do Tocantins e em grande parte do Pará (centro-sul), além da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada à formação de Linhas de Instabilidade (LI's) e o posicionamento favorável dos vórtices ciclônicos em altos níveis contribuíram para o excesso de chuvas em algumas localidades no nordeste e leste do Pará. Também temos o centro da Alta da Bolívia foi observado em aproximadamente 20°S 72°W, próximo à sua posição climatológica. A interação desses sistemas contribuiu com grande atividade convectiva provocando chuvas de 59,4 mm no dia 14/02/2007 em Belém, acompanhada de raios e trovoadas.

Os efeitos da Zona de Convergência Intertropical estão evidenciados devido ao escoamento do vento ao nível de 200 hPa para a área de confluência dos alísios, trata-se de um deslocamento latitudinal da convecção.

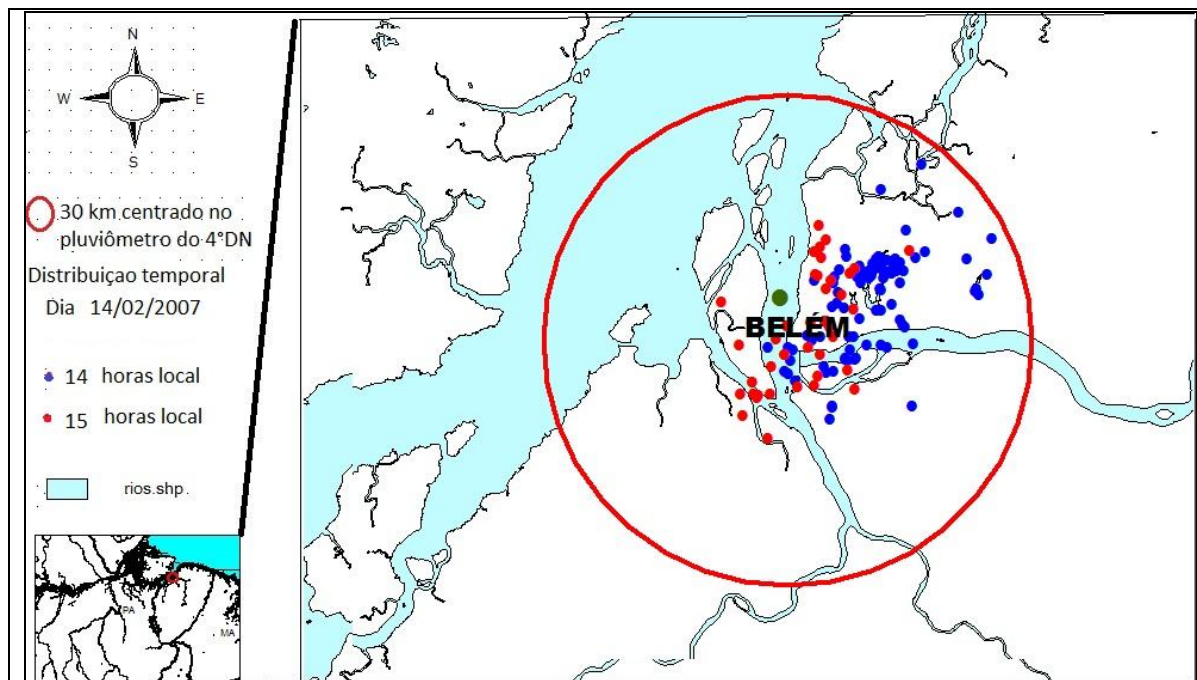


**Figura 34** Ventos em 200 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas - ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o dia 14 de fevereiro de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).

#### 4.1.3.3.4.. Distribuição espacial e horária dos raios no dia 14/02/2007

Na Figura 35 são apresentadas a distribuição temporal dos raios, durante o dia 14/02/2007, pode-se observar que a maior atividade elétrica ocorreu às 14:00 HL, vindo de leste para oeste, provavelmente provocada pela interação de varios sistemas que estavam atuando sobre o leste e sul do Pará, esses sistemas podem ser melhor visualizado nas Figuras 32 e 33, onde fica evidente a atuação da faixa de nebulosidade causada pela ZCIT, ZCAS, linhas de instabilidade e circulação da Alta da Bolívia.





**Figura 35** Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 14 de fevereiro de 2007.

#### 4.1.3.3.5. Distribuição temporal dos raios e chuva no dia 14/02/2007

Na Figura 36 é mostrada a distribuição horária do número de raios e da precipitação ocorridos no dia 14 de fevereiro de 2007, em Belém do Pará. Verifica-se que nesse dia foram detectados raios intra nuvem e nuvem-solo, ambos tiveram sua maior atividade elétrica ocorrida às 14:45 HL, com 38 e 24 raios, respectivamente.

Os dados de chuva analisados nesse dia foram do 4º DN sendo possível observar que em Belém choveu 41 mm em 30 minutos, sendo que o máximo de chuva ocorreu às 15:30 HL, com 21 mm em 15 minutos. Nota-se que houve chuva desde as 12:30 HL até às 21:00 HL, com alguns intervalos durante esse horário.

Observa-se também, que a ocorrência máxima dos raios antecede a máxima da precipitação em 45 minutos. Essa antecipação é vista tanto nos raios NS quanto nos IN

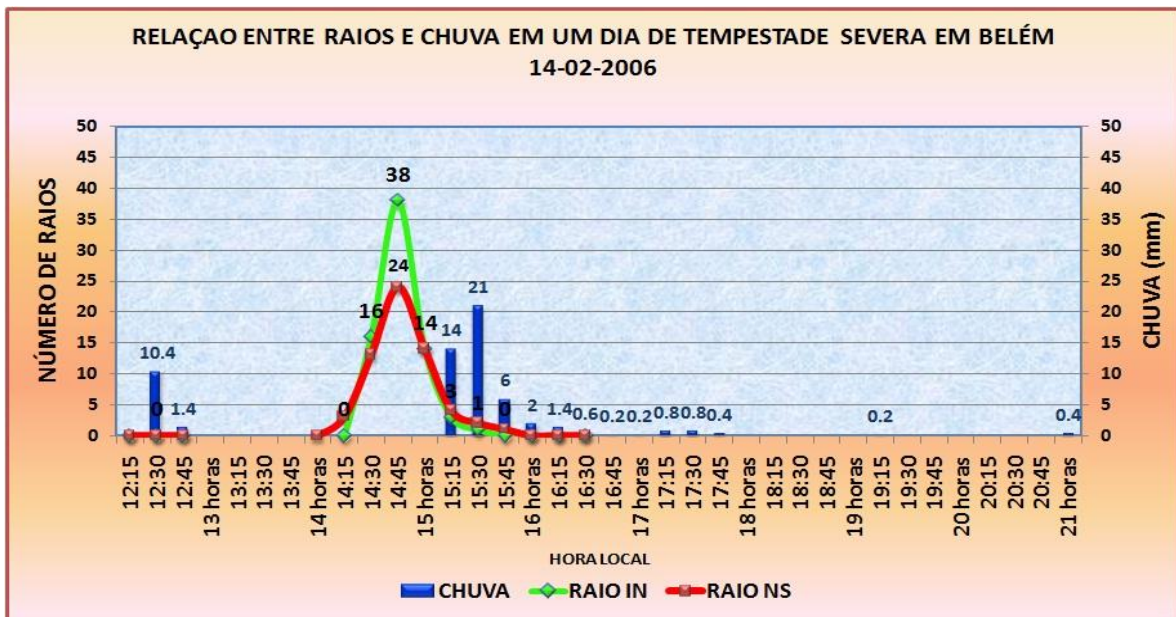


Figura 36 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 14 de fevereiro de 2007. Os dados de chuva utilizados nesse dia são do 4º DN.

#### 4.1.3.4. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 02/03/2007

##### 4.1.3.4.1. Análise Sinótica do dia 02/03/2007

Na Figura 37 é mostrada a imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho. Pode ser observado a atuação da banda de nebulosidade associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que se situa praticamente sobre o Equador com forte convergência de massa favorecendo às chuvas sobre o norte do Brasil. Observa-se sua interação da ZCIT com um VCAN sobre o nordeste brasileiro e um sistema frontal no Sul do Brasil, ativando a nebulosidade no nordeste paraense, provocando chuva intensa na cidade de Belém-Pará, onde choveu 53,4 mm.

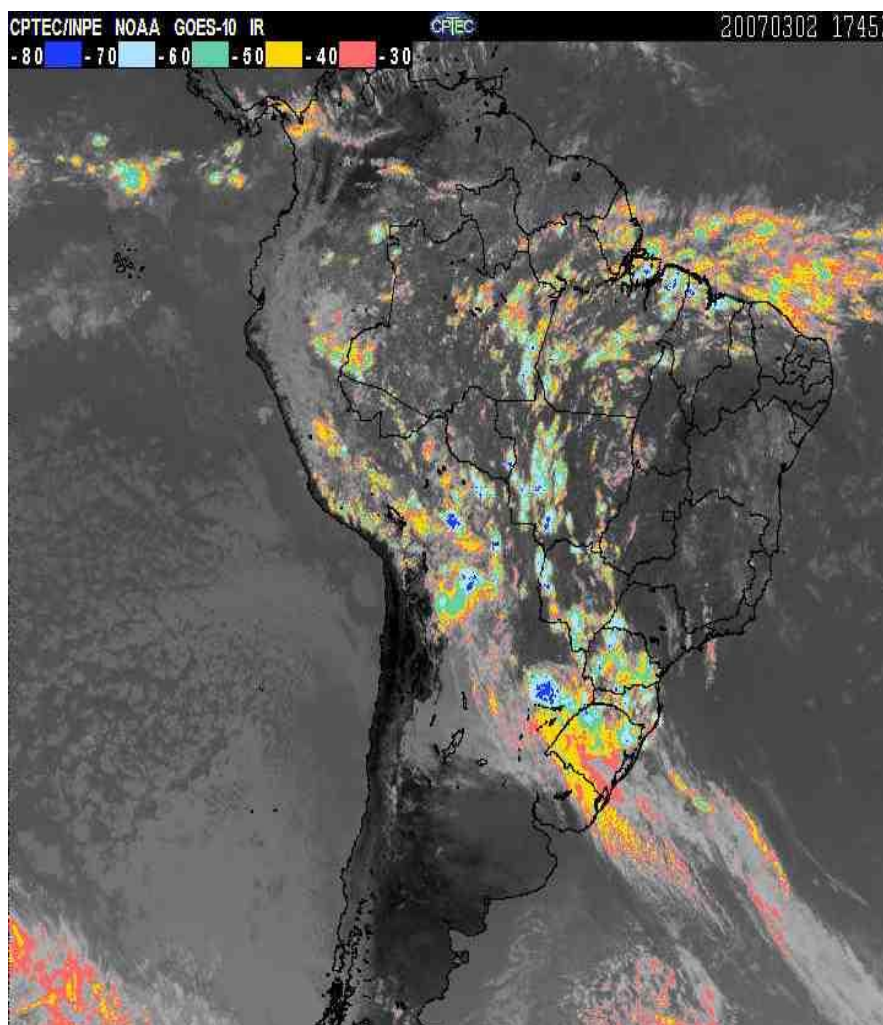


Figura 37 Imagem de satélite GOES 10 IR (realçada) do dia 02/03/2007 às 17:45Z mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível observar nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a -80 °C.

#### 4.1.3.4.2. Precipitação e Circulação de Vento em 850 hPa, no dia 02/03/2007

Na Figura 38 são mostradas a circulação atmosférica em baixos níveis sobre o Brasil e a precipitação pluviométrica no dia 02/03/2007, com evidencia da atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada à formação de Linhas de Instabilidade (LI's) e o posicionamento favorável dos vórtices ciclônicos em altos níveis contribuíram para o excesso de chuvas e grande atividade elétrica em algumas localidades no nordeste e leste do Pará, destacando-se os totais registrados em Belém com 53,4 mm no dia 02/03/2007 (4° DN) e 32 raios.

