

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE POS GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE - CLIAMB

**A RELAÇÃO ENTRE RAIOS E CHUVAS NOS ARREDORES DE MANAUS :
ANÁLISE DE CASOS EXTREMOS**

JOSIEL DA CUNHA SILVA

MANAUS, AMAZONAS
SETEMBRO - 2013

JOSIEL DA CUNHA SILVA

**A RELAÇÃO ENTRE RAIOS E CHUVAS NOS ARREDORES DE MANAUS :
ANÁLISE DE CASOS EXTREMOS**

PRAKKI SATYAMURTI

Brigida Ramati Pereira Rocha

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

MANAUS, AMAZONAS

SETEMBRO, 2013

O segredo da sabedoria é jamais conhecer tudo,
pois ela tende ao infinito.

Josiel Silva

Agradecimentos

Agradecer, não é tão simples, pois a quantidade de pessoas, que durante essa fase da minha vida, me ajudaram, não cabe nesse trabalho.

Mas é claro que a Deus, que me deu a vida e me manteve saudável até aqui, não posso esquecer de agradecer.

A meus pais que pacientemente me educaram.

A minha irmã Bete Livia, que sempre me apoiou nos momentos de dificuldades.

A minha amiga Fabiana pelo apoio logístico e diário durante quase dois anos.

A meus amigos Igor e Gustavo pela generosidade em me ensinar o que sabiam.

A meu irmão Joel pelo apoio emocional e financeiro.

A meu orientador Professor Dr. Prakki, pelos tão generosos ensinamentos.

A minha co-orientadora Professora Dr^a Brigida Rocha, pois sua ajuda foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

A minha querida amiga Wanda pela importante contribuição.

A FAPEAM pelo apoio financeiro tão importante nessa etapa da minha vida.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram até aqui, o meu muitíssimo obrigado.

S586	<p>Silva, Josiel da Cunha. A relação entre raios e chuvas nos arredores de Manaus : análise de casos extremos / Josiel da Cunha Silva. --- Manaus : [s.n], 2013. il. color</p> <p>Dissertação (Mestrado) --- INPA/UEA, Manaus, 2013. Orientador : Prakki Satyamurti. Coorientador : Brigida Ramati Pereira Rocha Área de concentração : Interações Clima-Biosfera na Amazônia.</p> <p>1. Raios. 2. Descargas Elétricas Atmosféricas. 3. Chuva - Amazônia. I. Título.</p> <p>CDD 551.561</p>
------	---

Resumo

Este trabalho relaciona a ocorrência de raios e precipitação, na Amazônia Central, mais especificamente nos arredores da cidade de Manaus, no período compreendido entre dezembro de 2008 a novembro de 2011, numa área quadrada com 16 quilômetros de lado, centralizada em uma estação meteorológica localizada geograficamente a $2^{\circ} 36'' 32''''$ S de latitude e $60^{\circ} 12'' 33''''$ W de longitude. Os dados de chuva foram fornecidos por pluviômetro localizado na estação supracitada, gerenciada pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Os dados de raios são de responsabilidade da Sferics Tracking and Ranging Network (STARNET), uma rede de detecção de raios operada pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade Estadual de São Paulo (IAG-USP), escolhida por ter uma ampla cobertura global. A escolha do tamanho da área se deve ao fato do erro de localização da STARNET ser de, em média 8 (oito) quilômetros,. Como a área escolhida tem o dobro desse tamanho, temos então uma melhor eficiência nos resultados obtidos do processamento os dados de descargas elétricas atmosféricas(raios). Foi realizada uma análise de regressão entre as variáveis raios e chuvas, em diferentes escalas temporais. Dentre essas análises estão discriminadas períodos chuvosos e menos chuvosos, onde verificou-se que os coeficientes de correlação e determinação são sensivelmente maiores para os períodos de menor incidência pluviométrica, comparado aos períodos com mais chuva, indicando, nessa situação, a existência de uma relação mais direta entre os raios detectados e a chuva pluviometricamente medida, na área de estudo em questão. Os casos extremos foram também analisados estatisticamente através de gráficos de dispersão.

Palavras chave: Raios, Descargas Elétricas Atmosféricas, Chuva, Amazônia

Abstract

This work relates the occurrence of lightning and precipitation in the Central Amazon , more specifically around the city of Manaus, from December 2008 to November 2011 in a square area with 16 km radius centered at a meteorological station located geographically 2° 36 '32" S lat and 60 ° 12' 33" W long. The rainfall data were provided by the rain gauge located at the station mentioned above, managed by the Institute for Amazonian Research (INPA). The lightning data are the responsibility of STARNET a lightning detection network operated by the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, State University of São Paulo (IAG-USP), chosen to have a wide global coverage. The choice of the size of the area is due to the error location STARNET be on average eight (8) kilometers. As the chosen area is twice that size, so we have a better efficiency in the results obtained from processing the data of atmospheric electrical discharges (lightning). A regression analysis between variables rays and rainfall at different time scales was performed. Among these analyzes are detailed rainy and less rainy periods, where it was found that the coefficients of correlation and determination are significantly higher for periods of reduced rainfall incidence, compared to periods with more rain, indicating, in this situation, the existence of a relationship more direct between the detected rays and rain measured in the study area in question. Extreme cases were analyzed statistically using scatter plots.

Keywords : Lightning, Atmospheric Electrical Discharges, Rain, Amazon

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	14
1.1-Justificativa do Estudo	16
1.2-Hipóteses	20
2 – OBJETIVOS	21
2.1-Objetivo Geral	21
2.2-Objetivos Específicos	21
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1-Precipitações na Amazônia	22
3.2-Sistemas Precipitantes Produtores de Tempestades	23
3.2.1 – Zona de Convergência Intertropical	23
3.2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul	24
3.2.3 – Linhas de Instabilidade	25
3.3-Nuvens de Tempestades	26
3.4-Eletrificação das Nuvens de Tempestades	27
3.4.1 –Modelo do Dipolo e Tripolo Eletrostático	27
3.4.2 – Processo Colisional Indutivo	29
3.4.3 –Processo Colisional Termoelétrico	30
3.4.4 – Processo Macrofísico Gravitacional	31
3.4.5 –Processo Macrofísico Convectivo	31
3.5-Formação das Nuvens de Tempestades	32
3.6 – DESCARGAS ELÉTRICAS NA ATMOSFERA	34
3.7 –SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS	37
3.7.1-A Rede Starnet – Sferics Tracking and Ranging Network	37
3.7.2-Imagens com distribuição dos Raios obtidas pela Rede Starnet	39
3.8 – ANÁLISE DE REGRESSÃO	40
3.8.1 – Diagramas de Dispersão	41

3.8.2 – Coeficiente de Correlação-----	42
3.8.3 – Coeficiente de Determinação-----	43
4 – MATERIAIS E MÉTODOS-----	44
4.1- Localização da Área de Estudo-----	44
4.2 – Caracterização da Área de Estudo-----	46
4.3 – Coleta e Tratamento dos Dados de Precipitação-----	47
4.4 – Coleta e Tratamento dos Dados de Descargas Elétricas-----	49
4.5 – Processamento do par Dados Chuvas versus Raios-----	51
4.6 – Construção dos Gráficos de Regressão-----	51
4.7 – Tratamento dos Dados para o Estudo de Casos extremos-----	52
4.8 –Distribuição dos Raios na Área de Estudo-----	53
4.9 – Análise dos Dados-----	53
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES-----	54
5.1-Média Mensal de Precipitação-----	54
5.2 - Quantidade Total de Descargas Elétricas na Área de Estudo-----	56
5.3 – Relação entre Raios e Chuvas na Área de Estudo-----	60
5.3.1-Distribuição Mensal de Raios e Chuvas na Área de Estudo-----	60
5.3.2-Distribuição Trimestral de Raios e Chuvas na Área de Estudo-----	62
5.4.-Análise de Regressão de Chuvas e Raios-----	66
5.4.1-Períodos Chuvosos e menos chuvoso-----	66
6 – CONCLUSÃO-----	72
7 – REFERÊNCIAS -----	73

Lista de Figuras

Figura 01 – Os danos causados por raios no Brasil, onde verifica-se que em 2008 ocorreu um pico de 160 eventos.	19
Figura 02 – A climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) referente ao período de 1961 a 1990.	23
Figura 03 – A temperatura de brilho média obtida pelo satélite GOES-12: de 01/jan a 08/jan de 2006.	25
Figura 04 – Visualização do modelo de tripolo eletrostático, onde se verifica que os perfis verticais de E indicam uma terceira região de cargas, sendo essas cargas positivas entre os níveis 0 e -10°C.	28
Figura 05 – Visualização do processo colisional indutivo de separação de cargas	29
Figura 06 – Visualização do processo termoeletrico de separação de cargas	30
Figura 07 – Visualização do transporte de cargas segundo a teoria gravitacional.	31
Figura 08 - Visualização do transporte de cargas segundo a teoria convectiva	32
Figura 09 - Esquema de uma tempestade de célula simples em três estágios de desenvolvimento (a) estágio de cumulus, (b) estágio maduro, e (c) estágio de dissipação. As isotermas de 0° e -40° estão indicadas em cor laranja	33
Figura 10 - Desenho esquemático simplificado dos tipos de relâmpagos que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo	35
Figura 11 - Localização dos sensores de VLF da rede ZEUS	39
Figura 12 - Imagem de GOES-10 +METEOSAT-08+ STARNET com o número de Raios na América do Sul no dia 11/02/2009	40
Figura 13- Diagrama de dispersão que relaciona peso e altura de um produto agrícola(13-a), onde verifica-se uma relação positiva (quanto maior a altura , maior será o peso), e uma correlação negativa entre preço e colheita(13-b)desse mesmo produto, indicando que quanto maior for a colheita, menor será o preço.	42
Figura 14 – Localização da área de estudo situada a aproximadamente 60 km de Manaus	45

Figura 15 – Visualização do pluviometro EM – ARG 100 instalado na torre experimental K34, onde observa a grande distancia até o chão(51,3m)	48
Figura 16 – Média mensal de precipitação cujos meses com maiores e menores incidência de chuvas estão adequado à climatologia da região onde fica a área de estudo	50
Figura 17 – Ilustração dos episódios de ZCAS no dias 04 a 08(a) e 20 a 24(b), através da temperatura de brilho médio obtida pelo satélite GOES-10, onde verifica-se na figura b uma atuação mais intensa desse sistema sobre a área de estudo	54
Figura 18 – Um sistema convectivo se intensificando nas proximidades da área de estudo no dia 28 de agosto de 2009 às 16:00(HL) , momento coincidente com a intensa incidência de 434 raios	55
Figura 19 – Quantidade total de raios na área de estudo, onde verifica-se que no mês de agosto de 2009 houve uma quantidade muito acima da média do período	57
Figura 20 – Distribuição espacial dos raios na área de estudo durante os 3 anos, onde observa-se uma homogeneidade na distribuição espacial das descargas elétricas	58
Figura 21 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2009, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 7 meses	59
Figura 22 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2010, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 4 meses, e no mês de abril a relação entre chuvas e raios é bem mais direta que nos outros meses	61
Figura 23 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2011, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 5 meses	61
Figura 24 – Distribuição trimestral entre raios e chuva no ano de 2009, onde se pode observar uma pequena variação de chuvas nos primeiros trimestres e uma grande variação de descargas elétricas nos dois últimos semestres do ano	62
Figura 25 – Distribuição trimestral de raios e chuvas para o ano de 2010, onde se vê uma inversão no período chuvoso e uma relação direta no período seco	63
Figura 26 – Distribuição trimestral de raios e chuvas no ano de 2011, onde percebe-se que o período chuvoso acompanha a mesma tendência dos outros anos.	64
Figura 27 – Analise de dispersão para o período chuvoso de 2009, onde percebe-se que 48% da variabilidade dos raios neste período estão diretamente relacionados com as variabilidade das chuvas	65

Figura 28 – Analise de dispersão do período seco de 2009, mostrando que 85% da variação dos raios são explicadas pela variação das chuvas neste período	67
Figura 29 – Analise de regressão do período chuvoso de 2010, onde verifica-se uma correlação muito fraca e negativa	67
Figura 30 – Analise de regressão dos pares de chuvas e raios para o período seco do ano de 2010, onde percebe-se poucos pontos mais bem relacionados entre si	68
Figura 31 – Analise de dispersão para o período chuvoso de 2011, mostrando uma fraca e negativa correlação	69
Figura 32 – Análise de dispersão do período seco de 2011, concordando com os períodos menos chuvosos dos outros anos	70
Figura 33 – Numero de descargas elétricas de 1998 a 2000 em localidades na Amazônia, distribuídas entre períodos seco e chuvoso, onde se percebe que além de Manaus, no Amapá, em São Gabriel e em Tabatinga há uma maior distribuição de DEAs no período seco comparada ao período chuvoso. Fonte: Adaptada de Teixeira et al.	71

1 – INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior ocorrência de descargas elétricas atmosféricas (DEA) do planeta. Isto se deve à sua grande extensão territorial e ao fato de estar localizado numa região predominantemente tropical. A região Amazônica se destaca também por apresentar um dos maiores índices ceráunicos do mundo. Isso era esperado, em decorrência da formação frequente de nuvens cumulonimbus sobre toda a região, que apresenta elevados índices pluviométricos nas sub-regiões leste e extremo oeste (SOUZA et al., 2003).

Muitos estudos têm sido realizados no Brasil em busca de uma melhor compreensão desse fenômeno atmosférico. Hoje já se sabe, por exemplo, que as características geográficas de uma região apresentam grande influência na densidade dos raios (GOMES, 2003). Fenômenos globais como El Niño (EN) e La Niña (LN) afetam consideravelmente os padrões meteorológicos, logo influenciam nas ocorrências de raios em algumas regiões. O Amazonas é uma das regiões afetadas pela ação destes fenômenos. Um dos efeitos climáticos mais conhecidos, em episódios de El Niño e La Niña, é a grande variação na quantidade de chuvas na região leste e norte da Amazônia, observando-se redução no primeiro evento e um aumento significativo no segundo (MOLION (1993).

Verifica-se na literatura que diversos autores como ROOHR (1994) e CAREY (2005), utilizando imagens de satélite, e WANG (2006), MACGORMAN (2005), GUNGLER (2005) e SORIANO (2001), utilizando dados de radar, radio-sondagem, e outros sistemas de detecção e localização de raios encontraram relações entre os parâmetros de raios, precipitação e sistemas meteorológicos convectivos. Nessa parte central da região Amazônica, especialmente em torno de Manaus, em um primeiro momento não encontramos estudos dessa natureza, que relaciona precipitação pluviométrica e descargas elétricas, esse motivo, por si só é suficiente para mapear eventos de chuva intensa, associados á descargas elétricas, nesse importante pedaço da Amazônia ainda não efetivamente agraciado por trabalhos nessa mesma linha.

A maior parte desses tipos de estudo objetiva minimizar os danos causados pela incidência de tal evento, através da verificação da distribuição espaço-temporal das

descargas elétricas atmosféricas. Dessa forma, é possível identificar a época do ano e os pontos mais atingidos por DEAs. Além disto, a análise evolutiva no espaço e no tempo das descargas elétricas, associadas a sistemas meteorológicos, podem ser utilizadas para auxiliar e melhorar a eficiência dos sistemas de monitoramento do tempo e de proteção à seres vivos, sistemas elétricos, de telecomunicação e de tantos outros interesses econômicos.

Acrescenta-se a esses fatos, as situações em que descargas atmosféricas causam diversos prejuízos materiais, da ordem de milhões de dólares, ocasionando colapsos ou desligamentos nas redes de distribuição de energia elétrica, o que desperta um grande interesse em estudos sobre sistemas Convectivos de Mesoescala que são principais causadores de DEA.

Em nosso país, segundo dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT-INPE), as descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além da queima de um número considerável de transformadores de tensão. Cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição, são provocados por raios, sendo o número de transformadores queimados por DEAs em torno de 40%. Tais números causam um impacto considerável no fornecimento de energia, o que pode ser constatado pela alta correlação entre a incidência de descargas elétricas e os índices DEC(informa quanto tempo durou o desligamento) e FEC(informa a frequência desses desligamentos) da maioria das empresas do setor elétrico. Além de problemas de tal magnitude, vale ressaltar também, incêndios em florestas, residências, reservatórios de combustíveis, acidentes na aviação e em embarcações marítimas, acidentes nas torres de poços de petróleo, como o que aconteceu na refinaria de El Palito, na cidade de Puerto Cabello, no Estado de Carabobo, região central da Venezuela, na noite do dia 19 de setembro do ano de 2012, além de danos à indústria espacial, aos sistemas de telefonia e de telecomunicações, mortes de seres humanos e de animais.

Dessa forma, percebe-se que estudos sobre DEA são relevantes, haja vista as inúmeras aplicações que seus resultados apresentam tanto para fins científicos como sócio econômicos. É certo que as pesquisas já realizadas sobre o assunto trouxeram grandes respostas, mas acreditamos que vários aspectos ainda podem ser explorados.

Este trabalho realizará também uma análise de dois casos extremos de precipitação acompanhada de descargas elétricas que ocorreram durante o período do estudo.

Busca-se então, nesta pesquisa, analisar a relação entre a ocorrência de Descargas Elétricas Atmosféricas associadas a sistemas meteorológicos produtores de precipitação que ocorreram na parte central da Amazônia, bem como verificar se sua evolução física tem os mesmos padrões observados em outras cidades Amazônicas.

A relação entre as variáveis chuvas e raios será disponibilizada em capítulos distintos das análises dos casos de eventos extremos.

1.1 - Justificativa do Estudo

Os complexos processos físicos associados às descargas elétricas atmosféricas tem despertado interesse em pesquisadores ao redor do mundo, pois diversos sistemas de localização de DEA foram ou estão sendo instalados, abrangendo grandes áreas continentais, objetivando conhecer e entender características físicas, geográficas e sazonais dos relâmpagos.

Reforçando o que foi dito na introdução deste trabalho, a literatura nos informa que tempestades severas associadas à DEA causam grandes problemas a seres vivos, edificações, sistemas elétricos e de telecomunicações. Morales et al. (2000) afirmam que os sistemas convectivos na Amazônia têm características físicas únicas, que variam desde um comportamento marítimo convectivo, na estação chuvosa a um comportamento continental, na transição entre a estação seca e chuvosa, o que pode modular os processos de eletrificação desses sistemas.

Como essa relação entre esses sistemas convectivos e a incidência de descargas elétricas ainda não foi especificamente mapeado em nossa área de estudo, é mister que essa análise seja feita, não somente com um caráter estatístico, mas também para, de acordo, com os resultados, tentar propor padrões atmosféricos para a relação raios versus chuvas nessa parte central da Amazônia.

Ressalta-se que, segundo o INPE, descargas elétricas são responsáveis por cerca de 120 mortes por ano no Brasil, além dos prejuízos de ordem material (ELAT 2010). Verifica-se também que, ainda segundo o ELAT, Manaus apresenta uma densidade de raios por quilometro quadrado de 13,45. Este número é bastante expressivo, se comparado ao maior índice no Brasil que é de 19,66 raios.km².ano⁻¹ que corresponde ao município de Porto Real(RJ), contra o menor de todos os índices dos 5565 municípios brasileiros, que equivale a 0,02 raios.km².ano⁻¹ representando o município de Japaratinga no Estado do Alagoas.

Além do caráter estatístico para DEA's, o conhecimento da distribuição espacial e temporal de precipitação é também de fundamental importância para o desenvolvimento de várias áreas, tais como: hidrologia, agricultura, energia hidrelétrica, e pesquisas de mudanças climáticas.

No caso de uma Usina Hidrelétrica ou Termoelétrica, esse tipo estudo torna-se ainda mais relevante tanto para a sua construção como para a instalação. Alguns trabalhos verificaram como a incidência de descargas elétricas em pontos onde se localizam essas usinas, ou em linhas de transmissões estão diretamente ligadas a ocorrências de desligamentos (SANTOS, 2010).

Devido a esses fatores, o estudo dos raios associado a precipitações é importante do ponto de vista prático, para proteção de pessoas, animais, florestas, edificações, aeronaves, instalações elétricas e, até de linhas de transmissão de energia em altas voltagens. Além desses fatos, verifica-se também que emissões de raios produzidas pela corrente elétrica transiente (pico de corrente elétrica, fora do padrão que ocorre em um intervalo de tempo que tende a zero) podem interromper comunicações e introduzir erros em sistemas de transmissão de dados.

Em um contato preliminar com hospitais e com a empresa fornecedora de energia elétrica do Amazonas (Amazonas Energia), verificamos a dificuldade em agregar informações referentes a desligamentos provocados por descargas elétricas, que causaram ou não, danos a seres vivos, haja vista a precariedade no arquivamento das mesmas. Porém, mesmo com a falta de dados concretos, estima-se que prejuízos causados por raios associados a sistemas precipitantes, não sejam tão distintos do resto do país, ou de outras partes do mundo, visto que a características físicas, como corrente

e tensões elétricas dessas DEA's podem certamente ser muito semelhantes com quaisquer outras no planeta.

Deve-se levar em consideração que estudos como este podem servir para minimizar os danos causados pela incidência desse evento elétrico, na grande maioria das vezes associados a grandes sistemas precipitantes meteorológicos. Avaliar a evolução espaço-temporal de raios e precipitação, certamente, como já pontuado na introdução, auxiliará na otimização de sistemas de monitoramento de tempo e na proteção de seres vivos, sistemas elétricos, de telecomunicações e em outros interesses de cunho econômico.

Para reforçar ainda mais essa justificativa observa-se na figura 1, que 1601 pessoas foram fatalmente vitimadas entre os anos de 2000 a 2012 no Brasil. Dessas, verifica-se que curiosamente o estado do Amazonas não está dentro dos maiores índices observados. Isto mostra que os dados nesta tabela podem estar defasados pela falta de registros de eventuais mortes ocorridas no Amazonas, que tem um dos maiores índices cerâmicos do mundo (SOUZA et al, 2003). Percebe-se também que entre os períodos de menor precipitação (primavera e verão) a incidência de DEA's é percentualmente muito maior do que as ocorrências durante o outono e inverno. Ainda pode-se verificar na parte inferior esquerda da figura que nesse período, cerca de 19% das ocorrências fatais aconteceram em situações relacionadas com atividades rurais.

INCIDÊNCIA DE RAIOS NO BRASIL

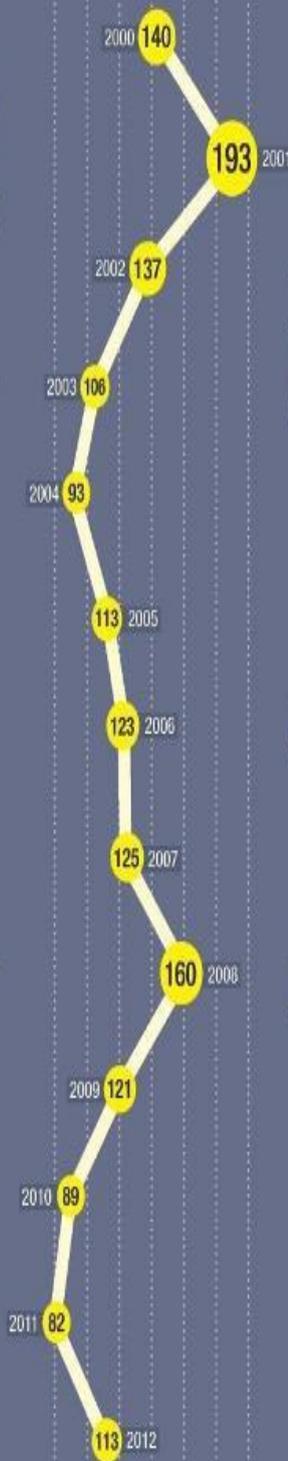
50 MILHÕES

DE RAIOS CAEM TODOS OS ANOS NO BRASIL.

A CADA 50 MORTES NO MUNDO POR RAIOS, 1 OCORRE NO BRASIL.

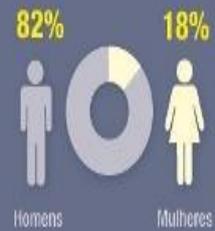


CIRCUNSTÂNCIA DAS FATALIDADES*



PERFIL DAS VÍTIMAS FATAIS*

POR GÊNERO



POR FAIXA ETÁRIA



POR ESTAÇÕES DO ANO



* média calculada na década 2000-2009.

Figura 01 - Danos causados por raios no Brasil, onde verifica-se quem em 2008 ocorreu um pico de 160 eventos. Fonte ELAT/INPE

1.2 -Hipóteses

- ✓ Existe uma correlação direta ou indireta entre precipitação pluviométrica em diferentes intensidades, e a quantidade de raios simultaneamente observados na área de estudo, que compreende os arredores do município de Manaus.
- ✓ Na Amazônia Central as quantidades e intensidades de chuvas dependem dos sistemas produtores desses eventos que possuem sazonalidade e características próprias a eles.
- ✓ Em diferentes escalas temporais, a distribuição de raios e chuvas pode ter uma relação mais direta.

2-OBJETIVOS.

2.1- Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo é relacionar raios e chuvas sobre uma área escolhida na Amazônia Central, que compreende os arredores do município de Manaus a fim de quantificar e qualificar as evidências de influências geográficas e/ou meteorológicas desses eventos, durante um período de dezembro de 2008 a novembro de 2011.

2.2-Objetivos Específicos

- ✓ Quantificar os totais de raios detectados e precipitação sobre a área escolhida, que abrange os arredores do município de Manaus, no período de dezembro de 2008 a novembro de 2011;
- ✓ Verificar se em diferentes relações temporais as variáveis em questão se relacionam de maneira direta ou inversa
- ✓ Relacionar através de gráficos de dispersão os eventos em que a quantidade de raios e chuvas atingiram valores próximos ou acima da média daquele período, verificando em que escala temporal e sazonal temos uma melhor correlação.

3 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA.

3.1 - Precipitações na Amazônia

A Floresta Amazônica é um dos mais importantes ecossistemas do planeta, sendo que sua biodiversidade e sua importância no equilíbrio do planeta estão sendo cada vez mais discutidas. A Amazônia é também a maior bacia hidrográfica do mundo, com cerca de cinco milhões de quilômetros quadrados e influi nos ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, com interações no clima do mundo inteiro. Sendo uma floresta equatorial de clima quente e úmido, a Floresta Amazônica possui uma alta pluviosidade (valores médios de precipitação anual entre 2.000 a 2.200 mm) associada a uma forte atividade convectiva, com períodos longos e intensos de chuvas durante o ano. A precipitação no pico do período chuvoso normalmente excede o valor de 250 mm/mês. (HOREL et al., 1989).

A convecção na região Amazônica de acordo com Figueroa e Nobre (1990) é um importante mecanismo de aquecimento na atmosfera tropical, e, portanto, exerce um papel fundamental na determinação do tempo e clima desta região, modulando os valores de precipitação, e conseqüentemente da ocorrência de raios.

Três grandes centros de precipitação abundantes são encontrados no Norte do Brasil, conforme indicado na figura 2. Um localizado no noroeste da Amazônia, com uma quantidade de chuvas de 3000 mm/ano, associados a Zona de Convergência Intertropical(ZCIT), que traz por ventos de leste o ar úmido, que é condensado posteriormente e elevado quando sobe os Andes (NOBRE, 2007). Outro centro se localiza em torno de 5° S, com valores de precipitação de 2500 mm/ano, e um último centro é verificado na parte leste, cuja precipitação é 2800 mm/ano.

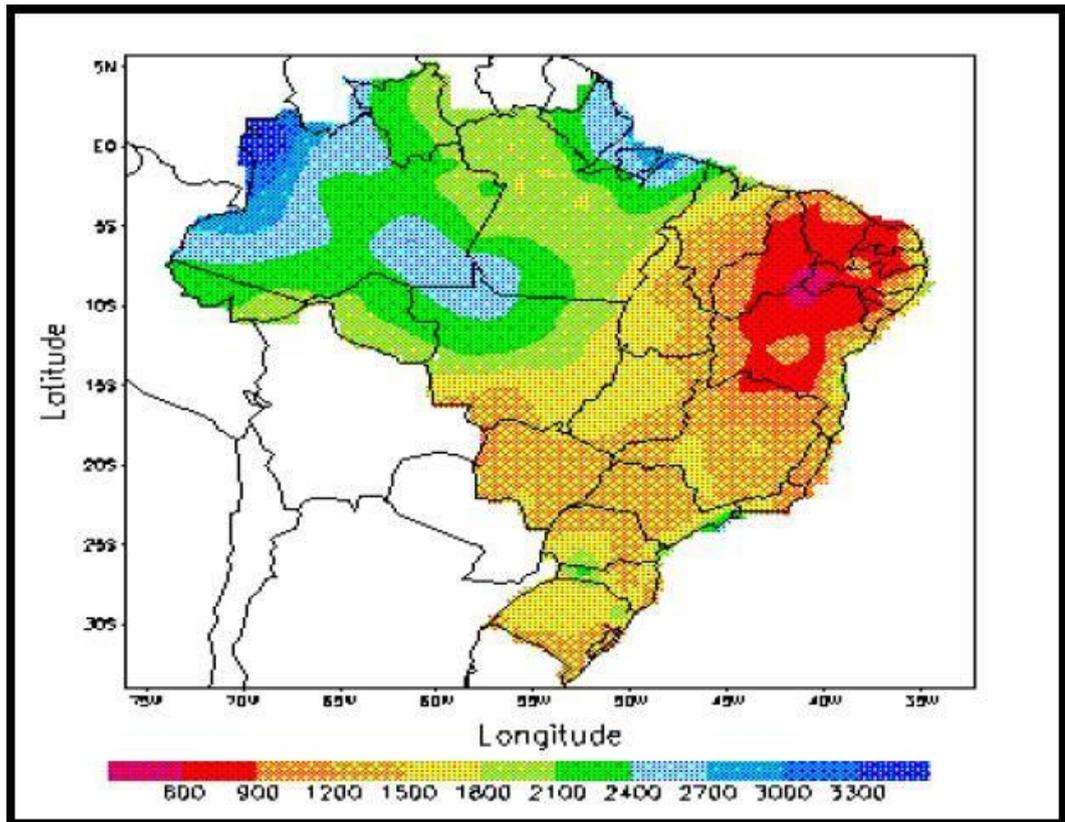


Figura 02 - Climatologia de precipitação acumulada no ano (mm) referente ao período de 1961 a 1990. Fonte: INMET

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 podem produzir chuvas são: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade da Amazônia (LIs), frentes frias associadas ao fenômeno das friagens, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), jatos de baixos níveis (JBN) que ocorrem paralelo e próximo aos Andes, ondas de leste, a Alta da Bolívia e cavados de altos níveis que se propagam de leste para oeste.

3.2 - Sistemas Precipitantes Produtores de Tempestades na Amazônia.

3.2.1 - Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos mais importantes sistemas meteorológicos que atua nos trópicos. Ela se caracteriza por ser uma banda de baixa pressão e convergência dos ventos alísios em baixos níveis que circunda a faixa equatorial do globo terrestre. 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. A literatura nos informa que a ZCIT é um dos principais sistemas precipitantes em diferentes regiões na Amazônia. (Molion, 1993)

Sazonalmente, em anos considerados normais, a ZCIT migra da sua posição localizada mais ao norte (em torno de 14°N), durante os meses de agosto a setembro, para sua posição mais ao sul do planeta (em torno de 2°S), nos meses de março a abril (período normalmente considerado chuvoso em parte da Amazônia).

Logo, se verifica que, por causa da sua estrutura física, é decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e clima em áreas da região tropical, influenciando essencialmente na precipitação dos trópicos, principalmente durante o verão austral, pois o deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Intertropical é, segundo alguns trabalhos, grande responsável pela estação chuvosa na Amazônia (RAO e HADA, 1990)

3.2.2 - 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 quilômetros, 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. (Kodama 1992, 1993; Satyamurti et al.1998; Carvalho et al. 2002).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul está associada à intensa fonte de calor e umidade da Amazônia. Em um estudo observacional, Kodama(1993), mostrou que essas zonas aparecem somente quando o escoamento de ar quente e úmido, em baixos níveis se dirige à altas latitudes, ou quando um jato sub-tropical(JST), em altos níveis flui em latitudes sub-tropicais (30 a 35°), portanto, o estabelecimento desse padrão de circulação, está associado à atividade convectiva na Amazônia e no Brasil Central(Hurrell e Vicent,1991)

As observações mais antigas da existência de uma proeminente banda de nebulosidade sobre a América do Sul, realizadas com câmeras e radiômetros a bordo de satélites foram feitas por Streten(1973) e Yasunari(1977).

A imagem de satélite da figura 3 mostra claramente essa banda de nebulosidade através da temperatura de brilho médio obtida pelo satélite Goes-12, num período que vai de 01 a 08 de janeiro do ano de 2006, onde é possível observar claramente a grande extensão da Zona de Convergência do Atlântico Sul em grande parte do Brasil.

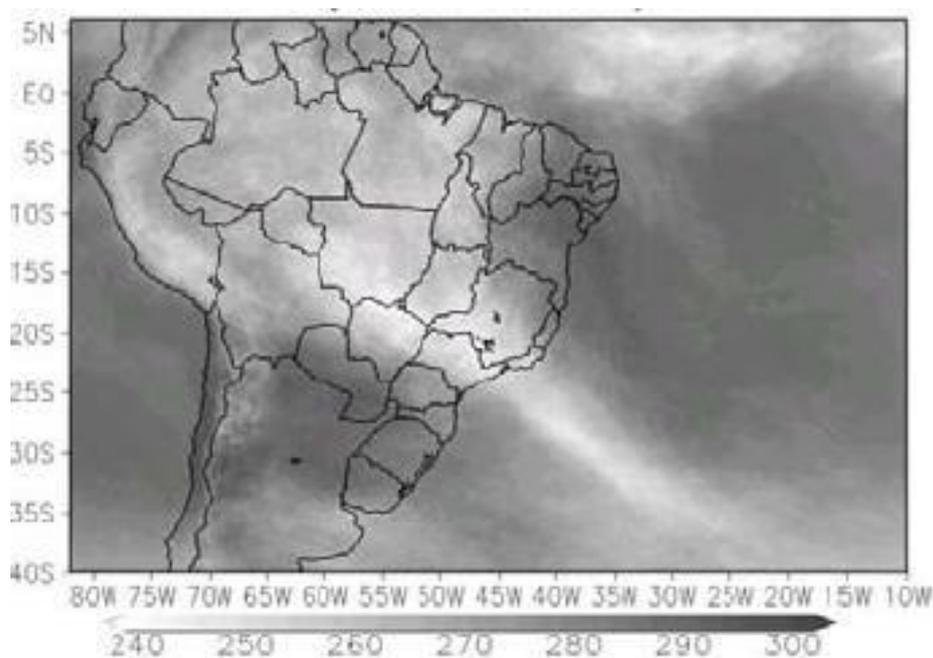


Figura 03 - Temperatura de brilho média obtida pelo satélite GOES-12: de 01/jan a 08/jan de 2006. Fonte: Climanálise - CPTEC.

3.2.3 - 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 (Coehn et al., 1989), bem como pela precipitação na Amazônia Central, durante a estação seca. Estas linhas são caracterizadas por possuir grandes conglomerados de nuvens cúmulo-nimbus e são formadas devido à circulação de brisa marítima, podendo-se prolongar para o interior do continente.

Os aspectos climatológicos destas LIs na Amazônia foram estudadas empiricamente por Coehn et al. (1989). Os resultados por eles obtidos foram de que estas LIs podem atingir o extremo oeste da Amazônia, com velocidade de deslocamento entre 12 e 15 m.s-1 (aproximadamente 13 graus de longitude por dia). Ainda, segundo os mesmos autores anteriormente citados, o comprimento e a largura médias destas LIs é de aproximadamente 1500 e 170 km, respectivamente, sendo que os meses com maior frequência de ocorrência do fenômeno é entre abril e agosto. Vale ressaltar que a duração média desses sistemas pode chegar a 16 horas.

3.3 - Nuvens de Tempestades

Uma típica nuvem de tempestade apresenta um diâmetro de 10 a 20 km, alcança altitudes também de 10 a 20 km e dura em média de 30 a 90 minutos. Algumas vezes permanece fixa em um dado lugar, outras vezes movimenta-se com uma velocidade de 40 a 50 km/h. Pode ser identificada por seu largo e brilhante topo esbranquiçado visto por imagens de satélite, que se projeta na direção dos ventos formando uma saliência denominada bigorna (PINTO JR. & PINTO, 2000).

O vapor d'água existente nas camadas mais baixas da atmosfera, à medida que ascende por convecção, devido a maior temperatura das parcelas de ar próximas à superfície, passa do estado de vapor para os estados líquido e sólido em determinadas alturas da atmosfera, adquirindo formas de gotas de água, gotículas de água super-resfriadas, cristais de neve, granizo leve, pedra de granizo e cristais de gelo, em função da altitude, da temperatura e da umidade relativa da atmosfera. Desse processo, forma-se uma nuvem que pode continuar se desenvolvendo até atingir um estágio maduro, quando então surgem as chamadas células de tempestades, que segundo GIN (1992), é a região onde ocorre a atividade convectiva dentro da nuvem. Uma nuvem de tempestade pode ser constituída por várias células eletrificadas em diferentes estágios de desenvolvimento (NACCARATO, 2001).

Nuvens de tempestades, são também conhecidas como nuvens cumulonimbos (Cb), que comumente são classificadas em tempestades isoladas e tempestades

organizadas, onde as isoladas tem duração de aproximadamente 1 ou 2 horas e sua ocorrência está relacionada a fatores locais como, orografia, aquecimento diurno e teor de umidade local. Por outro lado, as tempestades organizadas ou sistemas convectivos de mesoescala, além da duração e atividade elétrica intensa, costumam ser mais severos, apresentando chuvas fortes, ventos violentos e granizo (PINTO JR &PINTO, 2000).

As atividades elétricas nas nuvens que acontecem após o crescimento das gotas de chuva, por colisão e coalescência, foi destacada por COLGATE (1967). Observações feitas com radares meteorológicos e sistemas eletromagnéticos por BATTAN e THEISS (1970), HISER (1973) mostraram que as regiões das chuvas de onde raios se originam, apresentam um subsequente abrupto crescimento de gotas precipitáveis.