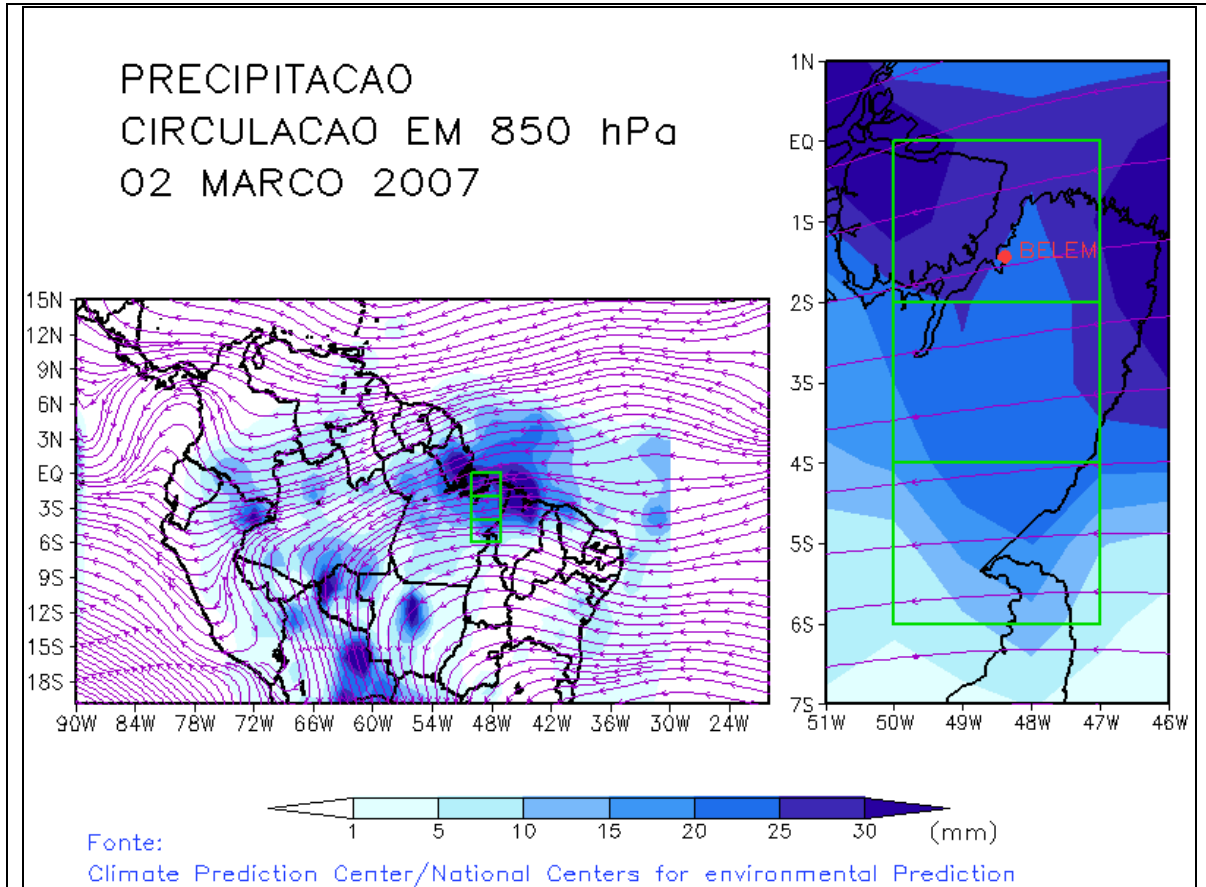
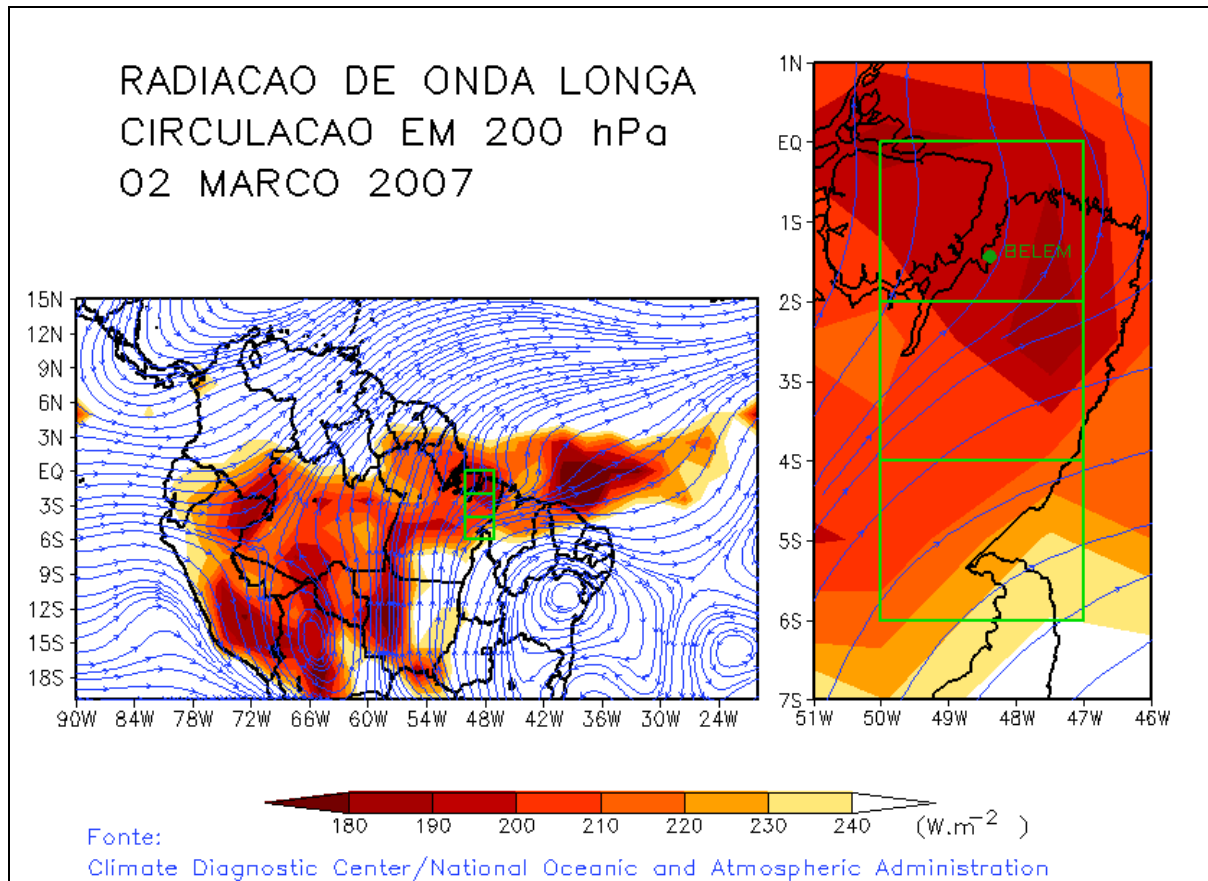


Figura 38 Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 02 de março de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT e VCAN,

#### 4.1.3.4.3. Radiação de Onda Longa (ROL) e Circulação de Vento em 200 hPa, no dia 02/03/2007

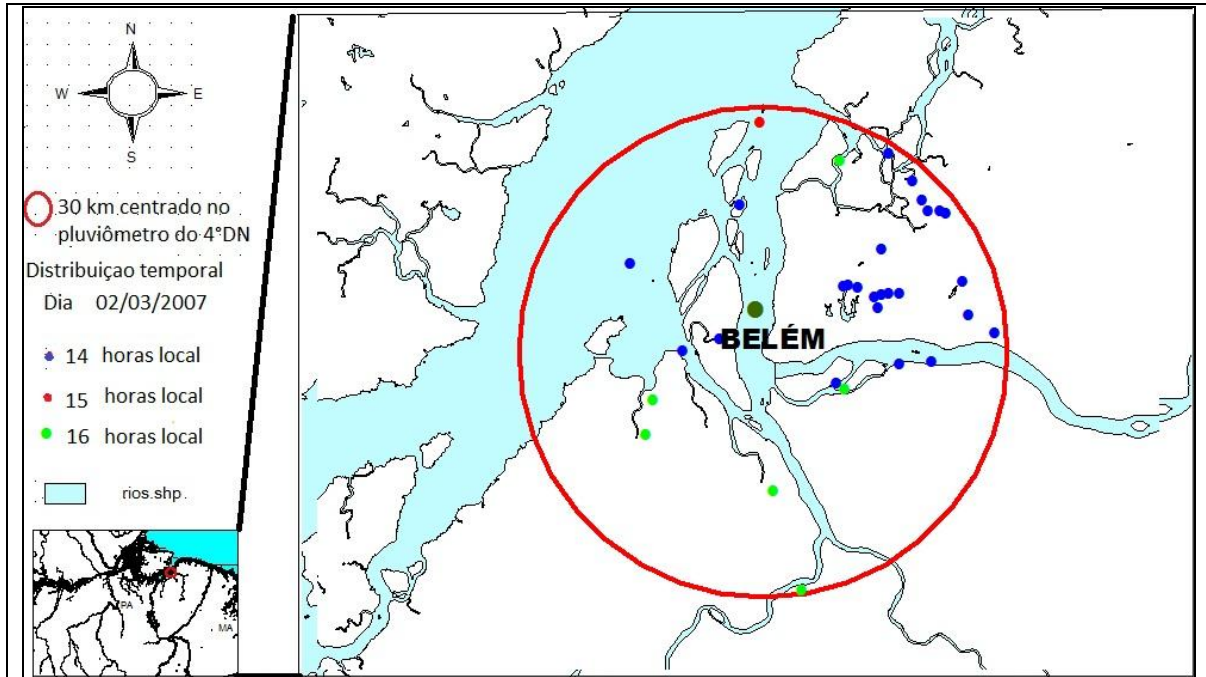
Na Figura 39 são mostradas a Radiação de Ondas Longas (ROL) e campo do escoamento e anomalia mensal do vento zonal em 200 hPa. Observa-se também a circulação anticiclônica centrada próximo a Bolívia e um cavado que vai desde o Atlântico até o sul do Pará. A circulação difluente encontra-se sobre o norte do Amazonas, Roraima e norte do Pará, onde foi observada anomalia positiva de precipitação.



**Figura 39** Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas – ROL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 02 de março de 2007, está evidente a influência da ZCIT, VCAN, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).

#### 4 1.3.4.4 Distribuição espacial e horária dos raios no dia 02/03/2007

Na Figura 40 são apresentadas a distribuição temporal dos raios, durante o dia 02 de março de 2007, pode-se observar que a maior atividade elétrica ocorreu às 1400 HL, provavelmente provocada pela interação de vários sistemas que estavam atuando sobre o leste e sul do Pará, esses sistemas podem ser melhor visualizados nas Figuras 37 e 38, onde fica evidente a interação entre os sistemas meteorológicos (ZCIT e VCAN) sobre o NEB e um sistema frontal nas proximidades do Espírito Santo e Bahia, que ativou a nebulosidade no nordeste paraense, provocando chuvas e raios em Belém. Observa-se também que os raios vieram de nordeste para sudeste



**Figura 40** Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 02 de março de 2007.

#### 4.1.3.4.5. Distribuição temporal dos raios e chuva no dia 02/03/2007

Na Figura 41 é apresentada a distribuição temporal dos raios e da chuva, ocorridos no dia 02 de março de 2007, em Belém do Pará. Verifica-se que nesse dia foram detectados 32 raios, dos quais apenas um foi intra-nuvem. Observa-se que horário de maior atividade elétrica ocorreu às 14:30 HL, com 9 raios.

Os dados de chuva analisados nesse dia foram do 4º DN sendo possível observar que em Belém o máximo de chuva ocorreu às 15:00 HL com 46,4 mm em 15 minutos.