3.4-Eletrificação das nuvens de Tempestades

A estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade depende de processos micro e macrofísicos. Os processos micro físicos dentro de uma nuvem eletrificada têm sido largamente estudados, na tentativa de simulá-los em experimentos de laboratório. O processo micro físico mais aceito para a geração de cargas é o colisional, onde as colisões ocorrem entre partículas de tamanhos diferentes e conseqüentemente há transferência de cargas entre elas.

3.4.1 - Modelo de dipolo e tripolo eletrostático

Um dos primeiros modelos propostos para a estrutura elétrica das nuvens de tempestades a divide em dois centros principais de cargas, a saber, um positivo, que se localiza na metade superior da nuvem, e um negativo encontrado na outra metade na parte inferior da nuvem, como visto na figura 4.

WILLIAMS (1998), através da observação do campo elétrico (E) no interior de uma nuvem, sugeriu a existência de um modelo de dipolo ou tripolo eletrostático.

Um volume de cargas positivas entre os níveis de temperatura -10 e -25°C, e outro volume, porem de cargas negativas, em temperaturas inferiores a -25C

caracterizam o modelo de dipolo eletrostático. Já para o modelo de tripolo, uma segunda concentração de cargas positivas, é observada, de magnitude menor, contudo entre os níveis de temperatura 0 e -10°C. A literatura informa que uma camada de cargas se forma na região superior da nuvem, chamada de camada de blindagem eletrostática, induzida pelas cargas situadas no topo da nuvem, observados também neste modelo de tripolo eletrostático.

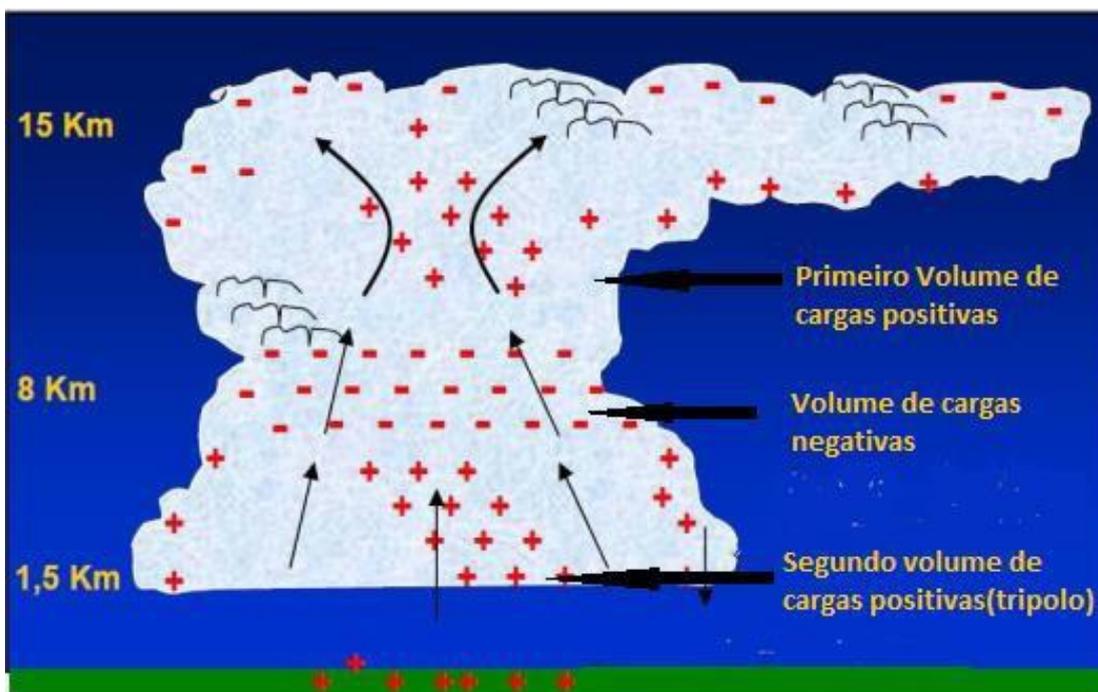


Figura 04 - Modelo de tripolo eletrostático, onde se verifica que os perfis verticais de E indicam uma terceira região de cargas, sendo essas cargas positivas entre os níveis 0 e -10°C. Fonte adaptada de Heilmann (2006).

De um modo geral, independente do modelo, o centro positivo é dependente do movimento vertical da nuvem e é encontrado a 1km, logo abaixo do seu topo (MAGONO, 1980). A carga desses centros varia de uma dezena a algumas centenas de Coulombs (PINTO JR.; PINTO, 2000).

3.4.2 - Processo Colisional Indutivo

A teoria do processo colisional indutivo foi primeiramente proposta por Elster e Geitel, em 1913 para a eletrificação de uma nuvem de tempestade.

Essa teoria, baseada em princípios básicos da física é simples e assunto de debate ainda hoje.

Neste processo uma gota grande, é polarizada devido ao campo elétrico externo, que é dirigido para baixo. Portanto, a parte inferior do granizo fica positivamente carregada ao mesmo tempo em que a parte superior fica carregada negativamente, como pode ser observada na figura 5.

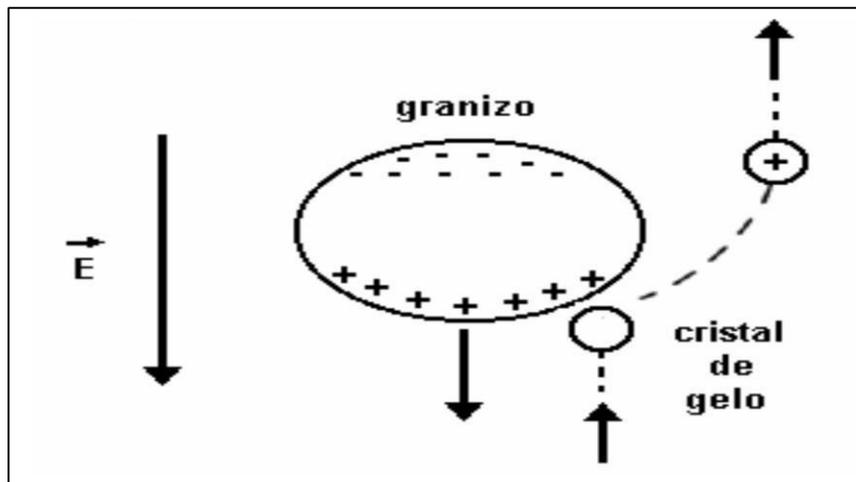


Figura 05 – Visualização do processo colisional indutivo de separação de cargas.
Fonte: Adaptada de Faria(2002)

Quando esta gota colide, na sua parte inferior, e com as gotículas, que são partículas menores, ocorre transferência de cargas ficando a gota negativamente carregada e a gotícula positivamente carregada. Desta maneira ocorre a separação de cargas no processo indutivo, que é assim chamado porque o campo elétrico ambiente induz a geração de cargas através da polarização da gota. À medida que as partículas ficam carregadas, elas são separadas por processos macrofísicos. Esta separação resulta em um reforço do campo elétrico dentro de uma nuvem eletrificada, o qual provocará novas induções nas gotas. A teoria do processo colisional indutivo tem sido revivida como um mecanismo primário de geração de cargas para as tempestades.

3.4.3 – Processo Colisional termoelétrico

O processo colisional termoelétrico, apresentado por Williams (1998), prevê que a transferência de cargas é relacionada com a temperatura em que ocorre a colisão entre as partículas. Esta temperatura é conhecida como Temperatura de Inversão (TI), que equivale a aproximadamente -15°C , e se localiza em 6 km de altitude (PINTO JR, e PINTO, 2000). Se a colisão entre a partícula de maior massa (granizo) e o cristal de gelo (partícula menos massiva), ocorrer a temperaturas superiores à TI, o granizo ficará carregado positivamente e o cristal de gelo, que recebeu cargas ficará carregado negativamente. Por movimentos ascendentes o cristal de gelo subirá, ficando então uma grande concentração de cargas positivas (granizos) na parte inferior da nuvem. Porém, se a colisão ocorrer a temperaturas inferiores à TI, o granizo ficará carregado negativamente e o cristal de gelo positivamente. Temos então, conforme a figura 6, dois centros de cargas opostas, ambos acima da Temperatura de Inversão.

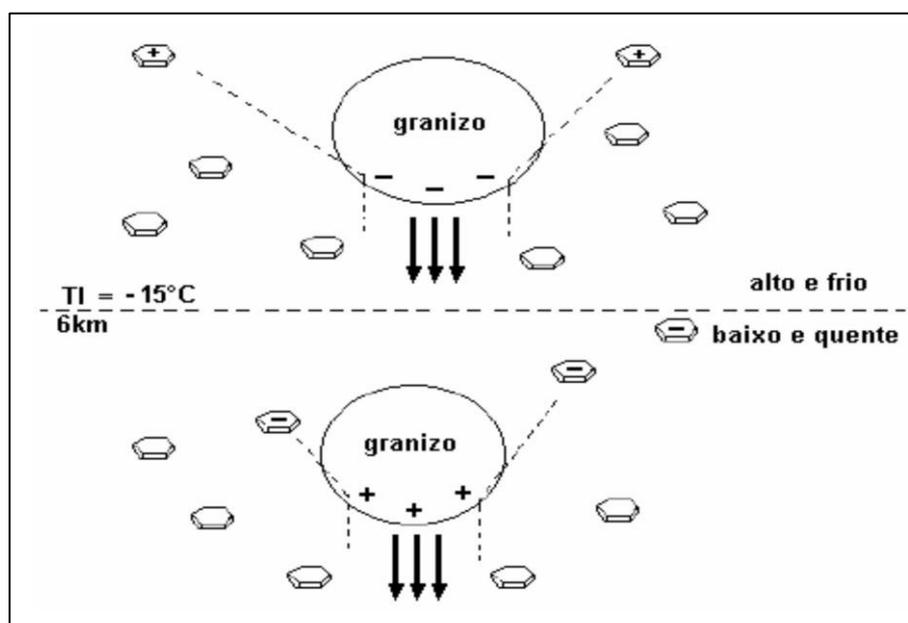


Figura 06 – Visualização do processo termoelétrico de separação de cargas. Fonte: Adaptada de Faria (2002).

3.4.4 – Processo Macrofísico Gravitacional

Também observado por Williams (1998), o processo gravitacional é conhecido como a teoria da precipitação, mostrado na figura 7. Os processos microfísicos, outrora apresentados, são responsáveis pela separação de cargas. Quando elas se separam, as cargas negativas ficam retidas nos granizos e as positivas nos cristais de gelo, que são partículas menores. Por atração gravitacional as partículas maiores (carregadas negativamente) descem e as com menor massa, que estão carregadas positivamente, ficam suspensas na parte superior da nuvem, formando assim dois centros de cargas opostas, o negativo embaixo e o positivo em cima.

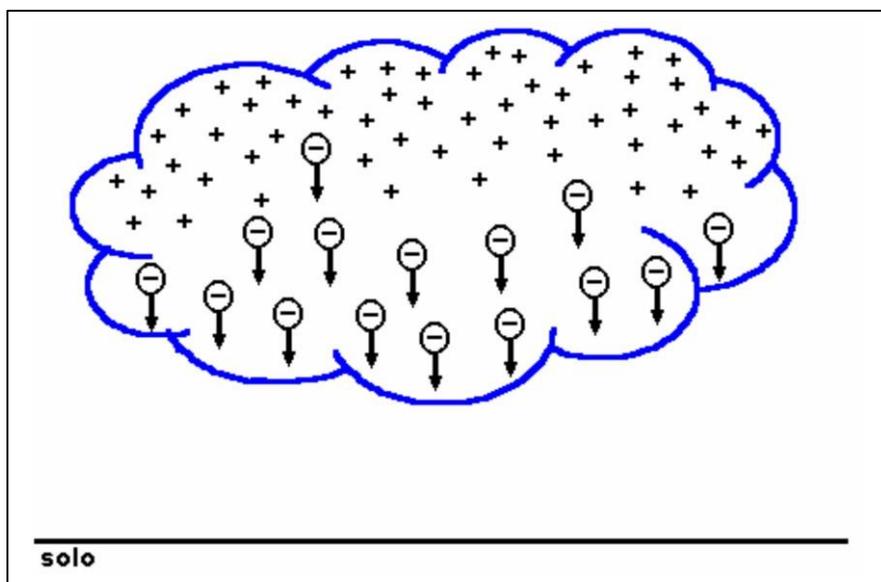


Figura 07 – Visualização do transporte de cargas segundo a teoria gravitacional.
Fonte: Adaptada de Faria (2002).

3.4.5 – Processo Macrofísico Convectivo

Na figura 8, está representada o processo convectivo, que segundo Williams (1998) explica tanto o processo microfísico quanto o macrofísico. Na etapa microfísica, as cargas positivas são geradas pela corrente corona (correntes de ar aquecidas na superfície da Terra) enquanto as negativas são geradas pela interação dos raios cósmicos (raios com alta energia) e a atmosfera. Na parte macrofísica do processo, as cargas negativas, associadas aos granizos, que são arrastadas para a parte inferior da nuvem por serem mais pesadas através dos movimentos descendentes, enquanto os leves cristais de

gelo sobem arrastadas por movimentos ascendentes e ocupam a parte superior da nuvem.

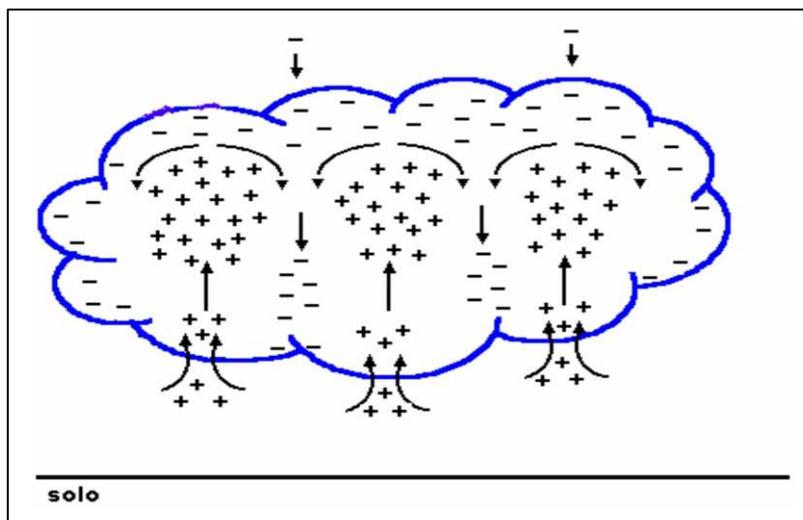


Figura 08 - Visualização do transporte de cargas segundo a teoria convectiva. Fonte: Adaptada de Faria (2002).

3.5-Formação de Nuvens de Tempestades

O ciclo que representa a evolução de uma nuvem de tempestade segundo Wallace e Hobbs (2006) é composto por três estágios diferentes de desenvolvimento, a saber, estágio de cúmulos, estágio de maturação e estágio de dissipação cada um com duração de 20 a 40 minutos, representada pela figura 9.

Na etapa de formação, conhecida também por estágio de *Cumulus*, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes, que conseqüentemente arrasta partículas de gelo e gotas de água para cima. Nesta fase, o diâmetro da célula 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, foram 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 depende 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.

Este último estágio que faz parte da fase de dissipação, é caracterizado por movimentos predominantemente descendentes. Nesta fase, a temperatura do interior da nuvem é menor que a do seu exterior. A nuvem irá se dissipar até que as temperaturas do interior e do exterior sejam iguais. Esta fase tem duração de aproximadamente alguns minutos.

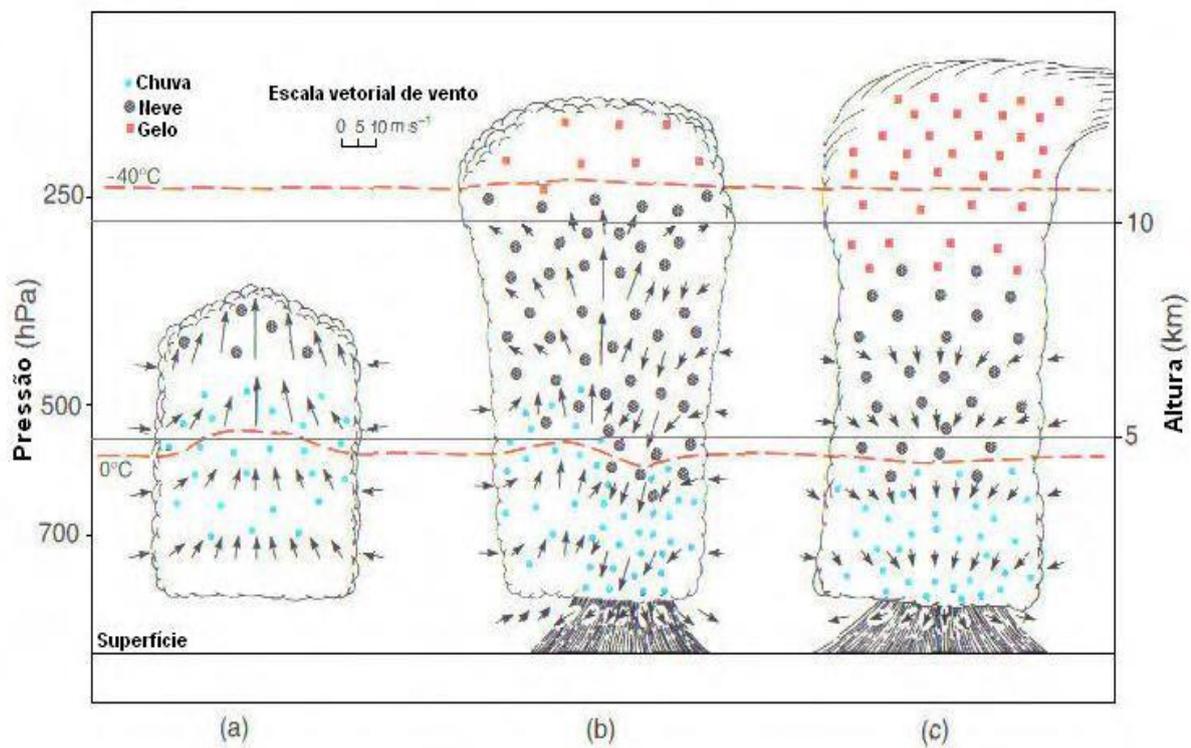


Figura 09 - Esquema de uma tempestade de célula simples em três estágios de desenvolvimento (a) estágio de cumulus, (b) estágio maduro, e (c) estágio de dissipação. As isotermas de 0° e -40° estão indicadas em cor laranja. Fonte: Adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

3.6 - DESCARGAS ELÉTRICAS NA ATMOSFERA

As DEA são fenômenos que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excedem a capacidade de isolante do ar em um dado local da atmosfera.

As DEAs, predominantemente associadas a tempestades, podem também ocorrer durante erupções vulcânicas, em tempestades de areia e de neve ou, ainda, em outros tipos de nuvens. Todavia, nestes outros episódios, geralmente apresentam extensão e intensidade menores. O termo „descarga atmosférica“ tem sido frequentemente empregado de forma equivalente a relâmpago. Existem dois tipos fundamentais de relâmpagos: (1) que ocorrem na atmosfera e (2) que atingem o solo.