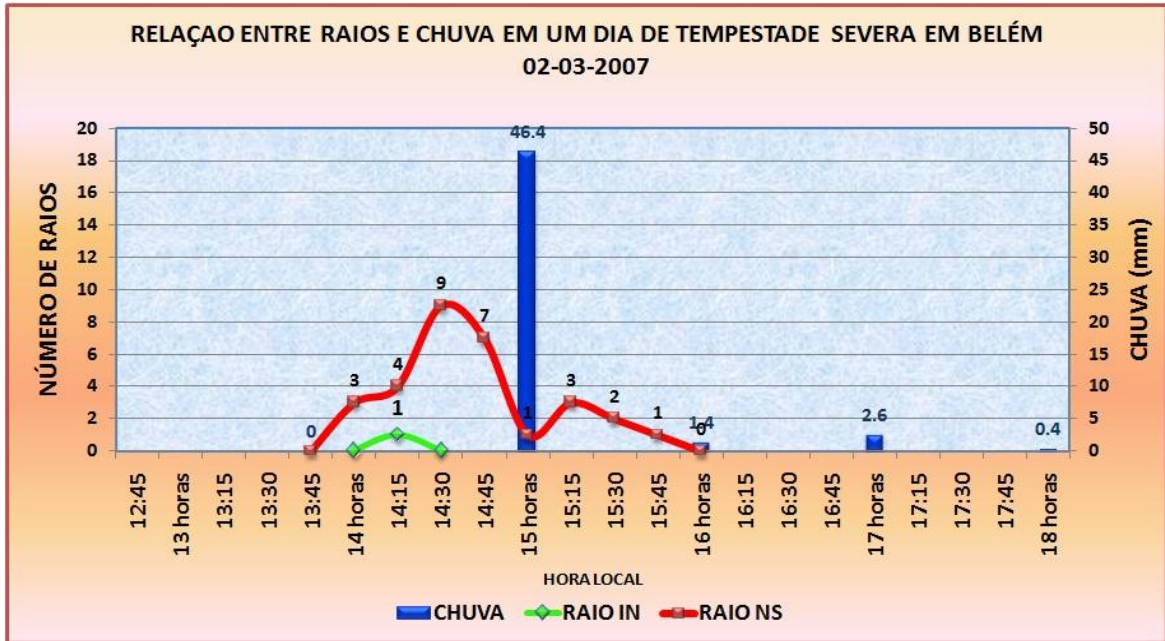
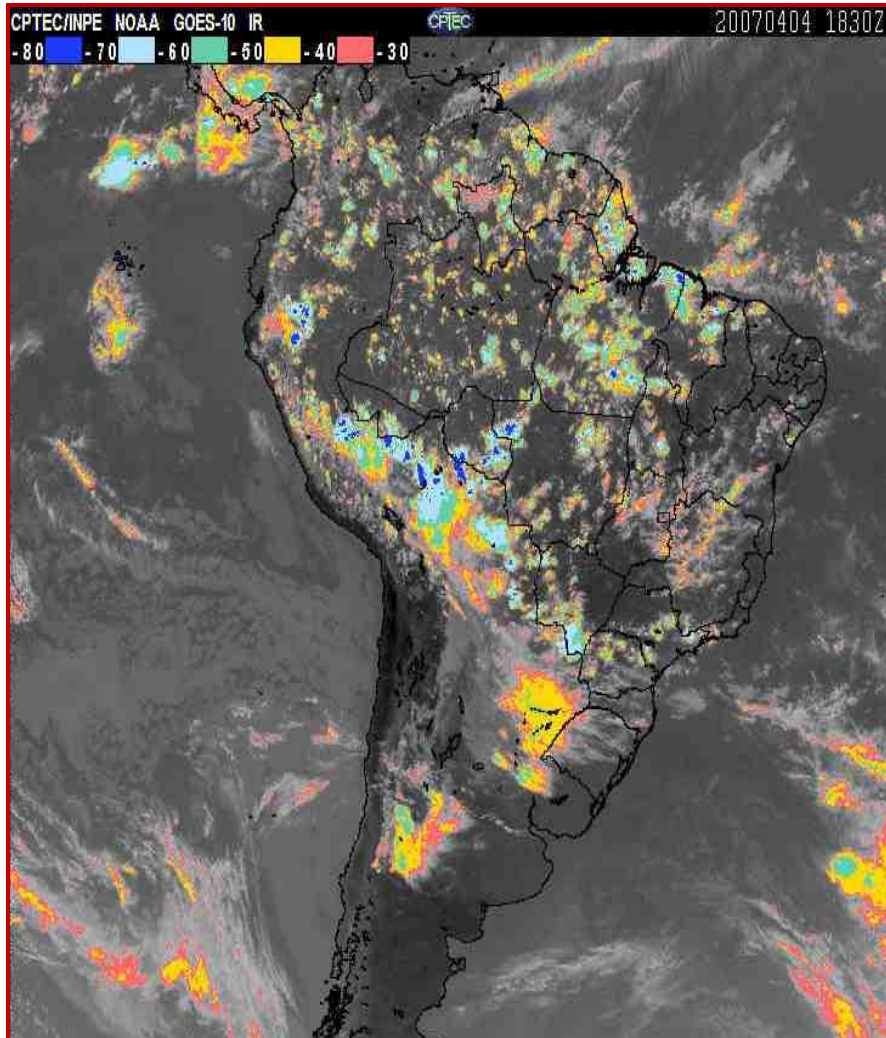


Figura 41 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 02 de março de 2007. Os dados de chuva utilizados neste dia são do INMET.

#### 4.1.3.5. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 04/04/2007

##### 4.1.3.5.1. Análise Sinótica do dia 04/04/2007

Na Figura 42 é apresentada a imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho no dia 04 de abril de 2007 no horário de 18:30 UTC ou 15:30 HL, onde pode ser observada a atuação da banda de nebulosidade associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) interagindo com o sistema frontal sobre o oceano Atlântico ativando a nebulosidade no nordeste paraense, provocando chuva intensa acompanhada de grande atividade elétrica em Belém. Observa-se também a presença de VCAN na divisa do MT-GO.

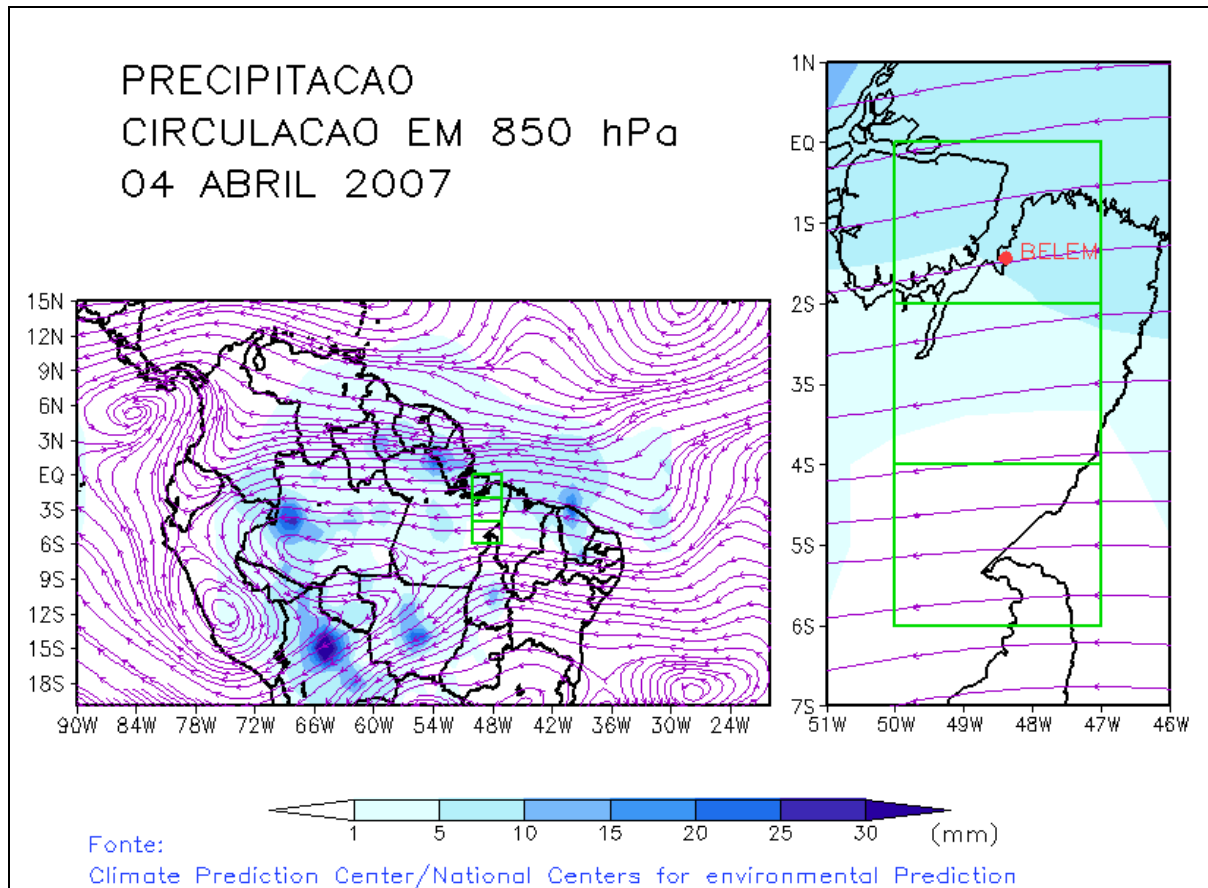


**Figura 42** Imagem do satélite GOES – 12 no canal infravermelho (realçada), a mostrando a presença de sistemas convectivos profundos próximo a Região Metropolitana de Belém, onde foi possível observar nuvens cuja temperatura de seus topos chegaram a  $-80^{\circ}\text{C}$ .

#### *4.1.3.5.2. Precipitação e Circulação de Vento em 850 hPa, no dia 04/04/2007*

Na Figura 43 observa-se a circulação atmosférica em baixos níveis sobre o Brasil e a precipitação pluviométrica no dia 04/04/2007, com fraca atividade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada à formação de Linhas de Instabilidade (LI's) e o posicionamento favorável dos vórtices ciclônicos em altos níveis contribuíram para o excesso de chuvas e grande atividade elétrica em algumas localidades no nordeste e leste do Pará, destacando-se os totais registrados em Belém com 54 mm no dia 04/04/2007 (INMET)