Os raios, dependendo de onde eles se originam e de onde eles terminam, apresentam várias classificações. As mais comuns são: (NS) Nuvem-solo negativos, que ocorrem da nuvem em direção ao solo trazendo cargas negativas da nuvem para o solo; (NS) Nuvem-solo positivos, que trazem cargas positivas da nuvem para o solo; Solo-nuvem (SN), que se iniciam no solo em estruturas altas e pontiagudas, árvores, edificações e se dirigem na direção da nuvem, podendo ser positivos ou negativos; Intra-nuvem (IN), que ocorrem dentro da nuvem, sendo os mais frequentes e difíceis de serem estudados; (NA)Nuvem-ar, relâmpagos que saem da nuvem e se dirigem para atmosfera (PINTO Jr. e PINTO, 2000).

Os raios NS podem ser classificados como descendentes ou ascendentes e, ainda, de raios positivos ou negativos. A polaridade atribuída aos raios depende do tipo de carga que se neutraliza no interior da nuvem. É chamado negativo, quando cargas negativas são neutralizadas no interior da nuvem e positivo quando este evento ocorrer com cargas positivas. Os raios descendentes ocorrem quando o fechamento do canal, por onde passam as cargas, ocorrem próximo do solo. Nos raios ascendentes, o fechamento do canal ocorre próximo da nuvem, através da conexão do canal ascendente e de um descendente induzido da nuvem (Figura 10). Usualmente, a descarga positiva ocorre quando a parte superior da nuvem carregada positivamente fica deslocada da base negativa, ficando mais exposta em relação a estruturas terrestres, sendo mais

frequente na presença de objetos altos posicionado sobre elevações. Segundo Fernandes(2005), nuvens de tempestade produzidas sobre ambientes com maior número de queimadas podem apresentar uma maior ocorrência de raios positivos.

Dos tipos de relâmpagos aqui apresentados, os mais frequentes segundo PINTO JR. (2005) são os intra-nuvens, por dois motivos: a capacidade isolante do ar diminui com a altura em função da diminuição da densidade do ar, e as regiões de cargas opostas das nuvens estão mais próximas quando comparado aos outros relâmpagos. Em escala global, esse tipo de relâmpago equivale a 70% de todos os relâmpagos. Porém quanto mais próximo do equador esse percentual aumenta para 80 a 90% e cai para 50 a 60 % em latitudes médias.

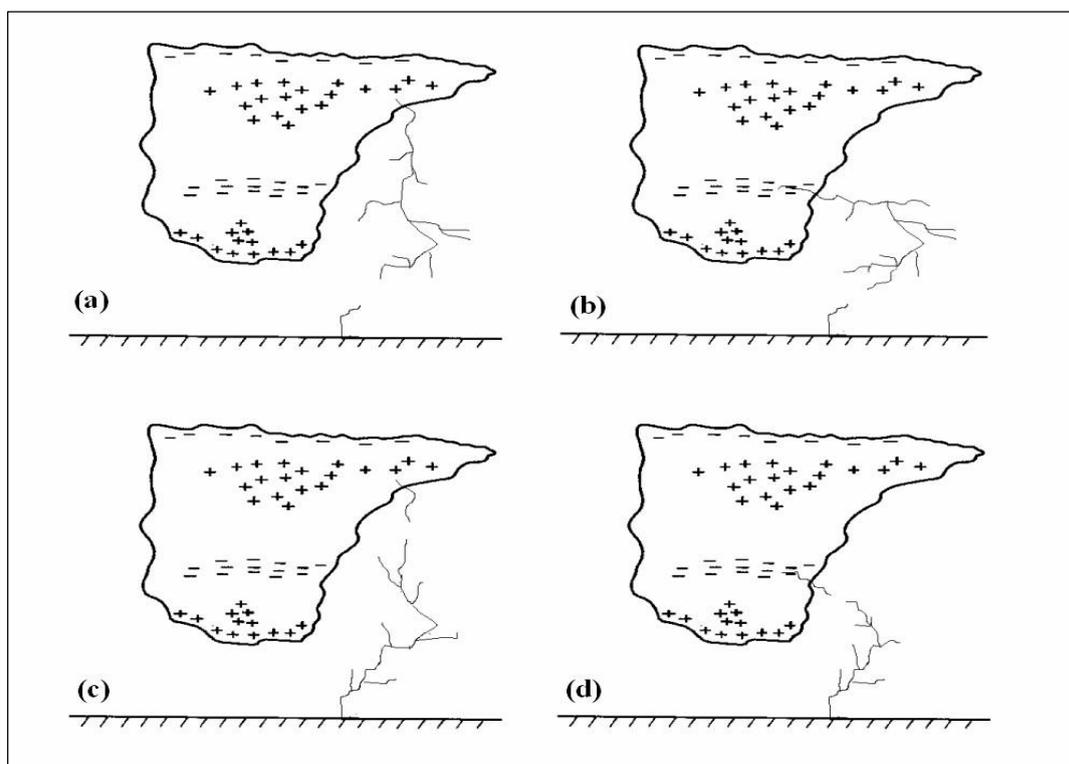


Figura 10 - Desenho esquemático simplificado dos tipos de relâmpagos que atingem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo. FONTE: NACCARATO (2001).

Uma nuvem carregada desenvolve um potencial eletrostático muito intenso através de mecanismo interno, cientistas têm estimado potenciais da ordem de 10

milhões de volts. 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.

Acredita-se que o líder escalonado inicie por uma ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar entre a pequena bolsa de carga positiva na base e a região inferior carregada negativamente da nuvem de tempestade (PINTO JR, 2005). Essa descarga local libera elétrons que neutralizam as cargas positivas que, em seguida, ramifica-se tortuosamente em direção ao solo, em busca de regiões com melhor condutividade elétrica. Como o líder escalonado está carregado negativamente ao aproximar-se do solo, induz o aparecimento de cargas positivas especialmente sobre objetos pontiagudos e irregulares na superfície. A algumas dezenas de metros de distância, uma descarga ascende, denominada descarga conectante, move-se do solo para encontrar o líder escalonado. Após o contato, um grande número de elétrons flui para o solo e uma descarga altamente luminosa e visível propaga-se para cima, de forma contínua, do solo para nuvem ao longo da trajetória seguida pelo líder escalonado. E esse fluxo de elétrons, chamado de descargas de retorno, é responsável pelo canal brilhante de luz que é observado como relâmpago. Apesar do fluxo descendente de elétrons, ambos, descarga de retorno e solo, permanecem carregados positivamente, em resposta ao restante de carga negativa na região inferior da nuvem. Após a primeira descarga, que carrega a maior parte da corrente, descargas subsequentes podem ocorrer ao longo do canal principal, caso elétrons adicionais sejam depositados no seu topo. Um líder carregado negativamente, chamado de líder contínuo, move-se, então, continuamente em direção à terra através do canal residual e deposita mais elétrons no solo. O líder contínuo é seguido por outra descarga de retorno normalmente não tão brilhante, nem tão intensa quanto à primeira, nem tão ramificada.

3.7 - SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS.

O Brasil possui seis redes de detecção, que detectam descargas atmosféricas nuvem-solo e intra-nuvem ou apenas descargas nuvem-solo. A maioria opera sobre a responsabilidade de setores governamentais, e são:

1. **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.
2. **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).
3. **SIDDEM** - Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos, cobrindo o sul do Brasil.
4. **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.
5. **RDR-SIPAM** - Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia cobre parte do leste da Amazônia, porém está inativa desde 2010.
6. **STARNET**- operada pelo IAG-USP, oferece dados de esféricos de baixa frequência, com ampla cobertura. A eficiência de detecção dessa rede tem melhorado desde 2007 cobrindo bem toda a Amazônia.

3.7.1 - A Rede STARNET - Sferics Tracking and Ranging Network.

Das redes de detecção de descargas elétricas, foi escolhida a Rede STARNET como base de dados para esse trabalho devido a não atuação de algumas dessas redes em nossa região, e também a falta de atualização e manutenção de dados de outras redes de detecção como recentemente ocorre com a rede do SIPAM. A rede STARNET, também tem uma distribuição global que atende o caráter local desse trabalho. Devido a esses fatores a STARNET é a mais viável atualmente para esse estudo.

A STARNET - Sferics Tracking and Ranging, 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 “esféricos” (ANAGNOSTOU, et al, 2004). Os “esféricos” são ruídos de rádio emitidos pelo relâmpago em uma vasta banda do espectro eletromagnético. Sendo que na faixa do VLF, os esféricos 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 esféricos provenientes das descargas atmosféricas é utilizando o método do ATD (Arrival Time Difference) (LEE, 1986; LEE, 1989).

A 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) (Figura 11).

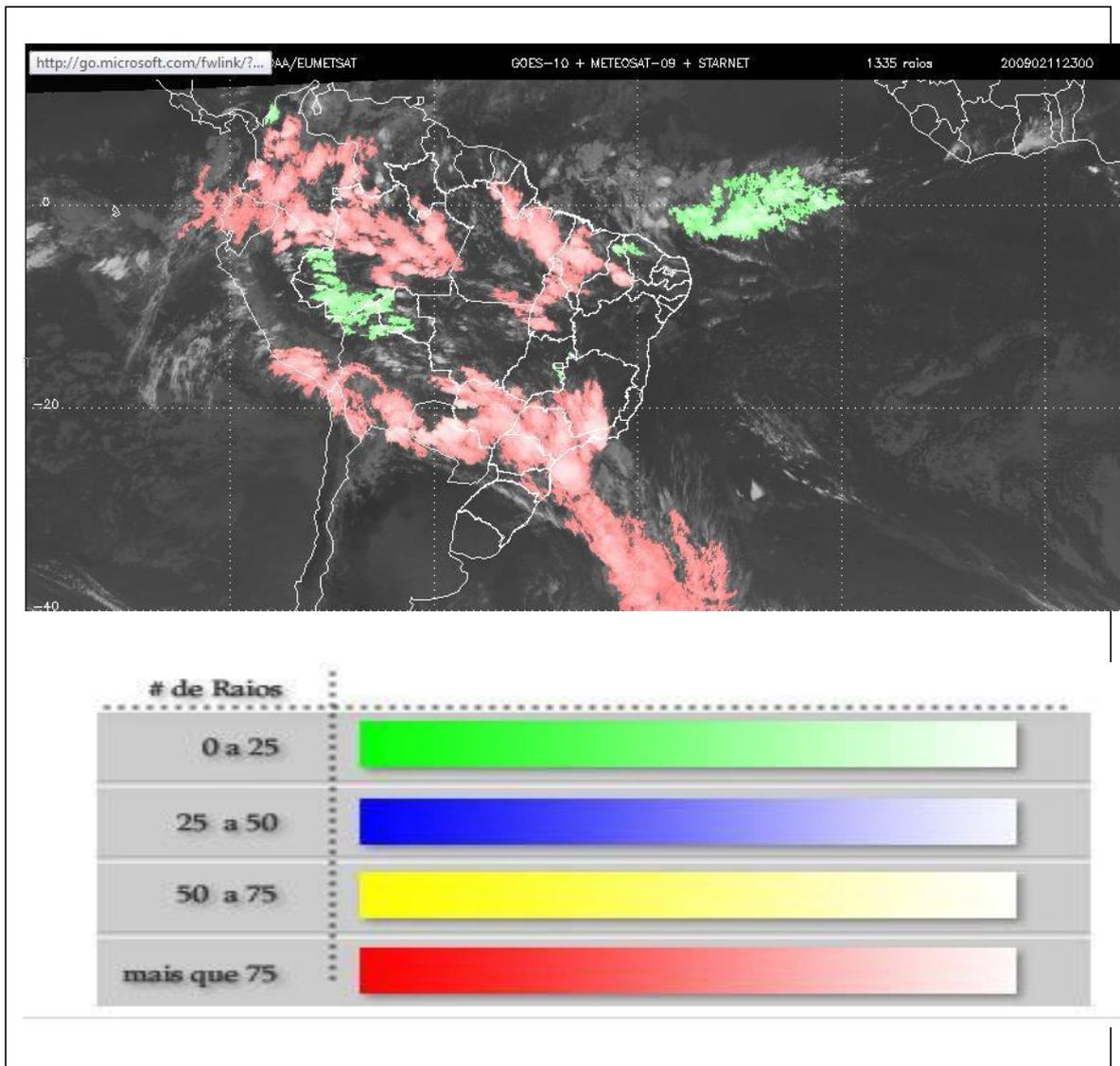


Figura 12 - Imagem de GOES-10 + METEOSAT-08 + STARNET com o número de Raios na América do Sul no dia 11/02/2009. Fonte: <http://www.zeus.iag.usp.br/>

3.8 – ANÁLISE DE REGRESSÃO

É importante observar uma pequena revisão bibliográfica sobre a análise estatística de regressão, pois esta é um dos pilares do trabalho, que será objeto de grande parte da conclusão do mesmo.

A análise de regressão estuda o relacionamento entre uma variável, chamada variável dependente e outra, denominada variável independente. Esta relação é representada por um modelo matemático, através de uma equação que associa as duas variáveis e modo a verificar o comportamento da variável dependente em relação a variável independente. Este modelo é chamado de modelo de regressão linear simples. (Moore e McCabe, 2002)

3.8.1– Diagramas de dispersão

Um diagrama de dispersão mostra graficamente a relação entre as duas variáveis quantitativas. Os dados para o gráficos são pares ordenados na forma:

$$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots\dots\dots (X_n, Y_n)$$

O gráfico é plotado com os dados, a fim de verificar se existe uma tendência linear no comportamento das duas variáveis. A intensidade de uma relação em um diagrama de dispersão é determinada pela proximidade dos pontos a uma forma definida.(Moore e McCabe, 2002). Portanto este diagrama pode permitir empiricamente se um relacionamento linear entre X e Y deve ser assumido.

Ao analisar-se um diagrama de dispersão, deve-se procurar um padrão global que mostre, além da intensidade, a forma e a direção da relação.

Quanto à forma, quanto maior a linearidade mais importante é a relação entre as variáveis avaliadas.

Quando a direção é bem definida, tem-se uma associação positiva (os valores altos das variáveis tendem a ocorrer conjuntamente), ou ainda uma associação negativa (em que os valores altos de uma tendem a ocorrer com os valores baixos da outra variável) (Moore e McCabe, 2002).

Na figura 13 observa-se um gráfico de dispersão que relaciona as variáveis peso e altura (13a) de um produto agrícola e preço e colheita (13b) desse mesmo produto.

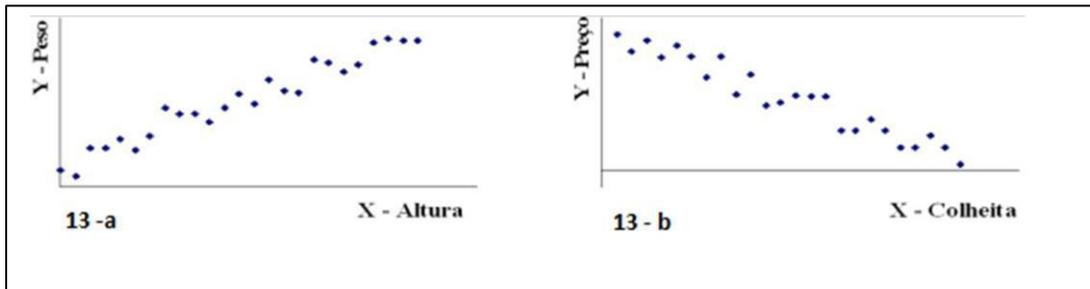


Figura 13- Diagrama de dispersão que relaciona peso e altura de um produto agrícola(13-a), onde verifica-se uma relação positiva (quanto maior a altura , maior será o peso), e uma correlação negativa entre preço e colheita(13-b)desse mesmo produto, indicando que quanto maior for a colheita, menor será o preço. Fonte: (Moore e McCabe, 2002).

3.8.2 – Coeficiente de Correlação

Para qualificar a intensidade desse relacionamento, traça-se uma reta que passa através dos pontos no gráfico, porem para quantificar a relação pode-se usar um índice, chamado coeficiente de correlação representado pela letra r(minúscula), introduzido inicialmente em cálculos estatísticos pelo inglês *Sir Francis Galton* (1822-1911) em 1888(Bisquerra et al., 2004).

O coeficiente de correlação é calculado pela fórmula:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n \cdot s_x \cdot s_y}$$

Onde:

r = coeficiente de correlação

n = numero de pares ordenados de dados (x,y)

x = variável independente

y = variável dependente

\bar{x} = valor médio da variável x

\bar{y} = valor médio da variável y

s_x = desvio padrão da variável x

s_y = desvio padrão da variável y

Se dispomos de dados sobre as variáveis x e y para n indivíduos, que pode ser por exemplo, a altura e o peso de n pessoas. Para o i -ésimo indivíduo a altura x_i está associada ao peso y_i . Isso define claramente o coeficiente de correlação.

A correlação r é sempre um número entre -1 e 1 . Valores muito próximo de 0 , indicam um relacionamento linear muito fraco. A intensidade do relacionamento, aumenta na proporção em que r se afasta de 0 e se aproxima de -1 ou 1 . À medida em que os valores da correlação se aproximam de -1 ou 1 , mais perto de uma linha reta estão os pontos. Os valores dos extremos (-1 e 1) só existem quando os pontos estão exatamente sobre a reta. (Moore e McCabe, 2002).

3.8.3 - Coeficiente de determinação

A correlação perfeita ($r = -1$ ou $r = 1$) indica que os pontos encontram-se exatamente sobre uma reta, porém há outro índice, que é calculado pelo quadrado de r , representado por r^2 , que indica o quanto a variação de uma variável é explicada pela relação linear com a outra variável. Logo quando $r^2 = 1$, toda a variação de x é explicada pela relação linear com y . (Bisquerra et al., 2004).

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Localização da área de estudo

A área de estudo para este trabalho está localizada na Reserva Biológica das Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), situada na Amazônia Central, à aproximadamente 60 km (figura 14) ao norte da cidade de Manaus, Amazonas (Rennó *et al.*, 2008), onde a altitude máxima é de 120m, distribuídos da seguinte forma:

- 31% de planalto
- 26 % de inclinação
- 43% de vale

Geograficamente, a área de estudo (figura 15) está limitada pelos pontos 2° 40" 12" S e 2° 31" 48" S (-2,67 e - 2,53) de latitude e longitudinalmente representada pelos pontos 60° 16" 12" W e 60° 7" 48" W (-60,27 e 60,13). Estes limites formam geometricamente um quadrado, onde, no centro do mesmo, encontra-se o instrumento que mede a precipitação.

A área de estudo tem aproximadamente 256 km², o que indica que o quadrado tem um lado aproximado de 16 km.

Geograficamente o tamanho e a forma da área escolhida, corrobora com as dimensões do erro de localização da rede de captação de raios STARNET(8km). Este tamanho, que equivale ao dobro do erro da STARNET, é geometricamente aceitável, pois temos uma “área fantasma” que garante que quaisquer descargas erroneamente detectadas sejam compensadas com outras descargas que não seriam detectadas caso utilizássemos um quadrado com uma dimensão menor que esta. Tem-se então uma minimização dos equívocos que eventualmente poderiam comprometer a análise dos dados, pois dados espúrios poderiam ser fatalmente confundidos com dados verídicos.