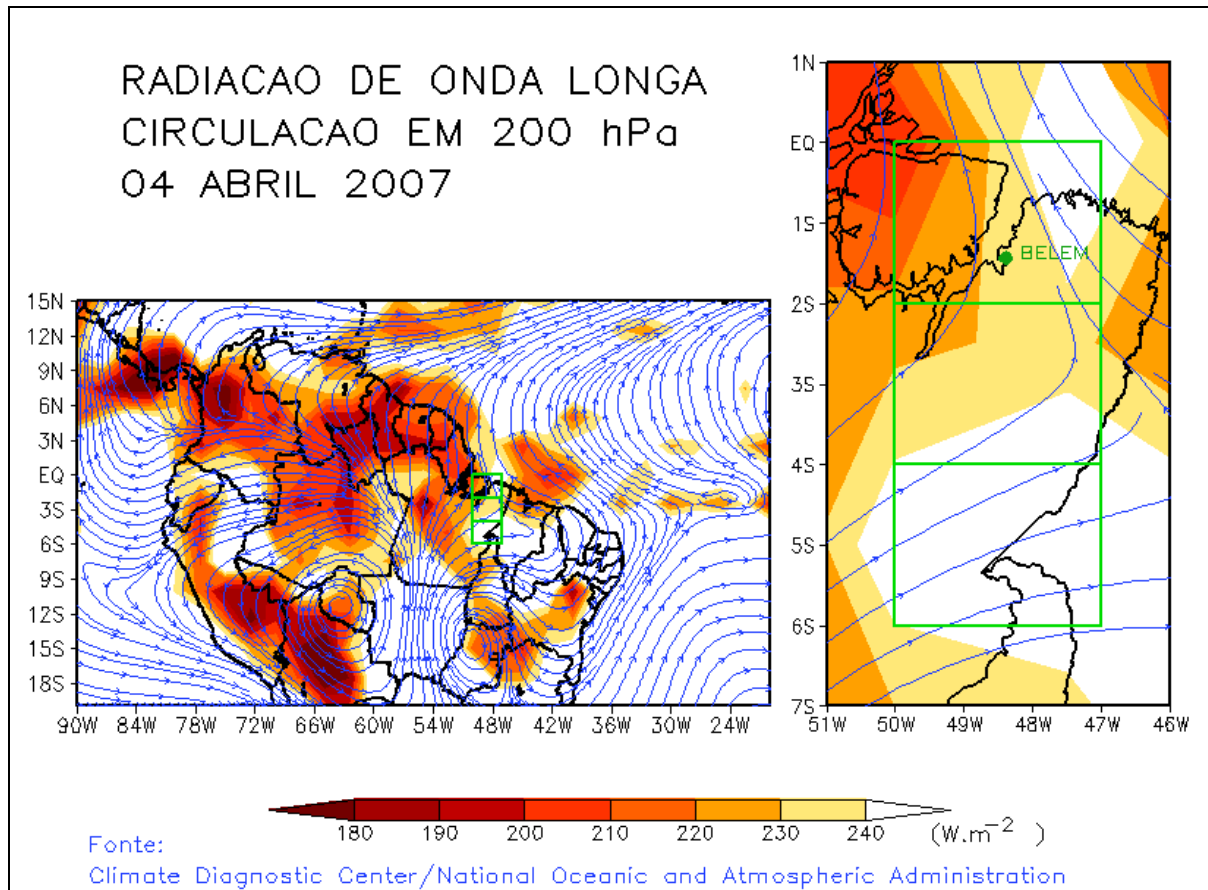


**Figura 43** Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 02 de abril de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT.

#### 4.1.3.5.3. Radiação de Onda Longa (ROL) e Circulação de Vento em 200 hPa, no dia 04/04/2007

Observa-se que a Figura 44 apresenta anomalia negativa na Radiação de Ondas Longas (ROL), ou seja, atividade convectiva associada a ZCIT em grande parte do Estado do Pará. Observa-se também convergência de massa na faixa litorânea da Amazônia Oriental com circulação predominante de NE, favorecendo a brisa marítima.

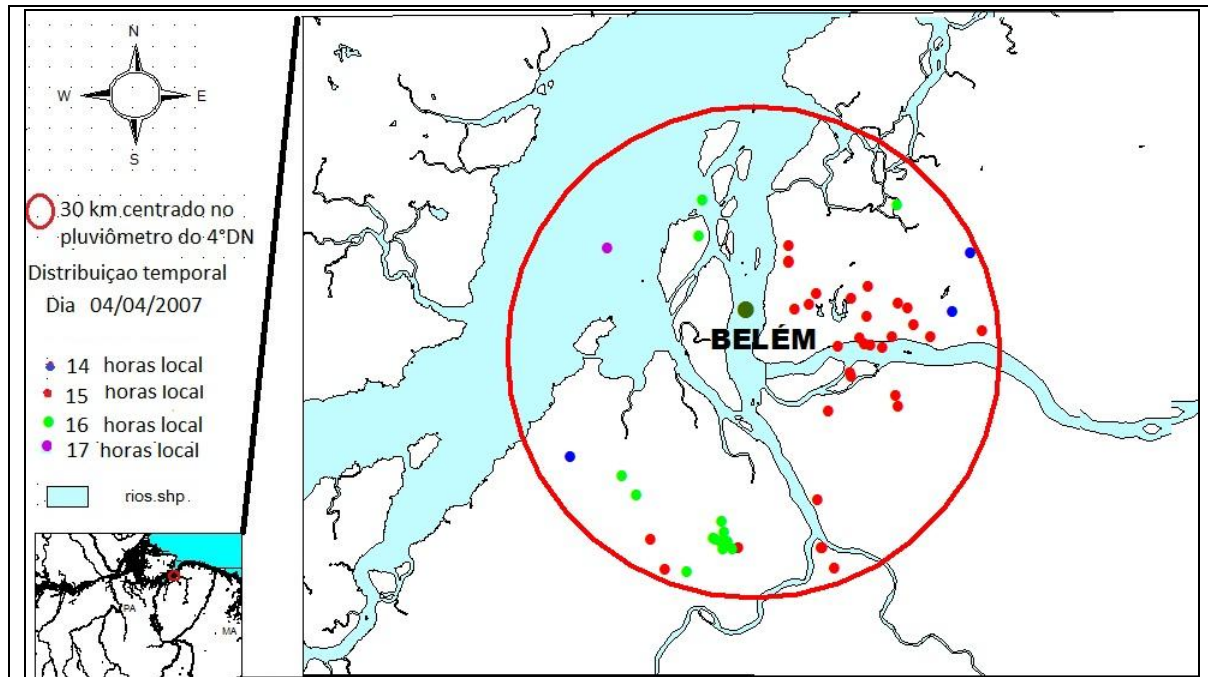
Além da ZCIT a presença de um VCAN localizado na região central do Brasil, ter contribuíram com o aumento da nebulosidade na região paraense, aumentando a precipitação e atividade elétrica das nuvens cumulonimbos, em Belém no dia 04/04/2007.



**Figura 44** Ventos em 200 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas – ROL ( $\text{W m}^{-2}$ ) durante o dia 04 de abril de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT, VCAN, além da circulação anticiclônica conhecida como Alta da Bolívia (AB).

#### 4.1.3.5.4. Distribuição espacial e horária dos raios no dia 04/04/2007

Na Figura 45 é mostrada a distribuição temporal dos raios ,durante o dia 04 de abril de 2007, pode-se observar que a maior atividade elétrica ocorreu às 14:00 HL, provavelmente provocada pela interação de VCAN varios sistemas que estavam atuando sobre o leste e sul do Pará, esses sistemas podem ser melhor visualizado nas Figuras 4.24 e 4.25, onde fica evidente a interação entre o VCAN sobre o NEB e um sistema frontal nas proximidades do Espírito Santo e Bahia, além da ZCIT, que ativou a nebulosidade no nordeste paraense, provocando chuvas e raios em Belém.



**Figura 45** Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 04 de abril de 2007.

#### 4.1.3.5.5. Distribuição temporal dos raios e chuva no dia 04/04/2007

Na Figura 46 é apresentada a distribuição temporal dos raios e da chuva, ocorridos no dia 04 de abril de 2007, em Belém do Pará. Verifica-se que nesse dia foram detectados 51 raios, dos quais 7 foram intra-nuvem. Observa-se que o horário de maior atividade elétrica ocorreu às 15:00 HL, com 10 raios nuvem-solo.

Os dados de chuva analisados nesse dia foram do INMET sendo possível observar que em Belém o máximo de chuva ocorreu às 16:00 HL com 26,6 mm e 2,6 mm às 17:00 HL.

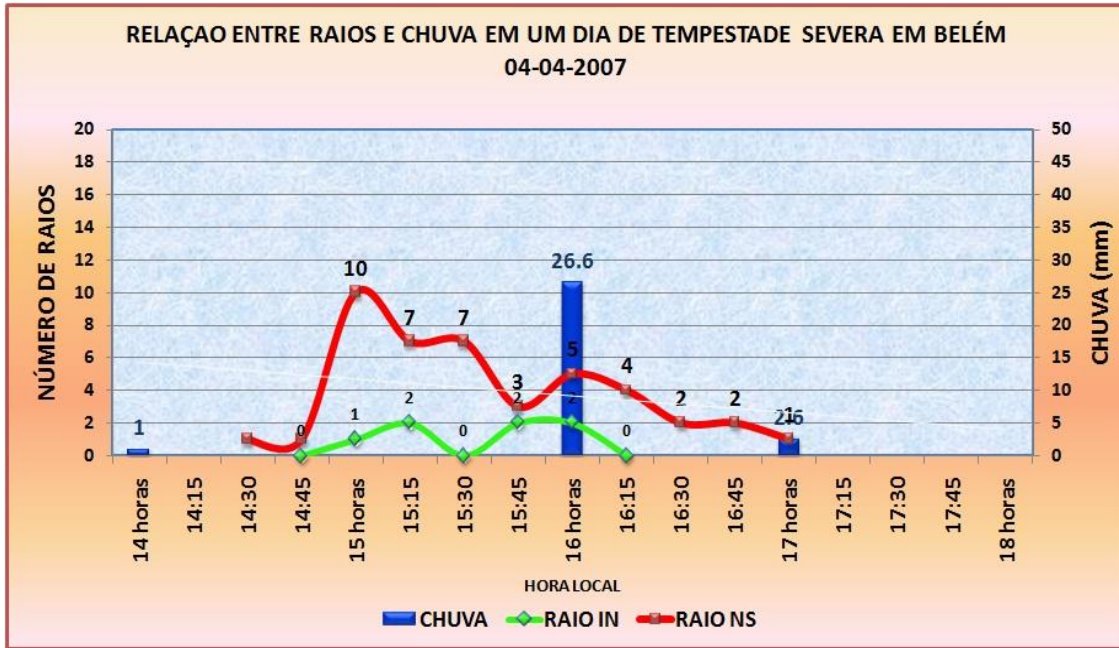
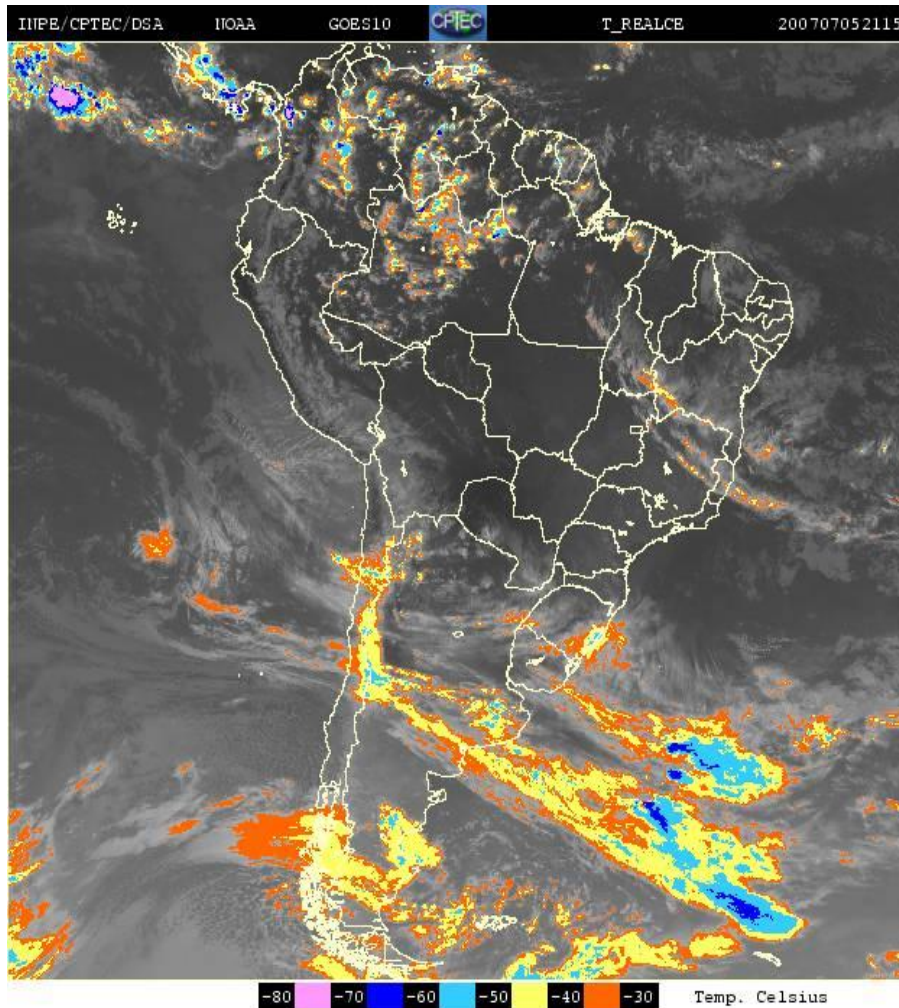


Figura 46 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 04 de abril de 2007. Os dados de chuva utilizados nesse dia são do INMET.