Temos somente um pluviômetro na área de estudo (fator limitante), portanto, não é possível utilizar uma área com um raio muito maior que o erro de 8km. Porém no caso específico desse pluviômetro que está instalado a aproximadamente 50 m do chão, e segundo SANTOS *et al.* (2001), o melhor lugar para instalar um pluviômetro, é num

ponto livre de obstáculos de modo que não haja nenhuma interferência à chuva num raio de 5 metros, conclui-se então que um pluviômetro tão longe do chão como o utilizado neste estudo possa ter uma eficiência de detecção pluviométrica ainda maior que a média.

Vale ressaltar, que a área representativa de um pluviômetro é pequena, e portanto, isso impossibilita um incremento nas dimensões da área de estudo.

O tamanho da área (quadrado de 16 x 16km) também concorda com o tamanho médio do diâmetro de uma nuvem de tempestade, que pode ser de 10 a 20km (PINTO JR. & PINTO, 2000).

A figura 14 mostra claramente a área de estudo e sua localização geográfica dentro do estado do Amazonas.

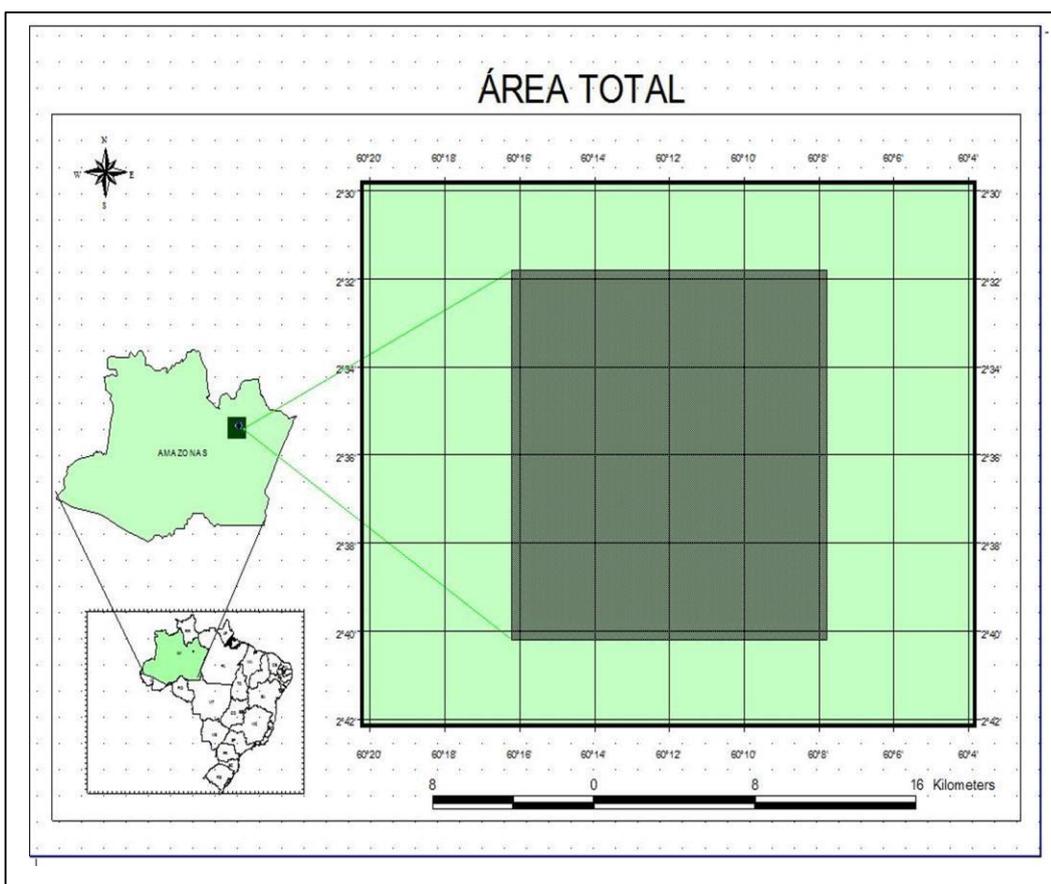


Figura 14 – Localização da área de estudo situada a aproximadamente 60 km de Manaus. Fonte: O autor

4.2 – Caracterização da área de estudo

Segundo a classificação de Köppen (Fisch *et al.*, 1998) o clima da região, onde se localiza a área de estudo, cuja estação meteorológica, está localizada é do tipo “Amw”, que tem características de clima megatérmicos, também denominado como tropical chuvoso, por apresentar temperaturas, umidades e precipitações elevadas. 26,7 °C é a temperatura média anual, sendo os valores de mínima e máxima respectivamente 23,5 °C e 31,2 °C. Vale ressaltar que a umidade relativa média anual de 84%.

A precipitação média em cada ano verificada no período compreendido entre 1961 e 1990 é de 2.285 mm. Baseando-se em uma série histórica entre os anos de 1971 a 2000, a época seca se caracteriza por apresentar uma precipitação em torno de 125 mm por mês, que é observada geralmente nos meses de julho a outubro. Já a estação chuvosa é geralmente caracterizada por meses em que as precipitações superiores àquele valor, pois se observa que as médias mensais são em torno de 258 mm por mês entre os meses de novembro a junho. Estudos observaram que o período seco pode se prolongar mais ou menos a cada ano e segundo Chambers *et al.* (2004) e Sombroek (2001), este período de menos chuvas pode ser caracterizado por épocas onde a precipitação mensal seja aproximadamente 100 mm por mês. Portanto esses dois períodos sazonalmente distintos quanto ao regime pluviométrico, são resultados do movimento anual da Zona da Convergência Intertropical (ZCIT) que influencia diretamente a precipitação na região, onde está a área estudada (Marengo & Nobre, 2001). Três, são os mecanismos de macro e mesoescala responsáveis por produzirem chuvas na região, a saber: convecção diurna que acontece por causa do aquecimento da superfície, linhas de instabilidade que se propagam na direção N-NE do interior desde a costa atlântica, e conglomerados convectivos associados a sistemas frontais de S-SE que são responsáveis pela formação de uma banda de nuvens orientadas no sentido NW-SE, que causa chuvas na região durante os meses de verão do Hemisfério Sul, nos quais este sistema é mais intenso (Oliveira & Nobre (1985), Fisch *et al.*, 1998).

4.3 – Coleta e tratamento dos dados de precipitação

Estes dados não foram coletados pelo autor do trabalho, apenas solicitados ao INPA e processados para atender a necessidade dessa pesquisa.

Os dados de precipitação, utilizados como bases para esse estudo foram coletados pelo pluviômetro EM ARG – 100(Environmental Measurements LTD) localizado na torre experimental da K34, que é geograficamente encontrado, segundo as coordenadas geográficas 2°36'32,76" S e 60°12'33,48" W. A unidade de medida do instrumento é o milímetro(mm), e o mesmo está instalado em um ponto da torre que fica a 51,3 m , tendo a superfície como referência.

A escolha deste pluviômetro, se deve ao fato de que durante o período de estudo os dados de precipitação eram bastante consistentes, pois os momentos em que o instrumento pluviométrico, não estava em funcionamento eram raros.

O fato da floresta Amazonica apresentar baixa densidade de pluviômetros, dificultou um pouco a análise, pois caso existisse uma maior distribuição desses equipamentos o estudo aqui apresentado seria ainda mais consistente.

Verifica-se na figura 15 que a altura do pluviômetro em relação ao chão é bastante grande (aproximadamente 50m), em relação a outras estação também localizadas na Amazonia.

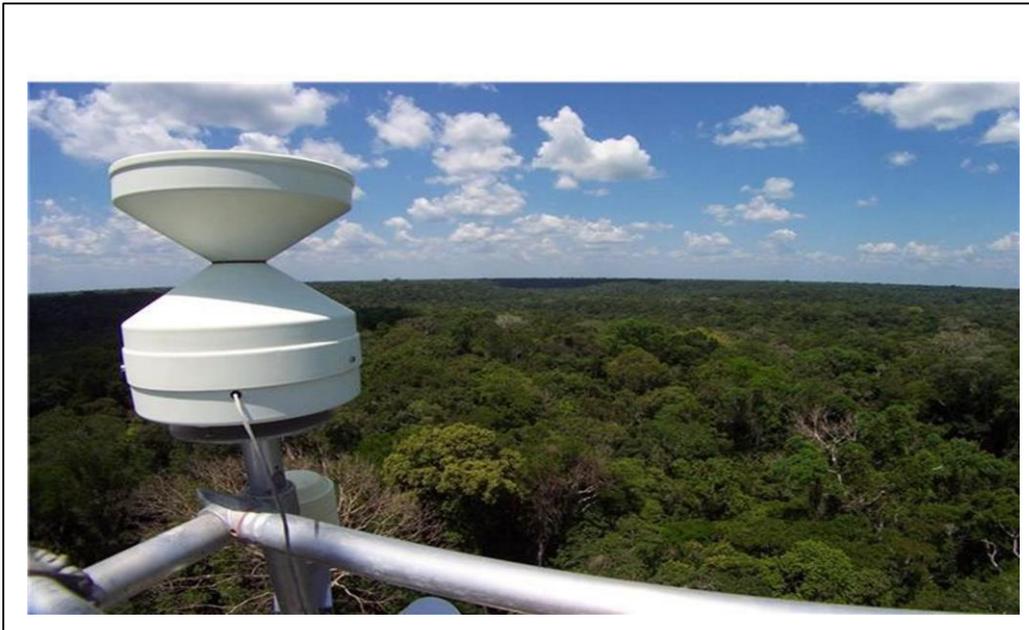


Figura 15 – Visualização do pluviometro EM – ARG 100 instalado na torre experimental K34, onde observa a grande distancia até o chão(51,3m) Fonte :<http://lba.inpa.gov.br/fotos/?pag=LBA#>

O período em que os dados de precipitação foram analisados está compreendido entre os meses de dezembro de 2008 a novembro de 2011. As chuvas utilizadas nas análises foram aquelas caracterizadas com chuvas fortes, cujos valores estão acima de 7,5 mm/h (REICHARDT, 1986). RIBEIRO (2010) observou que para chuvas consideradas intensas, há uma forte tendência com a produção de descargas elétricas atmosféricas do que para chuvas com intensidade menores que este valor. Portanto, objetivando verificar se as chuvas consideradas seguiriam uma tendência semelhante em outros estudos dessa características, optou-se por analisar somente a partir de chuvas fortes.

Os dados de precipitação foram organizados em tabelas, de modo que a visualização e a posterior comparação com descargas simultâneas ou próximas do momento das chuvas pudessem ser eficientemente avaliadas.

Como os dados de chuva, são disponibilizados numa frequência de 30 minutos (frequência de medição do pluviômetro utilizado), aqueles foram somados e a frequência utilizada foi de 2 horas, que, segundo Wallace e Hobbs (2006) pode ser o tempo de duração de uma nuvem de tempestade.

4.4 – Coleta e tratamento dos dados de descargas elétricas.

Assim como os dados de precipitação, estas informações sobre a localização dos raios na área de estudo não foram coletados pelo autor.

Faz-se necessário compreender basicamente como os dados são processados pela STARNET, pois esta compreensão justifica o processamento realizado pelo autor. Portanto segundo os responsáveis pela rede de detecção de descargas atmosféricas, o sinal detectado por cada sensor representa formas de onda dos esféricos e estas séries são utilizadas para o cálculo da diferença do tempo de chegada (ATD) dos mesmos, a partir da correlação temporal entre os diversos receptores de rádio. Cada ATD representa posições sobre a superfície terrestre com a mesma diferença de tempo de chegada, e são representadas por hipérbolas. A intersecção destas curvas representa a localização de uma descarga atmosférica.

A primeira etapa realizada para o processamento dos dados da STARNET foi a formalização da solicitação dos mesmos com o comprometimento de utilizá-los somente para o caráter científico. Após esse procedimento, os dados foram baixados do sítio <http://www.zeus.iag.usp.br/> em formato dat.

Os arquivos foram agrupados em formato txt com o auxílio de um software específico, pois cada arquivo, padronizado em formato ASCII, continha 15 minutos de dados. Logo, fez-se necessário agrupá-los em arquivos com 24 horas de dados, pois este procedimento metodológico facilitou a visualização, garantido uma melhor eficiência na análise dos dados.

Com o mesmo software informado no parágrafo anterior foi discriminado os raios dentre todos os dados fornecidos pela STARNET. Esse procedimento foi útil para localizar somente aqueles dentro da região de estudo, pois o restante não se aplicaria a este trabalho.

Cada arquivo, após o agrupamento foi tratado de modo a retirar os dados espúrios. Das vinte e nove colunas existentes, duas foram especialmente averiguadas,

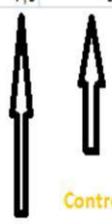
pois continham informações que comprometiam o dado observado pela rede de detecção de raios.

Os dados são organizado em formato de planilha com quinze colunas com informações de data hora e local exato em que o evento elétrico aconteceu, além de outras variáveis necessárias ao processamento das informações sobre as descargas elétricas detectadas

A coluna de numero onze (11) informa o tempo em microssegundos da diferença do tempo de chegada (ATD) dos esféricos, calculados, utilizando como critério a correlação temporal entre os vários receptores de rádio que fazem parte da rede de detecção STARNET. Segundo informações técnicas disponibilizadas no sitio da STARNET, quando os valores da ATD são maiores do que 20 microssegundos, estes, devem ser desprezados, pois são dados inválidos.

A coluna doze (12) informa um numero que representa o controle de qualidade utilizado para diagnosticar a precisão da localização. Se este número for zero(0), isto representa uma boa qualidade, quando o numero é um(1), esse dado pode ser questionável, porém se for dois (2), isto já indica um dado de baixíssima confiabilidade. Portanto, todos os dados em que o controle de qualidade exibia um valor dois (2), foram definitivamente desconsiderados. A tabela 1 nos mostra claramente a localização desses valores, que são essenciais para o processamento de dados das descargas atmosféricas que caíram na área de estudo dessa pesquisa.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2011	8	3	23	35	53	412981	-3,01478	-60,2521	12530	12,6	0	2	4	6
2011	8	13	9	20	6	602818	-2,7545	-59,8978	13675	9,2	0	3	4	6
2011	8	19	15	38	2	315426	-2,76128	-59,8096	11158	12,5	0	-3	4	6
2011	8	20	16	32	42	709576	-3,11196	-59,8674	6720	15,3	0	3	4	6
2011	8	22	18	25	58	365847	-2,6665	-59,8257	11903	9,3	0	-2	4	6
2011	8	22	18	25	58	411934	-2,61353	-59,8353	12722	9,1	0	-3	4	6
2011	8	17	13	40	5	399813	-3,11002	-60,0857	6731	4,3	0	2	4	6
2011	8	17	13	40	7	325576	-2,93403	-59,9013	8961	3,4	0	2	4	6
2011	8	17	13	48	24	824828	-2,67109	-59,8541	12663	9	0	3	4	6
2011	8	18	14	52	26	77508	-2,74813	-59,8375	9762	4,7	0	-3	4	6
2011	8	20	16	19	52	720180	-2,61529	-59,8982	14815	8,2	0	-3	4	6
2011	8	20	16	21	44	657934	-2,74242	-59,8266	11169	11	0	3	4	6
2011	8	21	17	54	11	867084	-2,78275	-59,9525	16282	5,5	0	-3	4	6
2011	8	22	18	22	29	816836	-2,67436	-59,889	15172	11,3	0	3	4	6
2011	8	22	18	23	4	452612	-2,7693	-59,8645	14095	15,6	0	-3	4	6
2011	8	22	18	23	4	556941	-2,70475	-59,8695	15716	16,4	0	-3	4	6
2011	8	22	18	26	13	53935	-2,99307	-59,937	9341	2,6	0	3	4	6
2011	8	23	19	9	59	251411	-2,89036	-59,8619	11613	16	0	3	4	6
2011	8	2	22	4	39	869451	-2,81887	-59,8039	9368	13,1	0	-3	4	6
2011	8	17	13	3	21	839926	-2,90413	-59,8489	10754	15,4	0	1	4	6
2011	8	19	15	55	48	35238	-2,95673	-60,189	18285	10	0	-3	4	6
2011	8	20	16	6	47	891059	-2,84582	-59,8681	10417	7,8	0	1	4	6



Controle de qualidade

Diferença do tempo de chegada(ATD)

Tabela 1- Tabela processada com software específico, com o objetivo de localizar somente os raios da área de estudo. Verifica-se o detalhe com as colunas referente a diferença do tempo de chegada(coluna 11) e a que atribui o controle de qualidade dos dados(coluna 12) Fonte: o autor

Em seguida a esse processamento, todos os dados verificados foram utilizados para fazer a comparação com os dados de precipitação.

4.5 – Processamento do par de dados chuvas versus raios

Após o processamento em separado de cada variável, ambas foram simultaneamente observadas.

Para cada dia do período de três anos, foi feita uma minuciosa observação visual com o objetivo de encontrar valores de chuvas fortes (acima de 7,5mm/hora). Quando esse valor não era encontrado num intervalo de 30 minutos, verificava-se os intervalos de aproximadamente 30 minutos, anteriores ou posteriores àquele, e efetuava-se o somatório desses valores, e no caso em que a soma atingisse o ponto crítico para chuva

forte($7,5 \text{ mm.h}^{-1}$), este ponto era acrescentando na análise dos dados. Na situação em que a quantidade de chuva dos pontos circundantes não atingisse o critério para intensidade forte, verificou-se os valores com defasagem média de 1 hora para mais ou para menos, essa técnica, tem como objetivo garantir que os valores totais da chuva para os eventos analisados estejam dentro do mínimo necessário para ser caracterizada como chuva forte.

O deslocamento das chuvas para pontos com uma defasagem de 1 hora a mais ou a menos, não desqualifica a análise, pois segundo RIBEIRO (2010) os raios antecedem as chuvas em aproximadamente 70 minutos.

4.6 – Construção dos gráficos de regressão.

A construção dos gráficos de regressão que relacionam chuvas e raios foi realizada em com o auxílio de planilhas de softwares com essa finalidade, em diversas etapas até chegar aos resultados finais apresentados neste trabalho.

Em princípio, analisaram-se todos os dados de chuvas e raios para o período de estudo, sem fazer nenhuma discriminação qualitativa, para verificar se o comportamento dessas variáveis, especialmente numa área pequena como a utilizada nesse estudo, comparada com outros trabalhos nessa linha, atendia uma linha de tendência. Após a negativa nessa verificação, mudamos a forma de análise baseando-se desde então, no critério de chuva forte (REICHARDT 1986) para verificar se a tendência para a nossa área de estudo seria verdadeira, ou não.

Os coeficientes de determinação e de correlação foram calculados utilizando ferramentas do Excel, em diversos momentos que compreende o período de estudo. Calcularam-se esses coeficientes para relações diárias das variáveis envolvidas, e também foram realizados cálculos para relações quinzenais, mensais, trimestrais e semestrais, discriminando os períodos menos chuvosos e chuvosos, com o objetivo de fazer comparações entre esses diferentes períodos de precipitação a fim de verificar em que situação para a região estudada teria uma melhor linha de tendência entre descargas elétricas e chuvas.

Para a análise de regressão a variável chuva por não depender da variável raio para acontecer, foi discriminada como a variável independente (x), logo as descargas elétricas em estudo estão sendo nominadas de variável dependente(y).

4.7 – Tratamento dos dados para o estudo de casos extremos

Os estudos de casos extremos foram escolhidos por se destacarem em relação à todos os outros pares ordenados dentro do período de estudo.

Foram escolhidos de todos os dias e discriminados sazonalmente, aqueles em que a chuva atingisse o critério de chuva forte. Essa distinção foi feita, pois essas precipitações por apresentarem características climatológicas diferentes, e serem causadas por sistemas precipitantes distintos. Os dados de raios para esses períodos não foram filtrados, pois a literatura não informa qual o quantidade mínima de raios para ser considerado extremo. Então para essas análise foram utilizados eventos de um mesmo período em que a chuva atingiu 40 mm e só foram verificados 10 raios, e também eventos elétricos com 25 mm de chuva e 40 raios. Há que se inferir que não há disponibilidade de dados de raios em Manaus, de modo que se possa fazer uma média climatológica. Portanto, os valores de raios aqui analisados, não puderam ser comparados com valores médios.

4.8 – Distribuição dos raios na área de estudo

Uma análise da distribuição total dos raios em todo o período de estudo, foi realizada, a fim de verificar como se comportava geograficamente essas descargas dentro da área de estudo. Para gerar as imagens, onde se observa o comportamento das DEAs, utilizou-se um programa computacional com especificidade para tal.

4.9 – Análise dos dados

Os pares de dados, que constituem a essência desse trabalho foram analisados utilizando gráficos de regressão linear.

A variável independente utilizada foi a chuva, enquanto os raios foram nominados como variável dependente. Fisicamente temos chuvas sem raios, porém não há raios sem pelo menos a formação de um sistema precipitante (mesmo sem chuvas), por esse motivo a variável raio tem um grande dependência da variável precipitação.

Os coeficientes de correlação e determinação, junto com os gráficos de regressão linear, foram utilizados para verificar a possível tendência entre determinados tipos de chuvas (análise quantitativa e qualitativa) e as descargas atmosféricas a elas associadas.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Média mensal de precipitação.

Observa-se na figura 16 as médias mensais pluviométricas no período que compreende dezembro de 2008 a novembro de 2011, cuja soma equivale a 3 anos de estudos. Os anos 1, 2 e 3, correspondem respectivamente aos anos de 2009, 2010 e 2011.

O mês mais chuvoso de todo o período foi o mês de abril de 2011, cuja quantidade total de chuva foi 538,8 milímetros. O somatório de todos os meses de abril dos três anos equivale a 1296,4 mm, o que também representa os maiores valores de todos os períodos mensais.

Durante o período climatologicamente mais seco, o mês com menor índice pluviométrico foi o mês de setembro também de 2011, no qual a precipitação não passou dos 39,2 mm na área de estudo.

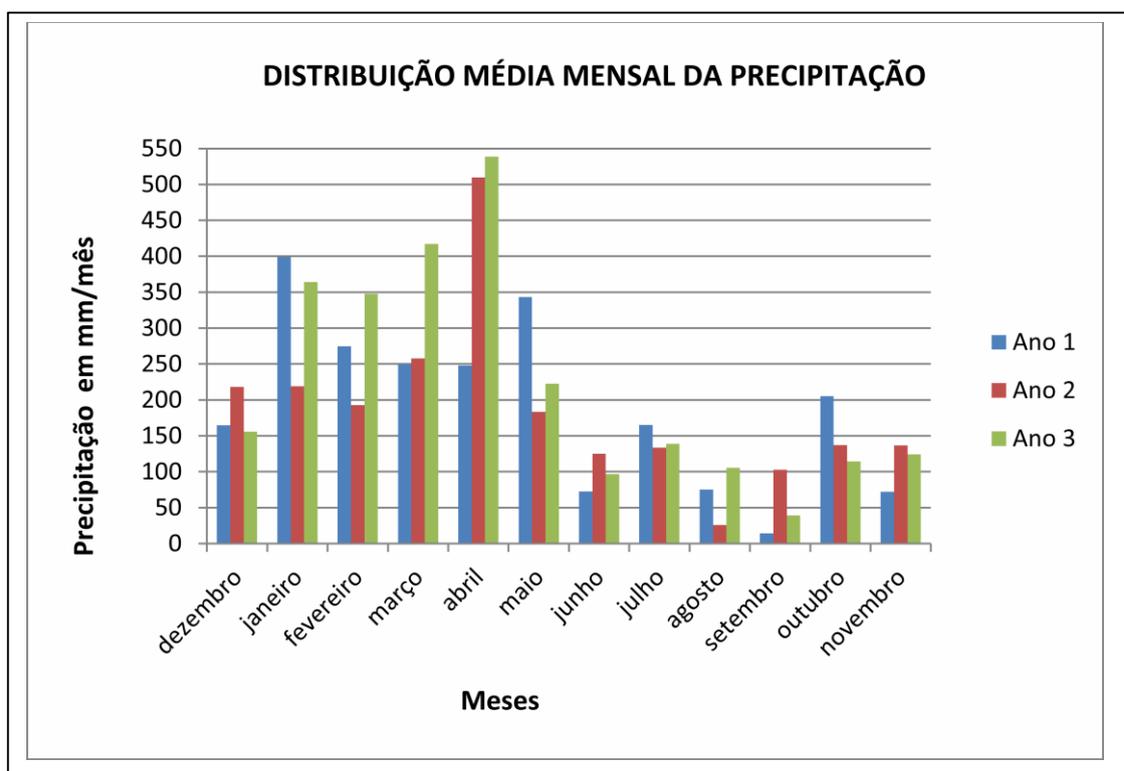


Figura 16 – Média mensal de precipitação cujos meses com maiores e menores incidência de chuvas estão adequado à climatologia da região onde fica a área de estudo.

Ao avaliarmos os meses mais chuvosos de cada ano, observa-se que para o ano de 2009, o mês de janeiro apresentou 399 mm. Segundo o boletim Climanálise, para este mês, as chuvas excederam a média histórica na bacia amazônica, pois a Zona de Convergência do Atlântico se configurou em dois episódios. O primeiro ocorreu entre os dias 04 e 08, e o segundo aconteceu de 20 a 24 desse mesmo mês. Estas configurações de ZCAS para este período, que podem ser visualizadas nas figuras 17.a e 17.b concordam com os valores pluviométricos registrados na estação, que se localiza na área de estudo.

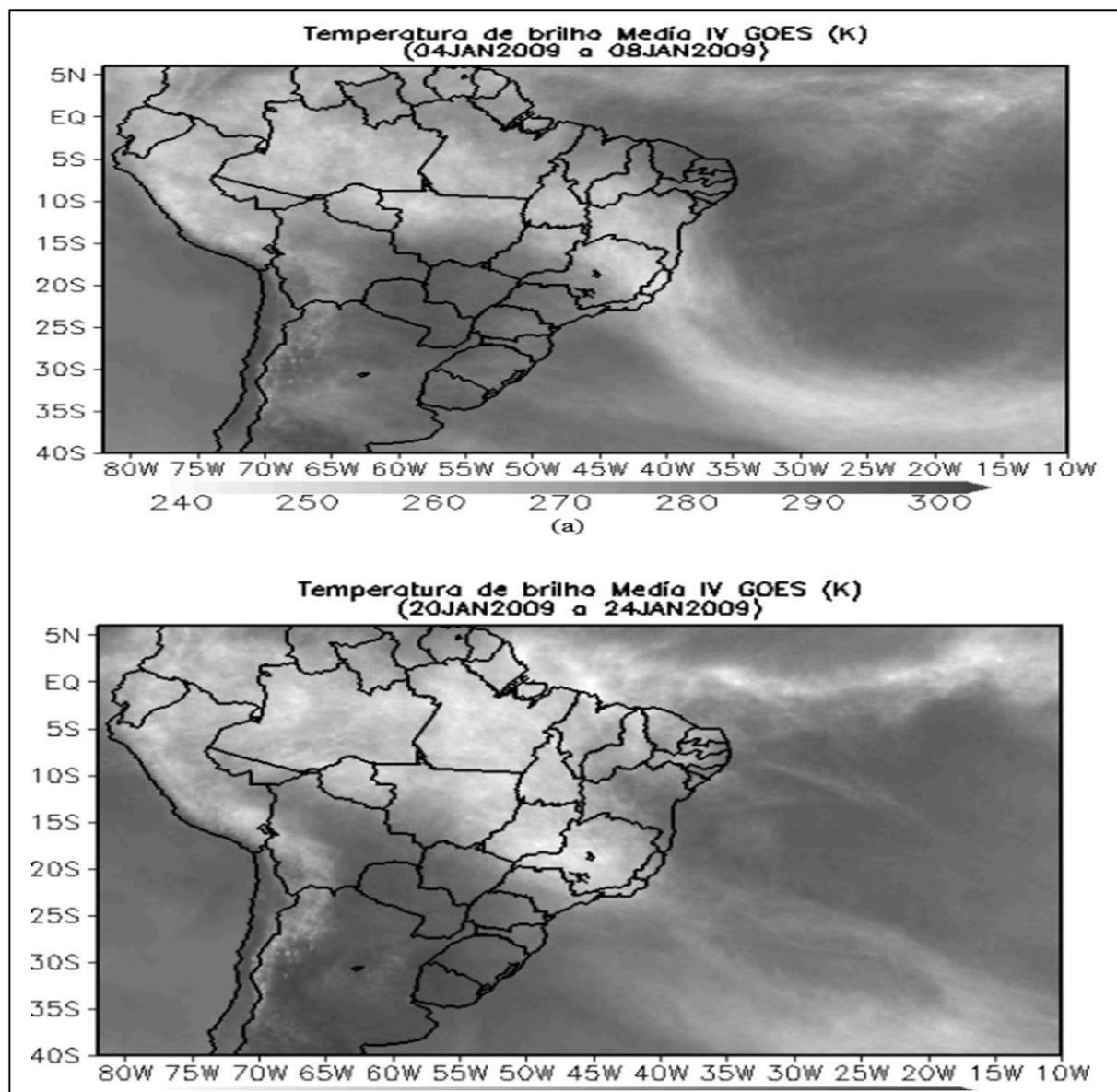


Figura 17 – Ilustração dos episódios de ZCAS no dias 04 a 08(a) e 20 a 24(b), através da temperatura de brilho médio obtida pelo satélite GOES-10, onde verifica-se na figura b uma atuação mais intensa desse sistema sobre a área de estudo: Fonte Climanálise – CPTEC

Analisando as chuvas, na área de estudo, para esses dias de episódios de ZCAS, ainda no mês de janeiro de 2009 observou-se que entre os dias 04 e 08 precipitou 76,2 mm, enquanto nos dias 20 a 24 a precipitação acumulada foi de 48,4 mm. Infere-se daí que apesar do evento ZCAS se mostrar mais intenso no segundo momento, a precipitação foi, de acordo com os dados, maior no primeiro evento de ZCAS.

5.2 – Quantidade total de descargas elétrica na área de estudo

A figura 18 representa o total de raios observado durante os 3 anos do período de estudo, onde se pode observar

De um total de 1888 raios nos três anos de estudo, verifica-se que no mês de agosto de 2009 caíram 478 raios(25% do total), valor este que representa o maior índice de todos os meses. Porém se observamos os meses de agosto dos anos subsequentes não encontramos essa mesma tendência (muito acima da média para esse mês, visto que em agosto de 2010 não foi detectado nenhum raio, e em agosto de 2011 somente 3), o que pode significar um provável erro da rede de detecção de DEAs, portanto, não podemos inferir que o mês de agosto é o mês de maior incidência de descargas atmosféricas. Outra explicação para esse fenômeno elétrico extremo se deve ao fato de que dos 478 raios que caíram no mês de agosto, 434 destes (90 %) caíram somente em um dia, no qual as imagens do satélite GOES-12(figura 18) fornecida pelo CPTEC, mostram um Sistema Convectivo, com duração de 1 hora entre 16:00 e 17:00(HL), momento esse que coincide com o horário de queda dos raios nesse ponto do estado do Amazonas. Segundo RIBEIRO (2010) esses grandes sistemas, quase sempre são acompanhados de intensa atividade elétrica.

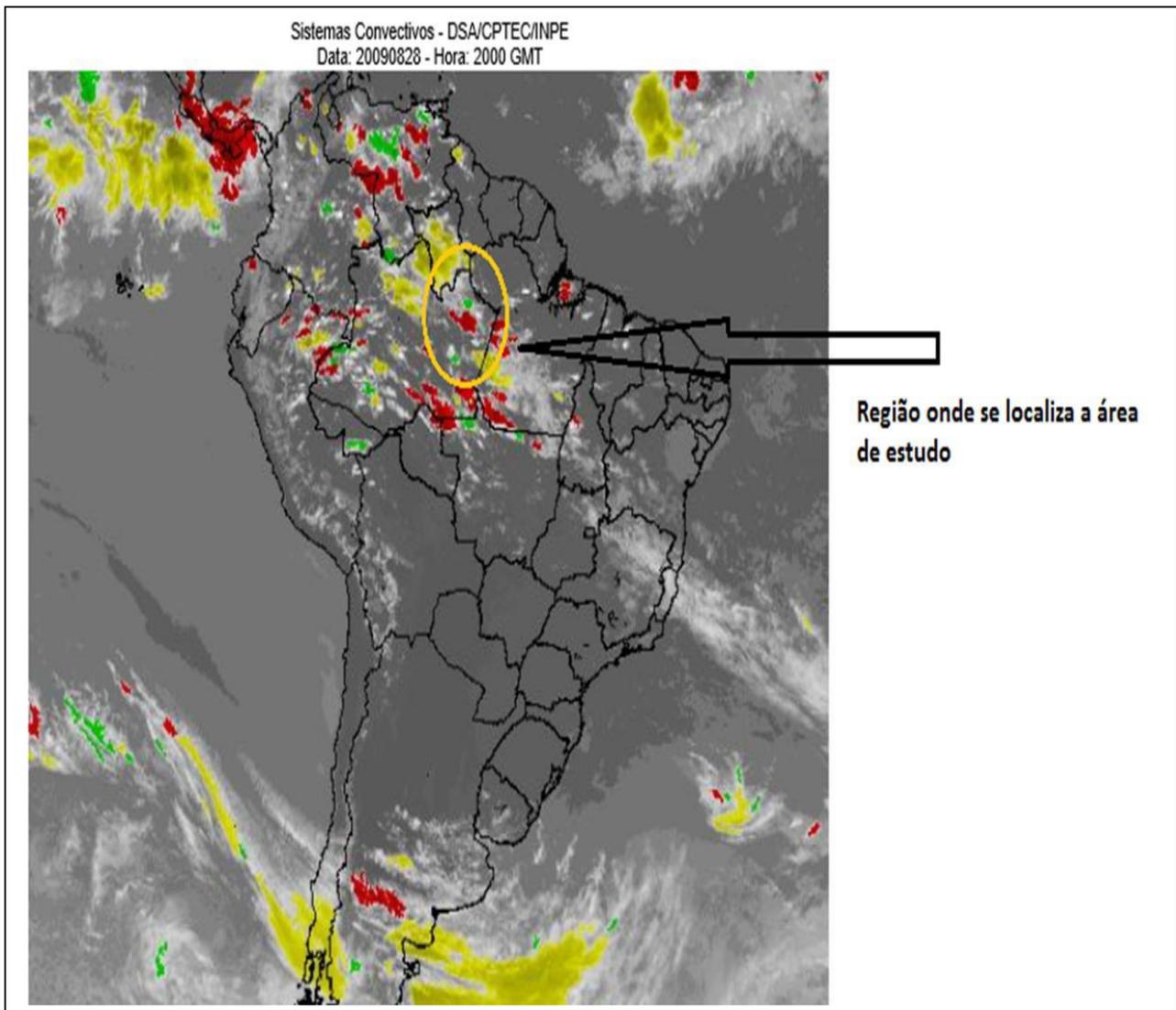


Figura 18 – Um sistema convectivo se intensificando nas proximidades da área de estudo no dia 28 de agosto de 2009 às 16:00(HL) , momento coincidente com a intensa incidência de 434 raios. Fonte : DSA/CPTEC/INPE

Foi verificado também nesta análise do total de raios que no trimestre agosto-setembro-outubro(2009), houve um grande numero de descargas elétricas (890 raios), muito maior do que em qualquer outro trimestre nesse mesmo ano.

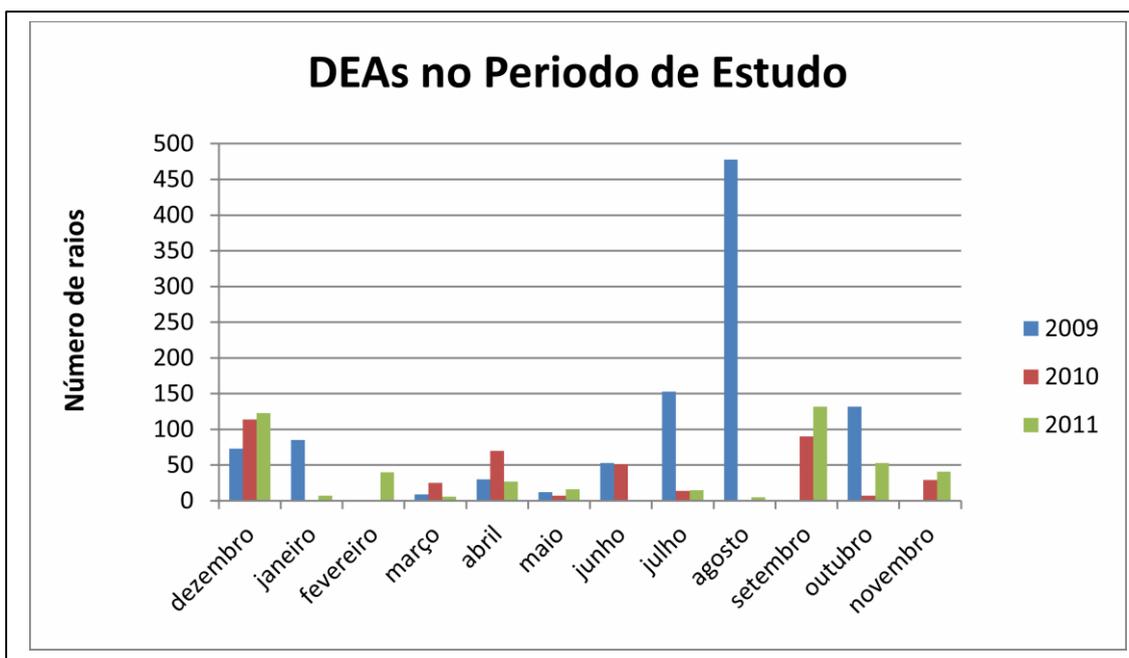


Figura 19 – Quantidade total de raios na área de estudo, onde verifica-se que no mês de agosto de 2009 houve uma quantidade muito acima da média do período, e no período menos chuvoso a quantidade de raios foi de 66% do total contra 44% de DEAs no período chuvoso.