#### 4.1.3.6. Tempestade Severa em Belém ocorrida no dia 05/07/2007

##### 4.1.3.6.1. Análise Sinótica do dia 05/07/2007

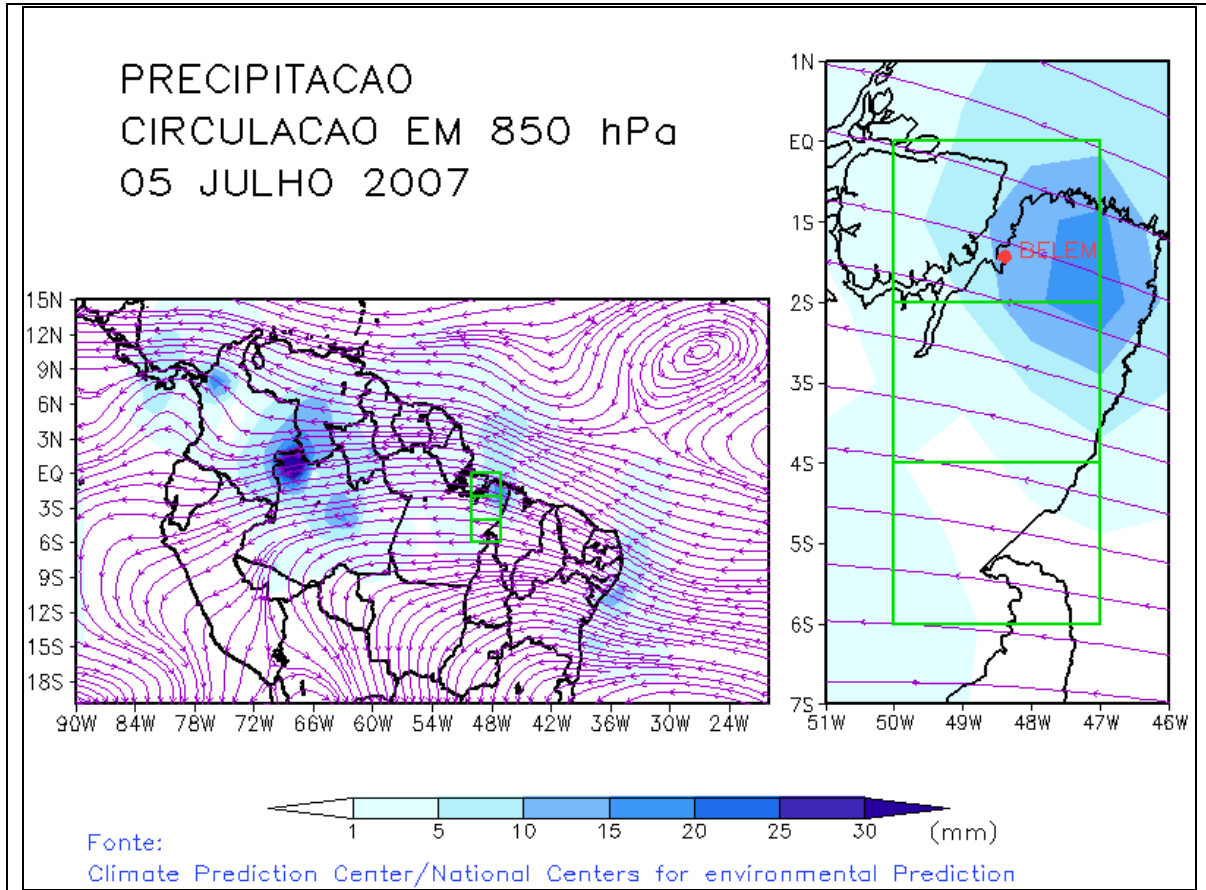
Na Figura 47 é mostrada a imagem de satélite GOES 10, no horário de 20:15z ou 17:15 HL, observa-se uma banda de nebulosidade proveniente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que encontra-se bem definida no dia 05 de julho de 2007. Ressalta-se a configuração de um acentuado cavado em altos níveis, associado à corrente de jato subtropical que atuou mais intensamente sobre a Região Sul (CLIMANALISE, 07/2007) influenciando a convergência na faixa litorânea e no Leste do Pará, proporcionando a formação de linhas de instabilidade, ocasionando chuva acompanhadas de raios em Belém, durante este dia



**Figura 47** Imagem do satélite GOES – 12 no canal infravermelho (realçada), pode se observar a presença da ZCIT, bem definida e um cavado em altos níveis na Região Sul do País.

#### 4.1.3.6.2. Precipitação e Circulação de Vento em 850 hPa, no dia 05/07/2007

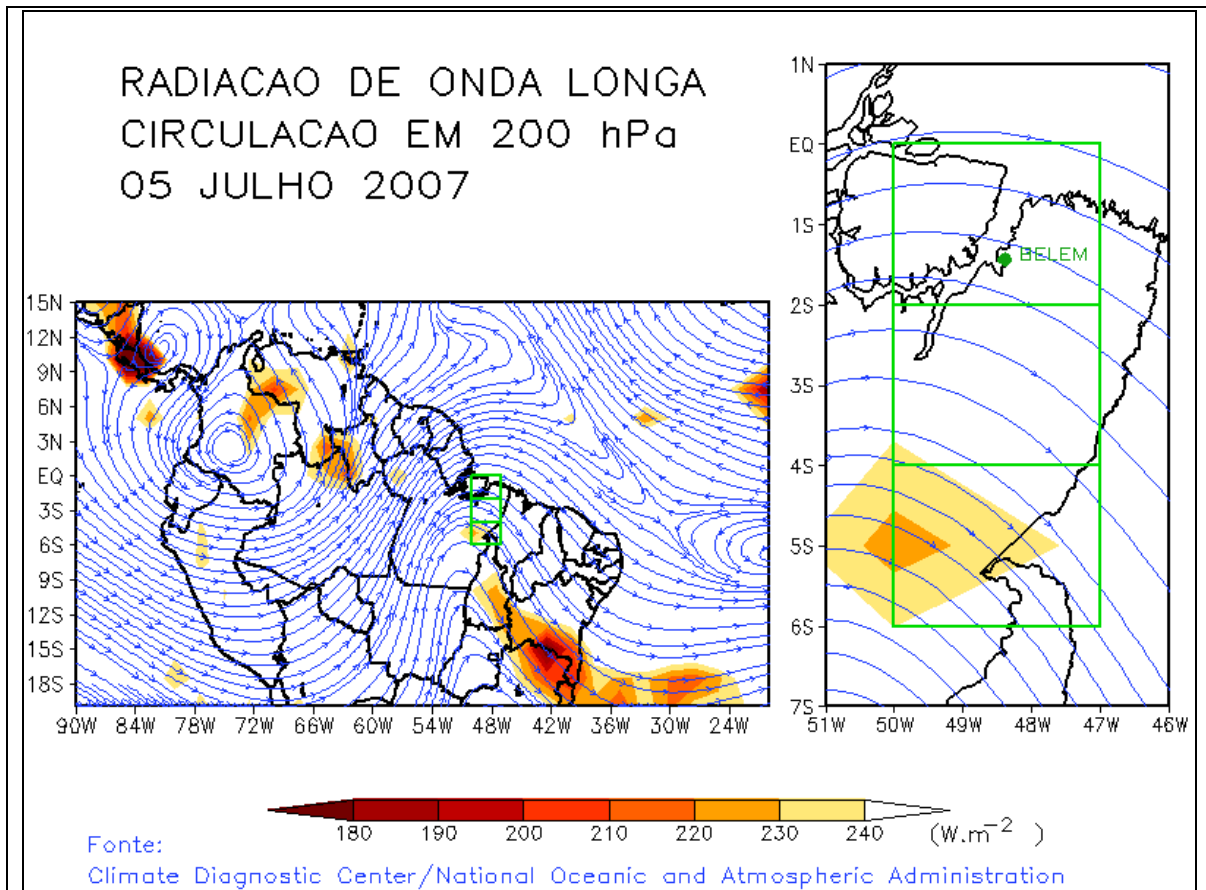
O mês de julho é um mês em que as chuvas em Belém, que sofrem uma grande variação espacial e temporal, principalmente por causa do aquecimento local, da brisa fluvial e pelo comportamento dos fenômenos meteorológicos de macro e meso escala que regulam a circulação geral sobre a região amazônica. Na Figura 48 são mostrados que a chuva ocorrida em Belém no dia 05/07/2007 estiveram associadas a presença da ZCIT e principalmente à propagação de Linhas de Instabilidade (LI's) que se originaram na região costeira de Belém costa e à formação de áreas isoladas de convecção devido ao aquecimento diurno, segundo dados do INMET, nesse dia choveu 25,8 mm às 19:00HL, acompanhada de 20 raios.



**Figura 48** Ventos em 850 hPa ( $m s^{-1}$ ) e precipitação durante o dia 05 de julho de 2007, na qual está evidente a influência da ZCIT

#### 4.1.3.6.3. Radiação de Onda Longa (ROL) e Circulação de Vento em 200 hPa , no dia 05/07/2007

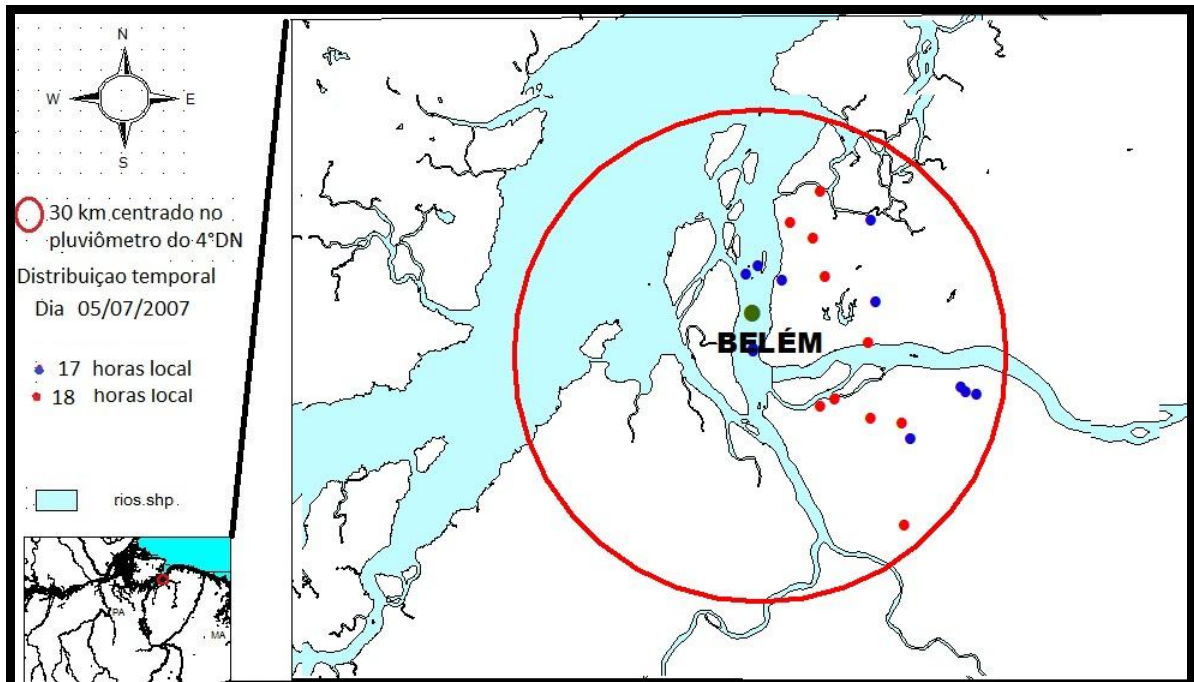
Na Figura 49 são mostradas a Radiação de Ondas Longas (ROL) e campo do escoamento e anomalia mensal do vento zonal em 200 hPa, no dia 05 de julho de 2007. Nesta figura, observa-se um cavado em altos níveis, que intensificou a convecção local, causando chuvas acompanhadas de raios.



**Figura 49** Ventos em 200 hPa ( $m s^{-1}$ ) e Radiação de Ondas Longas – ROL ( $W m^{-2}$ ) durante o dia 05 de julho de 2007, na qual está evidente a influência ,de um cavado atingindo o sul do Pará.

#### 4.1.3.6.4. Distribuição espacial e temporal dos raios no dia 05/07/2007

Na Figura 50 é mostrada a distribuição temporal dos raios, durante o dia 05 de julho de 2007, pode-se observar que a distribuição temporal dos raios é diferente dos dias analisados anteriormente, ficando difícil identificar de onde e para onde o sistema está se deslocando, pois apesar de identificarmos o horário dos raios, não ficou claro quanto a sua direção. Podemos dizer que os raios foram ocasionados por movimentos convectivos local.



**Figura 50** Distribuição temporal dos raios em um dia de tempestade severa em Belém no dia 05 de julho de 2007.

#### 4.1.3.6.5. Distribuição temporal dos raios e chuva no dia 05/07/2007

Na Figura 51 é mostrada a distribuição temporal dos raios e da chuva, ocorridos no dia 05 de julho de 2007, em Belém do Pará. Verifica-se que nesse dia foram detectados 20 raios nuvem-solo e 3 raios intra-nuvem. Observa-se que o horário de maior atividade elétrica ocorreu às 15:00 HL, com 10 raios nuvem-solo e 3 raios intra-nuvem.

Os dados de chuva analisados nesse dia foram do INMET sendo possível observar que em Belém o máximo de chuva ocorreu às 19:00 HL com 25,4 mm.



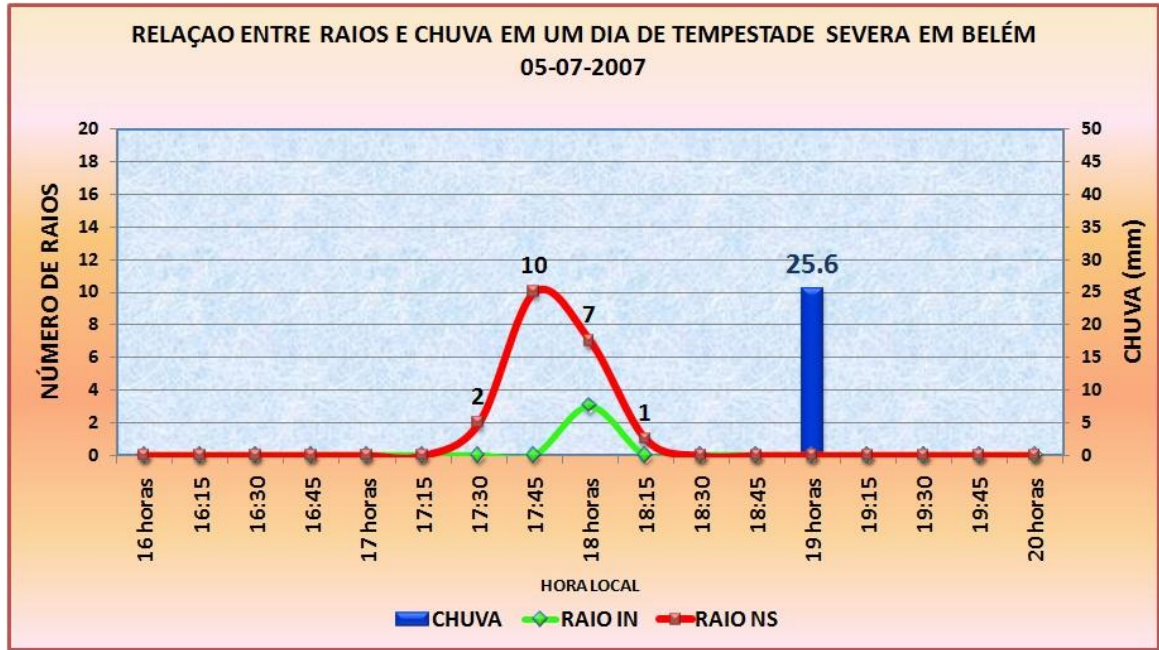


Figura 51 Relação entre raios e chuva em Belém no dia 05 de julho de 2007. Os dados de chuva utilizados nesse dia são do INMET

## 5 CONCLUSÕES

No Capítulo 3 na distribuição mensal da precipitação pode-se observar que março foi o mês mais chuvoso nas três áreas e o menos chuvoso foi em novembro, setembro e julho, na Área 1, 2 e 3, respectivamente. Quanto ao número de raios, o mês com maior número de raios detectados foi dezembro e os meses com menor número de raios foi em outubro (Área 1), julho (Área 1 e 2).

Na análise trimestral, DJF, período chuvoso, a área coberta por floresta teve maior média pluviométrica e o maior número de raios detectados, enquanto que área coberta por pastagens (Área 3) apresentou o menor índice pluviométrico do trimestre e a Área 1 é que obteve o menor número de raios desse trimestre.

Durante o trimestre MAM houve maior atuação da ZCIT e as LI's que se deslocaram para o interior da Amazônia ocorrendo com maior frequência entre os meses de abril à agosto (COHEN,SILVA DIAS e NOBRE,1989). Esses fenômenos meteorológicos de grande e meso escala, ocorridos durante esse trimestre, foram os principais causadores do grande volume de precipitação e raios, principalmente na Área 2, coberta por sua maior parte por floresta, teve o maior número de raios detectados nesse trimestre. Além dos fenômenos já citados, em abril de 2008, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) apresentou valores até 3°C abaixo da média adjacente à costa do Equador e norte do Peru, onde os alísios também estiveram ligeiramente mais intensos. Uma extensa área com anomalias negativas de TSM nas águas sub-superficiais foi observada no Pacífico Equatorial Leste. Esta configuração é indicativa do desenvolvimento do fenômeno La Niña (BOLETIM CLIMANÁLISE, abril/2008)

A distribuição espacial da densidade das descargas atmosféricas foi observada trimestralmente em todas as áreas, sendo que no trimestre DJF, a Área 1 apresentou pontos com maior densidade de raios (22 raios/km<sup>2</sup>). No trimestre MAM, a Área 2 apresentou maior densidade de raios (26 raios/Km<sup>2</sup>) que pode ter sido influenciada pela ZCIT e a Alta da Bolívia (AB) que durante o verão austral favorece a formação de um cavado em altos níveis da troposfera sobre o NEB que pode fechar-se, constituindo um vórtice ciclônico (VCAN), além de LI's.

No trimestre menos chuvosos JJA, destaca-se a Área 1 com pontos de máxima densidade de raios de 18 raios/km<sup>2</sup>, também observou-se neste trimestre aglomerados de raios contornando a borda da Ilha da Marajó, indicando uma área com grandes movimentos convectivos durante este trimestre. No trimestre SON a Área 3, que é uma área com 62% de pastos e/ ou área agrícola apresentou um aumento considerável no número de raios durante o período seco, iniciando em agosto com 12151 raios chegando a 37758 raios no mês de novembro de 2008 e tem uma densidade máxima de 18 raios/km<sup>2</sup> durante este trimestre. Também foram observados vários aglomerados de raios formando linhas de raios, provavelmente provenientes de grande convecção que podem ter causado as linhas de instabilidade, além de aglomerados convectivos já associados a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que provocaram uma grande quantidade de raios, principalmente no sudeste do Pará. A ZCAS parece ser mais eficiente na produção de raios, principalmente quando estão interagindo com outros sistemas meteorológicos.

A relação entre raios e chuva parece haver melhor correspondência nos meses menos chuvosos, conforme é mostrado na Figura 16, onde pode-se observar que as curvas de raios e chuvas seguem uma mesma tendência durante o período seco, em todas as áreas, enquanto que no período chuvoso nos meses de dezembro a fevereiro a frequência de ocorrência de raios diverge da chuva, os raios diminuem, enquanto que a chuva aumenta atingindo seu máximo em março, mas quando chega os meses de março a maio a tendência de ambos é diminuir. Isso é observado nas três áreas em estudo.

Nos estudos de caso de tempestades severas, as chuvas na área de estudo, sofrem uma grande variação espacial e temporal, principalmente por causa do aquecimento local, da brisa fluvial e pelo comportamento dos fenômenos meteorológicos de macro e meso escala que regulam a circulação geral sobre a região amazônica, que apresenta frequência máxima de ocorrência nos meses de dezembro e janeiro (QUADRO, 1994; FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998).

Foram analisados 13 dias com eventos de chuvas intensas em torno de Belém-PA, dos quais 12 encontram-se no período chuvoso e apenas um evento no período menos chuvoso. Desses 13 dias, foram selecionados os dias 11/12/2006, 09/01/2007, 14/02/2007, 02/03/2007, 04/04/2007 e 05/07/2007, para uma análise mais detalhada dos fenômenos meteorológicos causadores das chuvas intensas ocorridas nesses dias.

Em todos os dias analisados os eventos de raios ocorreram nos intervalos entre 13:00 e 19:00 HL. A corrente máxima ocorrida foi de 202 kA e a mínima foi de 10 kA e, todos os eventos de raios foram detectados com no mínimo 4 sensores, com exceção do dia 05 de julho que teve 12 eventos detectados por apenas 3 sensores.

Para todos os casos analisados, frequência de ocorrência de relâmpago atingiu 30-60 minutos antes da chuva intensa de eventos por hora. Sendo o evento do dia 05 de julho que teve o maior intervalo de tempo entre os eventos de raios e a máxima precipitação, os máximos de raios e chuva ocorreram com um intervalo de 01 hora e 15 minutos. Essa demora parece um parâmetro promissor a ser considerado, para um futuro sistema de alerta de ocorrência de chuva intensa em Belém.

O dia 11/12/2006 também teve um intervalo de 2 horas entre os máximos de chuva e raios, mas não se pode comparar com o dia 05/07/2007, pois entre os dois máximos foram detectados uma média de 70 raios a cada 15 minutos e houve registro de chuva das 13:00 HL até às 21:00 HL

Para uma análise local, pode-se dizer que as chuvas de Belém do dia 11/12/2006, foi resultantes das seguintes situações: em dezembro o grande volume de chuva desse dia foi originado pela interação da ZCIT, ZCAS e Alta da Bolívia que provocaram grande convergência de massa no NE do Pará. A interação desses sistemas provocou chuvas fortes com grandes quantidades de raios. No dia 09/01/2007 a existência de um VCAN sobre o NEB e a ZCAS. No dia 14/02/2007 a banda de nebulosidade da ZCIT interagindo com as brisas marítimas deram origem as linhas de instabilidade que se formam no período da tarde. No dia 02/03/2007 a chuva em Belém foi ocasionada pela ZCIT que se encontrava praticamente sobre o Equador com forte convergência de massa e um VCAN localizado no Norte da Bahia, aparentemente acoplado com a ZCIT. No dia 04/04/2007 um VCAN na região central do Brasil, um sistema frontal sobre o oceano Atlântico, além da circulação de brisa que favoreceu a formação de linhas de instabilidade, essa interação de sistemas foram o principal causador da tempestade ocorrida em Belém neste dia. O dia 05/07/2007 a ZCIT e um cavado em médios e altos níveis influenciaram o tempo no Leste do Pará, além dos efeitos convectivos locais, provocaram em Belém grande volume de chuva acompanhadas por raios.