A fim de observar se haveria alguma diferença em relação à distribuição espacial dos raios no período de estudo, plotou-se todos os raios ocorridos entre os anos de 2009 e 2010, e associou-se essas descargas aos detalhes da superfície da área de estudo. A partir desse procedimento, observou-se (figura 20) que a pequena dimensão da área comparada à quantidade total dos raios, impede que seja feita alguma inferência. Pois percebe-se que não há grande diferenças entre as diferentes níveis do solo e a incidência das descargas elétricas sobre este. O ponto do mais alto da área de estudo é 120 m, porem a maior porcentagem do terreno esta entre 60 e 90 metros. Acredita-se que esta pequeno desnível seja responsável pela distribuição praticamente homogênea dos raios. Isto certamente seria melhor visualizado numa área de extensão bem maior que essa.

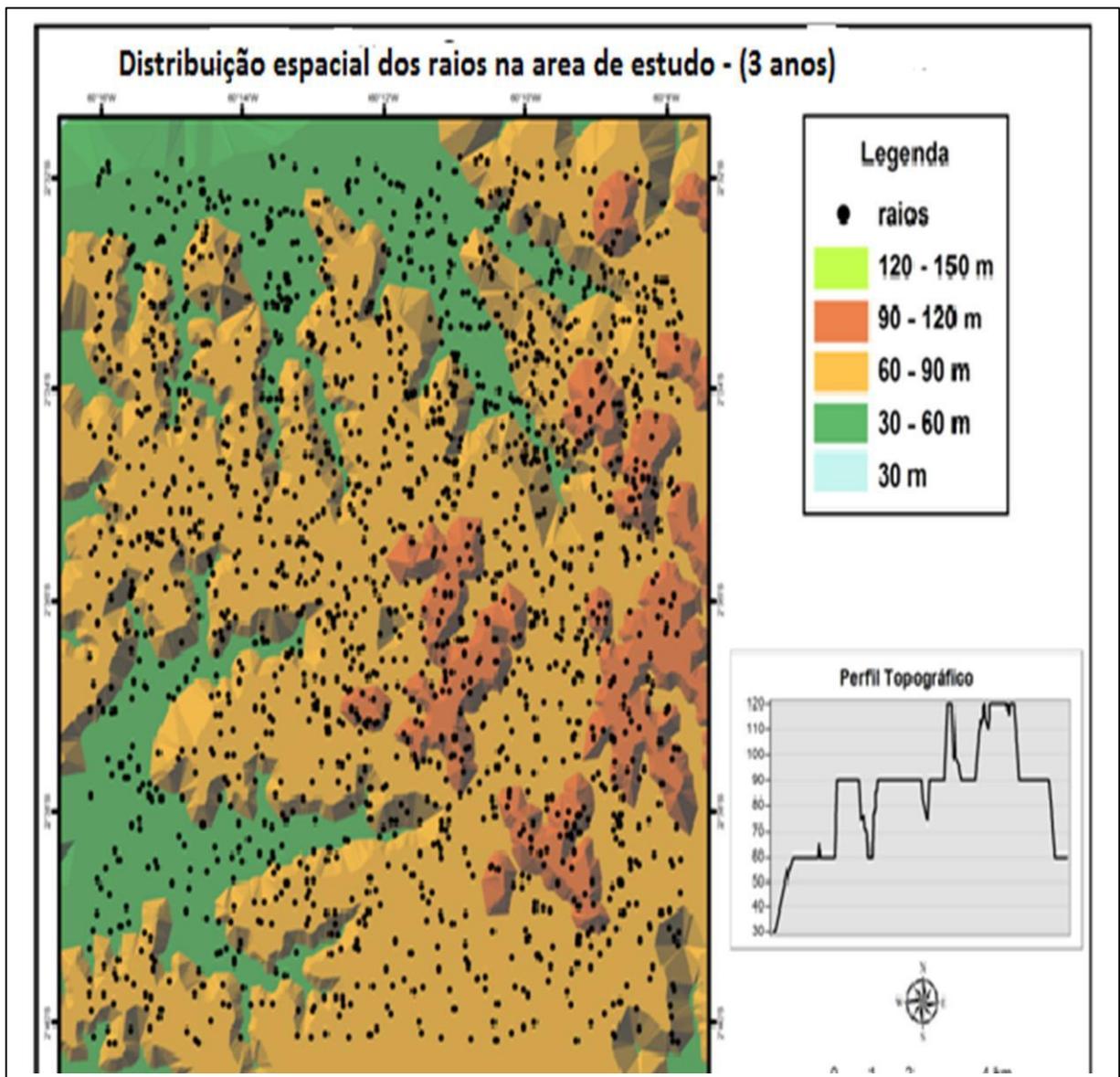


Figura 20 – Distribuição espacial dos raios na área de estudo durante os 3 anos, onde observa-se uma homogeneidade na distribuição espacial das descargas elétricas

5.3 – Relação entre raios e chuvas na área de estudo

5.3.1 – Distribuição mensal de raios e chuvas na área de estudo

Nas figuras 21, 22 e 23, estão representadas as quantidades totais de raios simultaneamente com os totais de chuvas para cada um dos três anos que compreende o período do estudo. A primeira figura corresponde ao ano de 2009, a segunda a 2010, e a terceira, 2011. Observa-se que no ano de 2009 o mês com a maior quantidade de chuvas foi janeiro com 399 mm, já no ano de 2010, a maior quantidade de precipitação ocorreu em abril com 509,6 mm, enquanto em 2011, 538,8 mm de chuvas caíram também no mês de abril.

Os picos de chuvas verificados nesse trabalho, especialmente nos dois últimos anos, coincidem com a posição da ZCIT, mais ao sul do globo (em torno de 2°S), nos meses de março a abril (período normalmente considerado chuvoso em parte da Amazônia).

O pico de raios em cada ano, sempre teve uma defasagem. Em 2009, o máximo de chuvas antecedeu o máximo de raios em 7 meses, pois verifica-se que este pico da atividade elétrica deu-se em agosto desse ano com um valor numérico de 478 raios. No segundo ano de observação o pico de raios (114 DEAs) antecedeu o de chuvas em 4 meses. Já em 2011, o máximo de raios (131 unidades) caiu em setembro, cinco meses após o máximo de chuvas. Infere-se então que a relação entre raios e chuvas nessa distribuição mensal não tem uma relação direta. Porém as chuvas até aqui analisada, correspondem à quantidade total, sem discriminação. RIBEIRO (2010) observou dependendo do sistema precipitante a relação pode ser mais direta. Infere-se que ao relacionar raios e chuvas não se pode fazê-lo sem detalhar e especificar o sistema que causou a chuva, ou pelo menos separar as chuvas com características semelhantes, como por exemplo, o horário em que ela ocorre.

É importante ressaltar que nesta relação entre raios e chuvas com frequência mensal, não foi realizado nenhum filtro, os dados estão exatamente como disponibilizados por suas respectivas fonte. POMPEU (2012) e DOS SANTOS (2010) observaram que a aplicação desses tipos de filtro garante uma relação mais direta entre as variáveis, pois os pares ordenados com valores nulo são praticamente eliminados, contudo essa técnica não foi utilizada nesse trabalho, para que os dados nessa etapa mostrassem exatamente a realidade desses eventos.

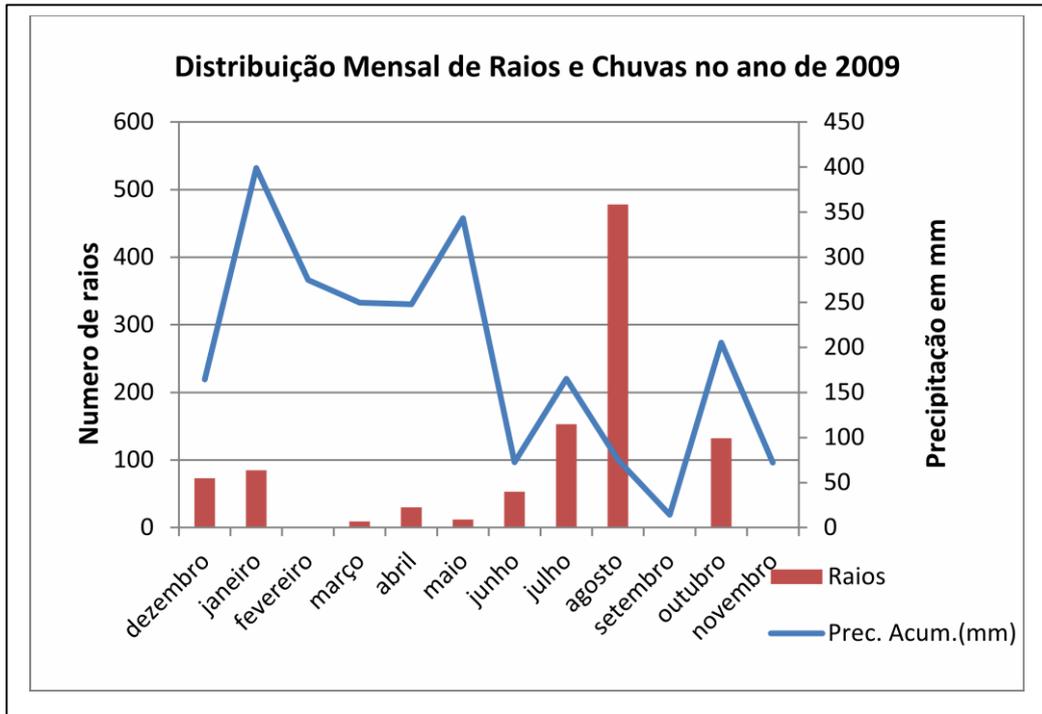


Figura 21 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2009, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 7 meses.

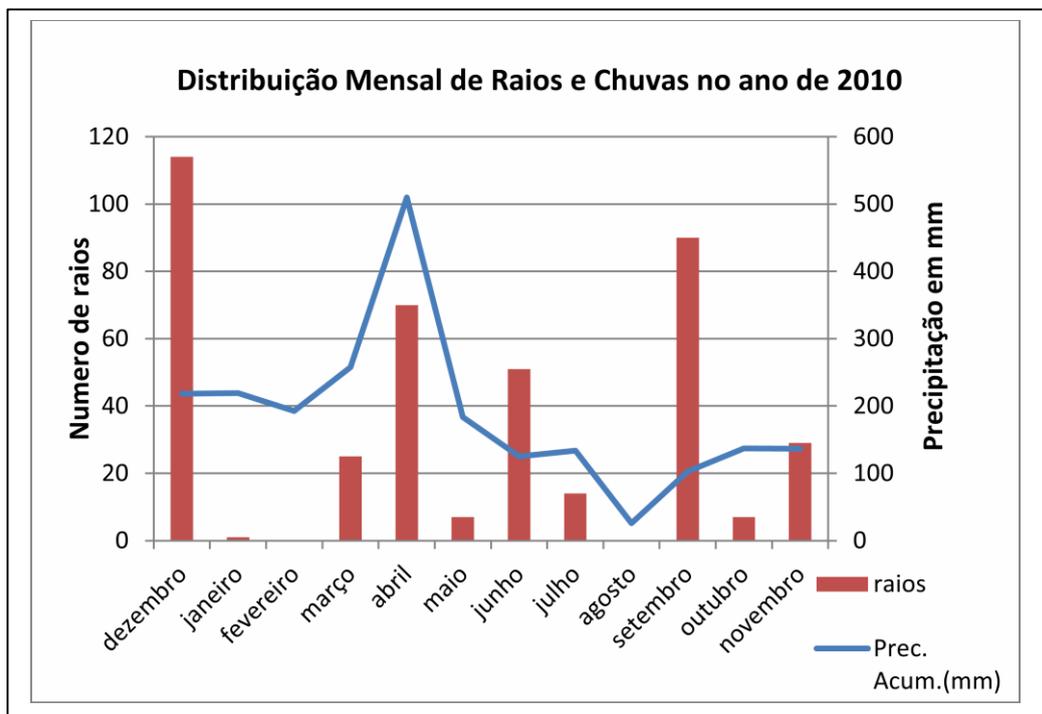


Figura 22 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2010, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 4 meses, e no mês de abril a relação entre chuvas e raios é bem mais direta que nos outros meses.

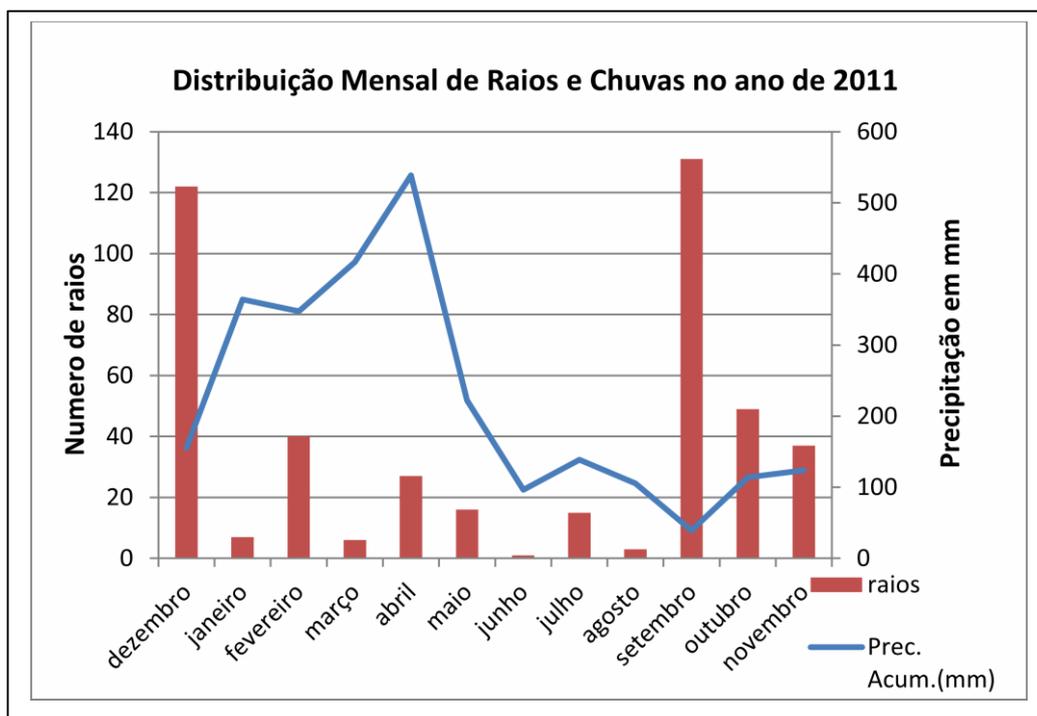


Figura 23 – Distribuição mensal de raios e chuvas no ano de 2011, onde verifica-se que a defasagem entre os picos são de 5 meses.

Percebe-se com essa análise anual porem com frequência mensal que a relação entre chuvas é raios não é direta em nenhum ano.

5.3.2 – Distribuição trimestral de raios e chuvas na área de estudo

Para verificar se a relação entre chuvas e raios na área de estudo se comportaria de maneira mais direta, além da relação mês a mês, foi feita uma relação também trimestral.

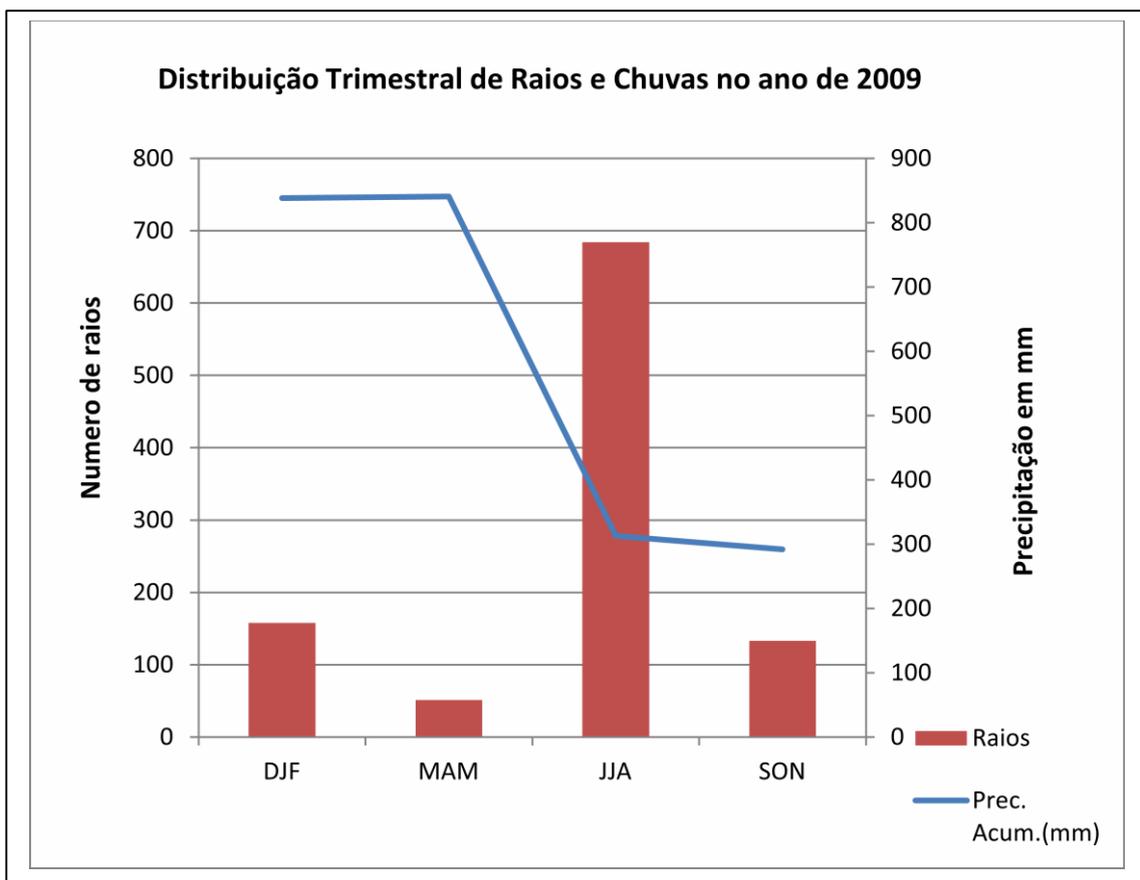


Figura 24 – Distribuição trimestral entre raios e chuva no ano de 2009, onde se pode observar uma pequena variação de chuvas nos primeiros trimestres e uma grande variação de descargas elétricas nos dois últimos semestres do ano.

Verifica-se de um modo geral, que não é direta essa relação se levarmos em conta todos os tipos de chuva, isto é, sem caracterizar e discriminar os tipos de precipitação, a relação entre estas e raios não se comporta linearmente. Pode-se observar na figura 24 que, no ano de 2009 que o pico de chuvas 840,8 mm acontece no segundo trimestre do período chuvoso (MAM), e o máximo de raios (684) acontece no trimestre seguinte (JJA), que é o início do período mais seco do ano, segundo dados do CPTEC/INPE. Entre os primeiros trimestres do período chuvoso é observado que, enquanto as chuvas variam de 838,4 para 840,8 mm, o numero de raios cai de 158 para 51 no segundo semestre. No período seco a variação do numero de raios é muito grande, reduzindo de 684 para 133 raios que atingiram a área de estudo.