Quando se observa a espacialização da hora de ocorrência dos raios, nota-se que os primeiros raios vem de nordeste em quase todos os dias, com exceção do dia 11/12/2006 que a chuva ocorrida em Belém teve influencia da ZCAS. No dia 05/07/2007 que não foi possível fazer essa identificação, possivelmente por se tratar de chuva provocada pela forte convecção local, provocando raios para todos os lados.

Observou-se também que quando há interação entre sistemas de grande escala, tanto a chuva quanto o número de raios aumentam consideravelmente, caso observado no dia 11/12/2006, onde há uma forte atuação da ZCAS.

Como em todos os casos estudados as máximas ocorrências de raios sempre antecedem o pico máximo da precipitação o que se faz pensar que esses raios estão vindo sempre a frente do sistema gerador

Quanto a polaridade foi observado que em 4 dos 6 dias observados, mais de 50% dos raios tiveram intensidade de corrente acima 30 kA e nos dias 02/03/2007 e 02/04/2007 apresentaram mais de 20% dos raios com intensidade acima de 75 kA. Isso mostra que os raios que caem sobre a região em estudo possuem intensidade de corrente alta, sendo 100% dos raios negativos no dia 02/03/2007 e 91% dos raios negativo no dia 02/04/2007.

De forma geral, percebe-se que o ciclo de precipitação e a ocorrência de raios estão ligados em função do aquecimento convectivo da superfície associado com a disponibilidade da umidade, atuação de sistemas de mesoescala, como LI's e brisa marítima que durante o período chuvoso ambos os sistemas interagem com a ZCIT, entre outros, tais como, efeitos da circulação local, pois as áreas em estudo apresentam superfícies diferentes. Área 1, apresenta uma grande quantidade de água e mangues, Área 2 tem sua maior parte coberta por florestas e a Área 3, possui sua maior parte coberta por pastos e/ ou áreas agrícolas. Essas diferenças dos tipos de superfície entre as áreas em estudo parece não ter muita influência sobre o número de raios que ocorrem sobre cada área. É provável que os sistemas meteorológicos sejam muito mais eficientes nessa produção de raios, principalmente quando há uma interação entre sistemas. Com isso, é possível que haja diferentes respostas na formação de nuvens e conseqüentemente na precipitação nestas áreas, sendo necessário um período maior de dados, incluindo a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), pois durante este estudo sentiu-se a necessidade das análises desses sistemas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C.; ROCHA, B. R. P. ; MONTEIRO , J.H.A. ; SOUZA, J. R. S. ; VIEIRA, G.R.; SOUZA, E.B. ; CUNHA, H.T.S. ; SOUZA, W.A.P. Lightning characteristics associated to severe rainfall events, around Belém PA Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, Foz do Iguaçu- SP [Anais...]. Foz do Iguaçu- SP: Institute of Electrotechnics and Energy of the University of São Paulo, v. 1. p. 57-60. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/2007>> . Acesso em ...
- ANAGNOSTOU, E.N.; CHRONIS.T. **The worth of long-range lightning observations on overland satellite rainfall estimation.** [S.l.]: Kluwer Academic Publishers,2004.(Book Chapter)
- AVISSAR R, DIAS PLS, DIAS MAFS AND NOBRE CA. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere experiment in Amazonia (LBA): insights and future research needs. **J.Geophys Research Atmosph** v, 97, p.2729–2742. 2002.
- BATTAN, L.J; J.B. Theiss. Measurements of Vertical Velocities in Convective Clouds by Means of Pulsed-Doppler Radar. **J.Atmosph. Sci** v.2 p.193-298, 1970.
- BALLAROTTI, M.G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida.** 140. (Não publicada). Dissertação (Mestrado em Geofísica) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos 2005.
- BYERS, H. R.; BRAHAM, R. R. **The thunderstorm.** Washington, DC: Weathe Bureau, 1949
- BOCCIPPIO, D. J., K. L. CUMMINS, H. J. CHRISTIAN, and S. J. GOODMAN: **Combined satellite- and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States.** **Mon. Wea. Rev.**v 129,p 108-122,
- BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests.** Rome: FAO, 1997.
- CAREY, L. D. et al Characteristics of cloud-to-ground lightning in severe and nonsevere storms over the central United States from 1989–1998. **Jornal. Geophys. Research.**, n**108**, p 4483. 2003.
- CAREY, L. D., MURPHY, M. J., MCCORMICK, T. L., DEMETRIADES, N. W. S.. “Lightning location relative to storm structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system”, **Jornal. Geophys. Research.**,v.110, D03105,
- CLIMANÁLISE, jan/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>> .acessado em 21/10/2008
- CLIMANÁLISE, fev/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>> .acessado em 12/12/2008

CLIMANÁLISE, mar/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>.acessado em 24/10/2008

CLIMANÁLISE, abr/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>.acessado em 14/06/2008

CLIMANÁLISE, mai/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>.acessado em 25/08/2009

CLIMANÁLISE, jun/2007.Disponive l< <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>.acessado em 20/09/2009

CLIMATE PREDICTION CENTER – CPC, 2008. Disponível em: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/wd52ws/AS/>.acessado em 15/5/2010

COELHO, C. A. S.; DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. Estudo climatológico sazonal da precipitação sobre o Brasil em episódio extremo da Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.14, n.1, p.49-65. 1999.

COHEN, J.C.P. **Um estudo observacional de Linhas de Instabilidade na Amazônia**. Dissertação de MSc em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, (INPE-4865-TDL/376) 1989.

COHEN, J.C.P., SILVA DIAS, M.A.F., NOBRE, A.C. **Enviromental Conditions Associated with Amazonian Squall Lines: A Case Study**; American Meteorological Society, Mon. Wea. Rev., v.123(11), 3163-3174,p. 1995.

COHEN, J. C. P.; SILVADIAS M. A.; NOBREC. A. **Aspecto climatológico das linhas de instabilidade na Amazônia**. Climanalise, Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos, São Paulo, Brasil, INPE/CPTEC, v. 4, n. 12, p.34-40, Dez. 1989.

COLGATE, S.A. Enhanced Drop Coalescence by Eletric Fields in Equilibrium with Turbulence. **Jornal. Geophys. Research** . v.72, p. 479-487. 1967.

DISSING, D., AND D. L. VERBYLA: Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation. **Can. J. For. Res.**,v.33, p.770–782. 2003.

FEITOSA, T.C. **Análise da sustentabilidade na agricultura familiar no sudeste paraense:o caso dos produtores de leite do Município de Rio Maria**. Belém:UFPA – Centro Agropecuário: Embrapa Amazônia Oriental, 2003. 167 f.

FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, v. 5, p. 36-45, 1990.

FISCH, G; MARENGO, J. A. & NOBRE, C. A. **Clima da Amazônia**. Revista Climanálise, 1996.

FISCH, G.; MARENGO, J. M.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v.28, n.2, p.101-126. 1998.

- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1, p.19-28. 1986.
- GANDÚ, A.W., COHEN, J.C.P., SOUZA, J.R.S. **Simulation of Deforestation in Eastern Amazonia Using a High-Resolution Model**. Theoretical and Applied Climatology, Accepted, to be published in, England, 2004.
- GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (eds.) Amazonian deforestation and climate. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 611 p., 1996.
- GIN, R.B.B.; PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A.; DINIZ, J.H.; CARVALHO, A.M. Study on the identification parametera of atmospheric discharges in the southeastern Brazil. **IV International Seminar on Lightning Protection**, São Paulo, Brasil, September, p.8-12, 1997.
- GOMES, M. A. S. S. **Estudo dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil em função das características geográficas** / M. A. S. S.Gomes. – São José dos Campos: INPE.149p. (INPE-10055-TDI/889). 2002.
- GRENET G. Essai d'explication de la charge electrique des nuages d'orages. **Annales Geophysicae**, v.3, p.306-307, 1947.
- GUNGLE, B.; KRIDER, E. P.. (2006). "Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms". **Jornal. Geophys. Research.**, 111, D19203, 2005.
- HEILMANN, A.; MORALES, C. A. R.. **Avaliação do sistema de detecção de descargas atmosféricas em vlf - zeus no brasil**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia - XIV, 2006, Florianópolis. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- HISER, H.W. **Sferics and Radar Studies of South Florida Thunder Storms**.**J.Applied. Met.** v.12, p 4479-483. 1973.
- HOFFERT, N.H. 1989. Intermittent Lightning, Phil. Magazine Scr.5, v.28, n.171, 106-109.
- HOMMA, A. K. O. **Historia da Agricultura na Amazonia**. Brasilia: Embrapa, 2003. 274 p.
- HUFFINES, G.; ORVILLE, R. E. Peak Current Variations in Cloud-to-Ground Lightning over the Continental United States: 1995-1999, submetido ao **Journal Geophysical Research**, 2001.
- IBGE.-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- 1992. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Rio de Janeiro, Diretoria de Geociências/Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1).
- IPCC- Intergovernmental Panel On Climate Change). **Climate Change**. 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. acessado em dezembro de 2009.
- IPCC- Intergovernmental Panel On Climate Change, AR4, WGI Report. Cambridge Univ. Press. . 3/08-Comuniweb ] 2007.
- KITAMURA, P.C. **Amazônia e o desenvolvimento sustentável**. São Paulo, Embrapa, p.30-165.169 1993.



KITAMURA, P.C. Agricultura Sustentável no Brasil: avanços e perspectivas. **Ciencia & Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.7-28, 2003.

KOUSKY, V. E. **Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil**. *Monthly Weather Review*, v. 108, n. 04, p. 488 - 498, Abr. 1980.

KOUSKY, V. E.; Kayano, M. T. “A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. **Acta Amazônica**, v.4, p. 743-758, 1981  
[www.aeroclubedetatui.com.br/index.php/downloads/category/liversos?download=19%3Ao-mecanismo-de-formao...nuvens](http://www.aeroclubedetatui.com.br/index.php/downloads/category/liversos?download=19%3Ao-mecanismo-de-formao...nuvens)

LEE, A.C.L..An experimental study of the remote location lightning flashes using a VLF arrival time difference technique, **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.112, p.203 – 229.1986.

LEE, A.C.L. The Limiting Accuracy of Long Wavelength Lightning Flash Location, **American Meteorological Society**, v.6, p43 – 49.1989.

LESSA, L.A.S., ROCHA, B.R.P., SOUZA, J.R.S., ALMEIDA, A.C., MONTEIRO, J. H.A. **Lightning Strikes Along an Electric Energy Transmission Line in Belem-PA-Brazil**. In: Ground & 3d International Conference on Lightning Physics and Effects, 2008, Florianopolis, Brasil. Conference Proceedings on Ground 2008 & 3d Lpe, 2008. p. 512-514.2008.

LIEBMANN, B.; SMITH, C. A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, p.1275-1277. 1996.

LUDLAM, F.H. **Cumulus and Cumulonimbus Convection**. *Tellus V*, XVIII, n.4. p.687-698. EUA: 1996

MACGORMAN, D. R., RUST, W. D., KREHBIEL, P., RISON, W., BRUNING, E., WIENS, K.. “The electrical structure of two supercell storms during STEPS”. **Mon. Wea. Rev.**, v.133, p. 2583–2607, 2005.

MAGONO, C. Thunderstorms. Amsterdam: Elsevier, 261 p. (**Development in Atmospheric Science, 12**). 1980.

LOPES, MARCIO NIRLANDO GOMES , Aspectos Regionais da Variabilidade de Precipitação No Estado Do Pará: Estudo Observacional e Modelagem Climática Em Alta Resolução. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – **Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA**, Belém, 2009.

MASON, B. J. The generation of electric charges and fields in thunderstorms. **Proceedings of the Royal society A**, v. 415, p. 303-315, 1988.

MOLION, L. C. B.: Climatologia dinâmica da Região Amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2, 107-117. 1987.

MOLION, L. C. B., : Amazonian rainfall and its variability. In: Hydrology and Water Management in the Humid Tropics, Ed., p.p. 99-111, **Cambridge University Press**, 1993.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P.K.R. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. New York, **Agroforestry Systems**. v.61, p.281-295, 2004.

NACCARATO, K. P. Estudo de Relâmpagos no Brasil com Base na Análise de Desempenho do Sistema de Localização de Tempestades. São José dos Campos, 165 p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2001.

NACCARATO, K. P. *et al.* Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, p. 71-74, 2003.

NECHET, D. Dias de Trovoadas na Amazônia. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia e II Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia. Vol. 1, pp. 184-187, Belo Horizonte - MG, 1994.

NIMER, E.; Climatologia do Brasil, Rio de Janeiro, IBGE, 1979.

NOBRE, C.A. et al. Mudanças climáticas e Amazonia. **Ciencia e Cultura**, Campinas, v.59, n.3,p.22-27, 2007.

OLIVEIRA, A.P ; FITZJARRALD,D.R.;The Amazon River Breeze and the Local Boundary Layer. Observações **Boundary Layer Meteorology**, 63(1-2) 141-162, 1993.

ORVILLE, R.E & BERGER, K. 1969. An Unusual Lightning Flash Initiated by an Upward Propagating Leader, **Journal of Geophysical Research**, v.78, n. ,21, 1969.

ORVILLE, R. E. Lightning ground flash density in the contiguous United States – 1989, **Monthly Weather Review**, 119, 573-577, 1991.

ORVILLE, R. E. Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the contiguous United States: 1989-1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 99 (D5): 10833-10841, May 1994.

ORVILLE, R. E., AND A. C. SILVER, 1997: Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95. **Mon. Wea Rev.**, 125, 631-638. 1997.

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G.; GAMMON, J. N.; ZHANG., R.; ELY, B.; STEIGER. S PHILLIPS, S.; ALLEN, S.; READ, W. Enhancement of Cloud-to-Ground Lightning over Houston, Texas. **Geophysical Research Letters**, v.28, n.13, p. 2597 , 2600, 2001.

PINTO JR., O., PINTO, I.R.C.A., DINIZ, J.H., CAZETTA FILHO, A.,CARVALHO, A.M., CHERCHIGLIA, L.C.L., AMORIN, G.E.,. A long-term study of the lightning flash characteristics in the southeastern Brazil 1. Flash density and polarity. Proceedings of the International Conference on Lightning Detection. GlobalAtmospherics, Inc., Tucson, AZ.2000.

PINTO, I.R. C.A.; PINTO JR., O.; GIN, R.B.B.; DINIZ, J.H.; ARAÚJO, R.L.; CARVALHO, A.M. A coordinated study of a storm system over the south American continent 2. Lightning-related data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D16, p. 18205-18213, Nov.1992.

PINTO JR. O. ; PINTO, I. R. C. A.; GIN, R.B.B.; MENDES JR., O. A coordinated study of a storm system over the south american continente 1. Weather information and quasi-dc stratospheric electric field data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D16, p. 18195-18204, Nov.1992. Gewehr, 1996).

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. Relâmpagos. São Paulo: **Brasiliense**, 1996.

PINTO JR,O; Pinto, I.R.C.A.;”Tempestades e Raios no Brasil” In: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE- São José dos Campos- SP ,2000.**

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR, O.; SANTOS, M. A. S. ; NACCARATO, K. P. ; FERNANDES, W. A. ; FERRAZ, E. C.. Lightning research in Brazil: recent results 2. indirect measurements. In: 12th **International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE)**, 2003, Versailles. Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity, 2003.

PINTO, JR. O., GARCIA, S. A. M., The Brazilian Integrated Lightning Detection Network – RINDAT the third largest network in the world, **II Workshop RINDAT – GROUND.2004.**

PRICE, C. Lightning, atmospheric electricity and climate change. In: **Annual meeting symposium on global electrical circuit, global change and the meteorological applications of lighting information**, 1994, Boston, MA. Proceedings. Boston, MA: USDOE/National Aeronautics and Space Administration,. UCRL-JC--115035; CONF-940139--1; Other: ON: DE94002003. 1994.

RAKOV, Vladimir A. and UMAN, Martin A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University Press, 2003.

RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with Southern oscillations. **Theoretical and Applied Climatology**, New York, v. 42, p.81-91, Jun. 1990.

REAP, R. M. Evaluation of cloud-to-ground lightning data from the Western United States for the 1983-84 summer seasons. **Journal of Applied Meteorology**, v. 25, n. 6, p. 785-799, 1986.

RIBEIRO, W. M. N.**Efeitos de Descargas Elétricas na Rede Externa nos Índices Operativos do Sistema Telefônico de Belém no período 95-97.** In: XIV Seminário de Redes Brasília EXPO CENTER, BRASÍLIA. XIV Seminário de Redes Brasília EXPO CENTER, 1998. p. 310-321.1998.

RIBEIRO, W..M.N., SOUZA, J. R. S., SILVA., ALMEIDA,R,M,B, SOUSA,J.R.A., MONTEIRO,J.H. A, ROCHA B. R. P., CUNHA,H,T,S. Análise das Distribuições Horárias de Raios e Chuvas em Belém-PA.XV **CBMET-Congresso Brasileiro de Meteorologia São Paulo - SP,2008.**

ROCHA, B. R. P. , SOUZA, J.R.S . ,CONDE, C. L. R., Neves, A. J. A., Rocha, A. O. **Efeitos de descargas elétricas no sistema de distribuição de Belém -IV SIMOPA Seminário Integrado de Manutenção, Operação e Administração, 20-24 de out/96.**

ROCHA, B. R. P, J. R. S. SOUZA, I. M. O. SILVA, A. X. S. ARAÚJO. “Estimativas de Precipitação através da Frequência de Raios Nuvem-Solo, em Belém”. **Anais do V**

**Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**, v.2, p.1163-1166, São Paulo - SP, 1997.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; SILVA, I. M. O.; ARAÚJO, A. X. S. Estimativas de precipitação através da frequência de raios nuvem-solo, em Belém. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBGf, 1997a. v. 2, p. 1163-1166.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; SILVA, I. M. O.; COSTA, J. M. Precipitation estimates from an electromagnetic lightning detector data in radiofrequencies. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, 1997, Natal. **Proceedings...** Natal: [s.n.], 1997b. v.2, p. 655-659.

ROCHA, B.R.P.; ANDRADE JR, J.G.; RIBEIRO, W.M.N.; SANTOS, M.M.N.; SOUZA, J.R.S. Efeitos de descargas elétricas nuvem-solo no sistema telefônico de Belém no período 95-96. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 1., 1988. **Proceedings** Belo Horizonte-MG: v. 1, p. 89-92, Belo Horizonte - MG, 1998.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; PEREIRA, C. S.; MOTA, G.V.; ROCHA, E. J. P; LOBATO, M. P.; LESSA, L.A.S.; MONTEIRO, J.H.A. Lightning characteristics time distribution over four locations in Eastern Amazonia. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: Institute of Electrotechnics and Energy of the University of Foz do Iguaçu - São Paulo, 2007. v. 1. p. 31-34.2007.

ROOHR, P.B.; VONDER HAAR, T.H. A Comparative Analysis of the Temporal variability of lightning observations and GOES imagery. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, p. 1271-1290. 1994.

SABA, M. M. F. et al. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. L23807, p. 1-4. 2006.

SAMPAIO, S.M. N; WATRIN, O.S.; VENTURIERI, A. Dinâmica da cobertura vegetal e uso da terra do polígono dos castanhais no sudeste paraense. Belém: **Embrapa Amazônia Oriental**, 2000. 38 p. (Série Documentos, n. 31).

SANTOS, A. **Análise das tendências da chuva e das temperaturas extremas na região de Belém-PA**, 124 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia)-Universidade de São Paulo –Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP-ESALQ, São Paulo, 1993.

SERRA, A. Trovoada e névoa seca. **Boletim Geográfico**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 255, p. 142-163.1997.

SHIGIHARA, M. **Avaliação de Correntes de Descargas Atmosféricas Através de Medições Diretas em Estruturas**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (IF, FEA, EP, IEE) da USP. São Paulo, 2005.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. A case study of convective organization into precipitating lines in the southwest Amazon during the WETAMC and TRMM-LBA. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, Sep. 2002.

SILVEIRA, R. **Operational use of lightning detection methods - report on the operational use of lightning detection methods in Brazil**. Expert Team on Remote

Sensing Upper-Air Technology and Techniques - World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland, 2005.

SORIANO, L. R.; DE PABLO, F.; DÍEZ, E. G. Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. **Monthly Weather Review** 129: pp. 2998-3003. 2001.

SOUZA, J.R.S.; ROCHA, B.R.P.; CARRERA, G.T. Lightning observation (and applications) around Belém, during the 1995-1998 period. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., 1999, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: [s.n.], 1999. v. 1, p. 17-21.

SOUZA, J.R.S.; ROCHA, B.R.P.; COSTA, J.M.; DUTRA, S.L.G. Características dos Eventos de Raios Nuvem-Solo e sua Distribuição em Área no Leste do Pará. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo - SP, 1997. v. 2, p. 1152-1155.

SOUZA, J.R.S.; ROCHA, E.J.P.; COHEN, J.C.P. **Avaliação dos Impactos Antropogênicos no Ciclo da Água na Amazônia.** Capítulo 4 In: Problemática do Uso Local e Global da Água da Amazônia. Org. Aragon L.E.; Clüsener-Godt, M. EDIÇÕES UNESCO BRASIL, Brasília - DF, p. 69-94, 2003.

SOUZA, E. P. P. de. **Relações entre as anomalias de tsm do atlântico e pacífico e as precipitações na amazônia oriental.** 80 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. 2004.

TUCCI, C.E.M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2 n.2 p5-12 1997.

UMAN, Martin A. and KRIDER, E Philip. Natural and artificially initiated lightning. **Science**, USA, v 246, Issue 4929, p. 457-464. 1989.

UMAN, M. A.: The Lightning discharge. [S.l.]: Academic Press, 1987. 377 p.

UMAN, M. A.; KRIDER, E P. Natural and artificially initiated lightning. **Science**, USA, v. 246, Issue 4929, p. 457-464. 1989.

VEIGA, J.B. da. Reabilitação de áreas de pastagens degradadas. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE REABILITAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS E FLORESTAS SECUNDÁRIAS NA AMAZÔNIA. 1993, Santarém, Pará. **Anais...** Rio Piedras: Instituto Nacional de Florestas Tropicais/USDA Serviço Florestal, Belém: Embrapa-CPATU 1995. p.191-200.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa: UFV – Imprensa Universitária. 337 p.1991.

VIEMEISTER, N. F. Intensity discrimination of pulsed sinusoids: the effects of filtered Noise, **J. Acoust. Soc. Am.** 51, 1265-1269.1972.

VISAGRO FILHO S. **Descargas atmosféricas:** uma abordagem de engenharia. v. 822d, p.19, 2005.

VOLLAND, H., CRC Handbook of atmospheric. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1982.

VONNEGUT, B. Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. **Geophysical Research Papers**, v.42, p.169-181. 1955.

WANG, K. Y.; LIAO, S. A. Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2-4 severe convective system over Taiwan area. **Journal of Geophysical Research**, v.111, D05206, in press, 2006 (SCI).2004.

WILLIAMS, E.R.; STANFILL, S. The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. **Comptes Rendus—Physique**, v. 3, p. 1277-1292. 2002.

ZAWADZK, I.; RO, C.U. Correlations between maximum rate of precipitation and mesoscale parameters. **J.Appl. Meteor.**, v.17, p. 1327-1334. 1978.

ZHOU, J.; LAU, K. –M. Does a monsoon climate exist over South America **Journal of Climate**, v.11, n.5, p.1020-1040. 1998

<http://hidroweb.ana.gov.br/> . Acessado em 22/01/2008

<http://www.pweletronica.com.br/artigos.php?id=10>

<http://www.sipam.gov.br/portal/> acesso em 23/04/08 as 21:00 horas

<http://www.zeus.iag.usp.br> acesso em 23/04/08 as 18:00 horas

<http://www.rindat.com.br/> acesso em 23/04/08 as 23:00 horas