Observando o segundo ano do período de estudo, que a medida em que aumentam as chuvas nos trimestres do período chuvoso, os raios diminuem (uma relação de inversão). Já no período seco as chuvas e os raios aumentam proporcionalmente, como se pode observar na figura 25.

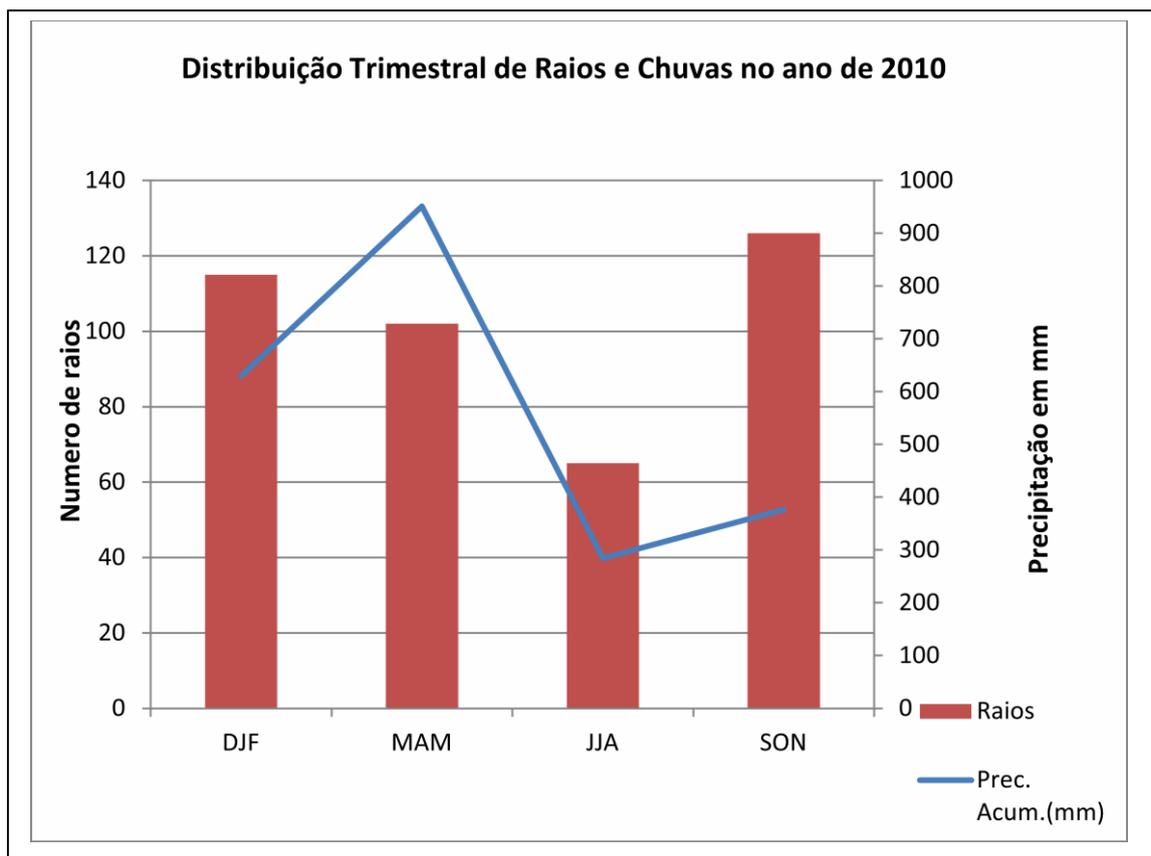


Figura 25 – Distribuição trimestral de raios e chuvas para o ano de 2010, onde se vê uma inversão no período chuvoso e uma relação direta no período seco.

No terceiro e ultimo ano da análise, verifica-se no período chuvoso uma tendência semelhante ao que aconteceu em 2010, entre as variáveis avaliadas. As chuvas no trimestre DJF são 867,4 mm e aumentam para 1178,4 mm no trimestre seguinte. Simultaneamente a essa variação positiva das chuvas, a quantidade de raios cai de 169 no primeiro trimestre chuvoso para 49 nos meses de março abril e maio (figura 26)

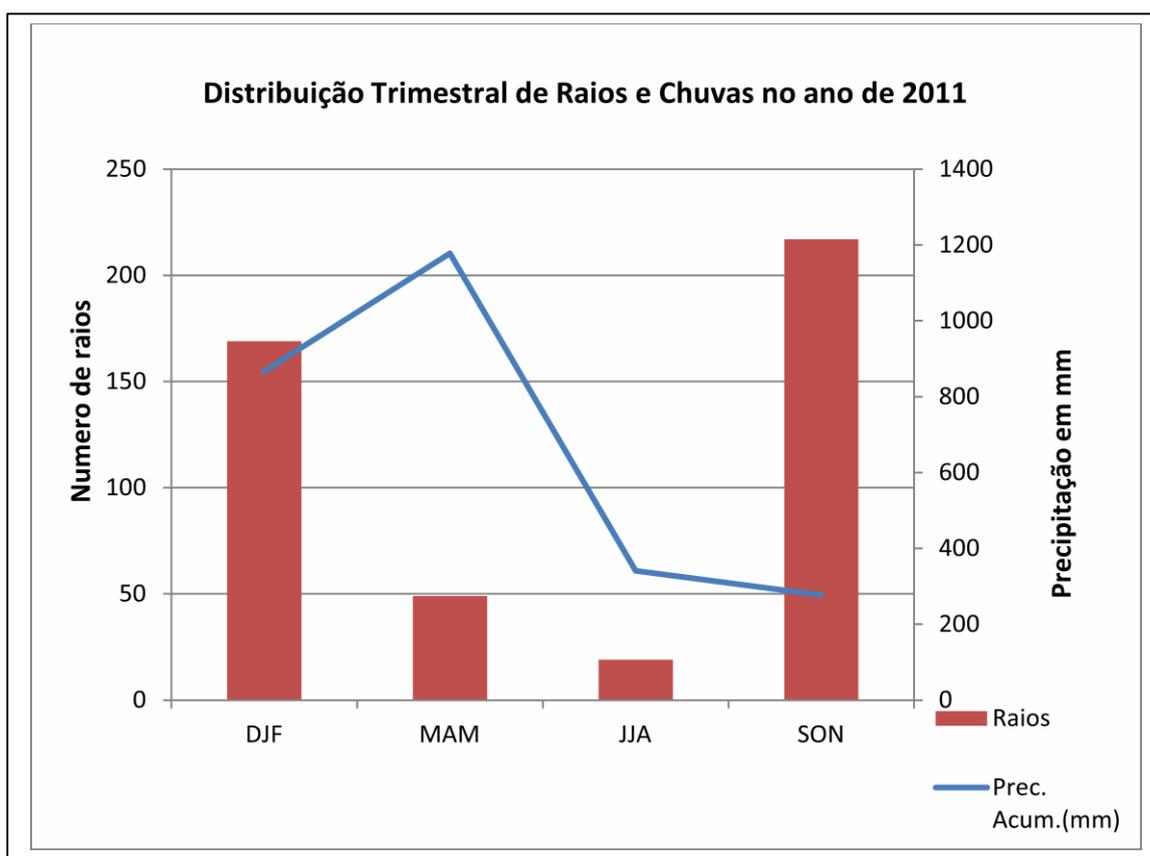


Figura 26 – Distribuição trimestral de raios e chuvas no ano de 2011, onde percebe-se que o período chuvoso acompanha a mesma tendência dos outros anos.

Percebe-se que no período seco, a precipitação no trimestre JJA é 340,8 mm, e diminui para 277,4 mm no ultimo trimestre do período seco do ano de 2011. O numero de raios da um salto de 19, no terceiro trimestre do ano, para 217 no ultimo, mostrando também uma relação inversa. Apesar do trabalho não ter uma quantidade de dados que possa representar a climatologia da região, pode-se inferir que, para o período estudado, a relação entre chuvas em raios, mostra uma melhor tendência inversa nos períodos chuvosos, do que nos menos chuvosos, pois nos três anos, na medida em que a chuva aumenta os raios diminuem na época chuvosa, enquanto nos trimestres menos chuvosos do ano, somente em dois anos, houve uma tendência de inversão. Acredita-se que com uma maior quantidade de dados essa duvida pode ser mais bem esclarecida.

5.4 – Análise de Regressão de Chuvas e Raios

Para a análise de regressão dos pares de dados chuvas e raios, foi necessário fazer um procedimento diferente daqueles, cujos resultados foram já apresentados até aqui. Verificou-se, devido ao grau de complexibilidade da relação destas duas variáveis, e segundo trabalhos como o de RIBEIRO (2010), que ao relacionarmos raios e chuvas, precisamos diferenciar as chuvas de acordo com o sistema responsáveis por elas. Não se trata aqui de discriminar as chuvas levando em conta grandes processos convectivos como ZCIT, ZCAS e outros. A diferenciação entre chuvas foi de acordo com o valor numérico. REICHARDT (1986), do ponto de vista da intensidade caracterizou as chuvas como, fraca, cuja precipitação é de no máximo 2,5 mm/h, moderada, quando cai de 2,5 a 7,5mm/h e as chuvas forte, cuja medida excede os 7,5 mm/h. Porém a grande maioria das chuvas aqui foram com quantidades muito acima desse valor, então é possível caracteriza-las como chuvas extremas.

Ao se fazer os gráficos levando em conta todas as chuvas do período, os resultados para grande parte da análise não eram nada satisfatórios. Com chuvas fortes, as descargas elétricas em nossa área de estudo, estava mais diretamente relacionadas, concordando com trabalhos como o de RIBEIRO (2010). Há que se enfatizar que as chuvas e raios analisadas nos gráficos a seguir aconteceram simultaneamente em um período que vai desde alguns minutos a no máximo de duas horas.

Estatisticamente quando os pontos utilizados em um gráfico de regressão estão muito afastados(outliers) da reta que mostra a linearidade, os valores dos coeficientes de correlação(r) e determinação (r^2) podem ser gravemente alterados (Moore e McCabe, 2002), especialmente quando a amostra é pequena. Então foi necessário fazer uns ajustes, onde os outliers foram desconsiderados.

Os dados utilizados foram somente referente as chuvas que ocorrem a tarde, devido a condições mais propícias aos processos de eletrificação de uma nuvem, e devido a relatos de próprios moradores da região, sobre a hora do dia em que caem mais raios.

Os gráficos foram feitos para os períodos chuvosos e seco, a fim de verificar o comportamento da relação entre chuvas e raios na área de estudo.

5.4.1 – Períodos chuvosos e menos chuvosos

Para o ano de 2009, percebe-se na figura 27 que no período chuvoso analisando somente as chuvas intensas e retirando dois pontos que apresentavam grande

discrepância dos outro, encontrou-se um coeficiente de determinação r de 0,486. Este valor segundo CALLEGARI-JACQUES (2003), indica uma correlação linear moderada.

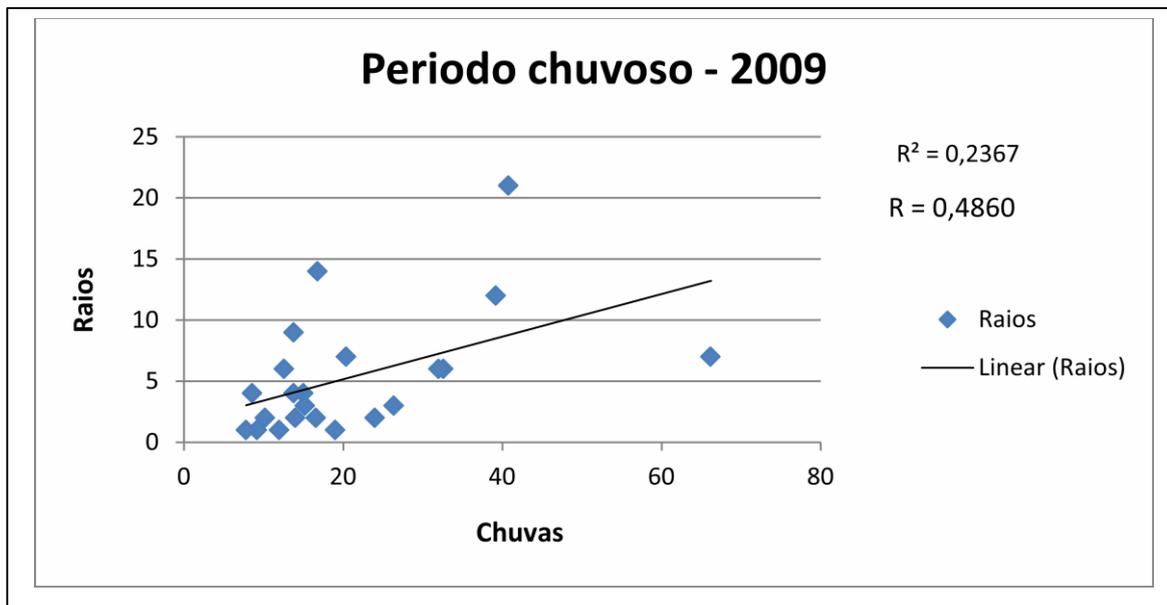


Figura 27 – Análise de dispersão para o período chuvoso de 2009, onde percebe-se que 48% da variabilidade dos raios neste período estão diretamente relacionados com as variabilidade das chuvas

Percebe-se na região inferior mais a esquerda da reta no gráfico acima que o ponto (66.2 , 7) representa um outlier que, após ser retirado deixou a relação ligeiramente maior ($R^2 = 0,3959$ e $R = 5,7592$). Isso demonstra a necessidade de analisar cuidadosamente cada ponto e retirar aqueles em que as variáveis apresentam valores muito discrepantes.

Para o período seco deste mesmo ano, observa-se na figura 28 que o gráfico de regressão indica uma correlação positiva e forte de 0,848, indicando que na medida em que aumentaram as chuvas os raios aumentaram também.

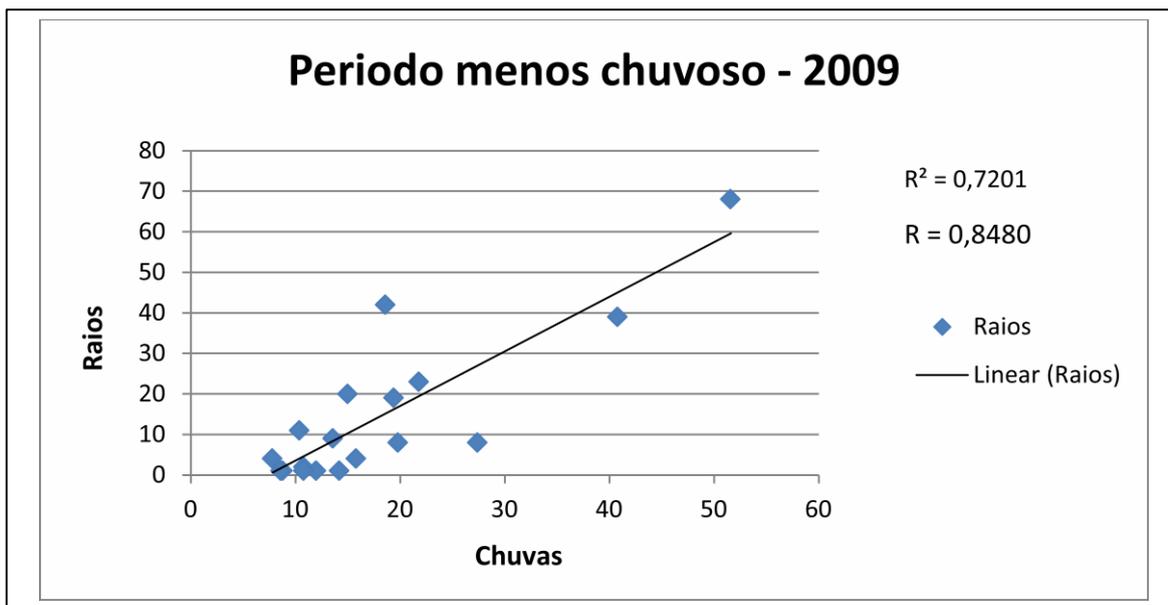


Figura 28 – Analise de dispersão do período seco de 2009, mostrando que 85% da variação dos raios são explicadas pela variação das chuvas neste período.

Para o ano de 2010, no período chuvoso foi necessário retirar 3 pontos discrepantes (outliers), mas mesmo assim o coeficiente de determinação foi muito pequeno, indicando uma correlação fraca e negativa. Infere-se que a maioria das chuvas nesse período não tiveram condições física para gerarem raios, pois quase não mostraram atividade elétrica.(figura 29)

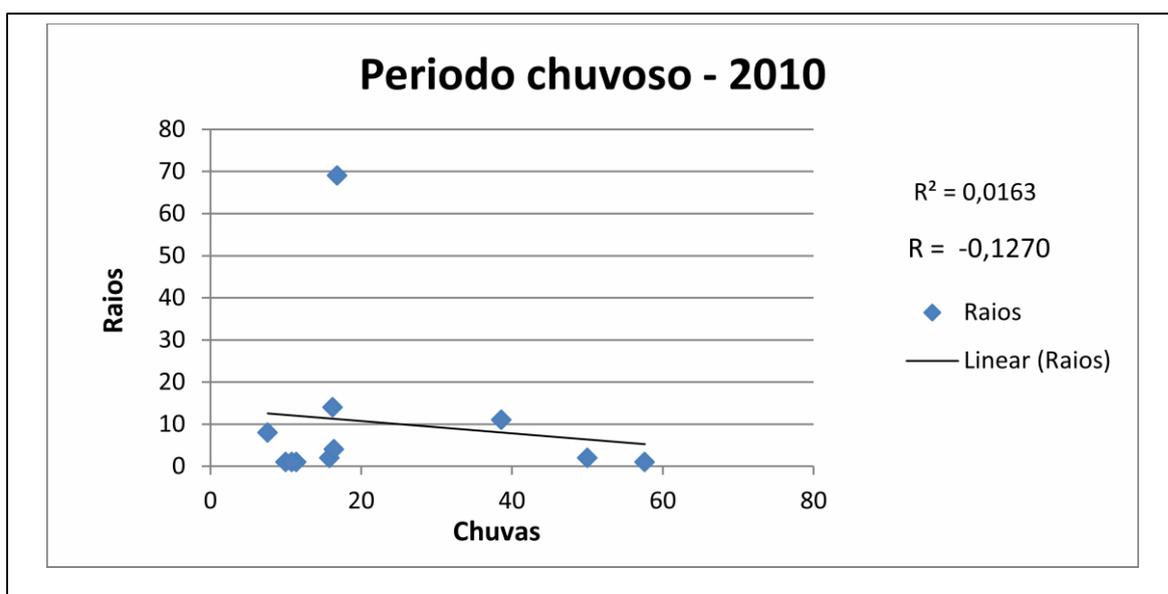


Figura 29 – Analise de regressão do período chuvoso de 2010, onde verifica-se uma correlação muito fraca e negativa

No período seco de 2010 percebe-se uma tendência interessante entre as variáveis, pois o coeficiente de correlação vale 0,68 indicando uma forte correlação linear assim como no período seco do ano de 2009. A quantidade de pares ordenadas foram poucas pois nesse período não aconteceram muitas chuvas fortes (figura 30).

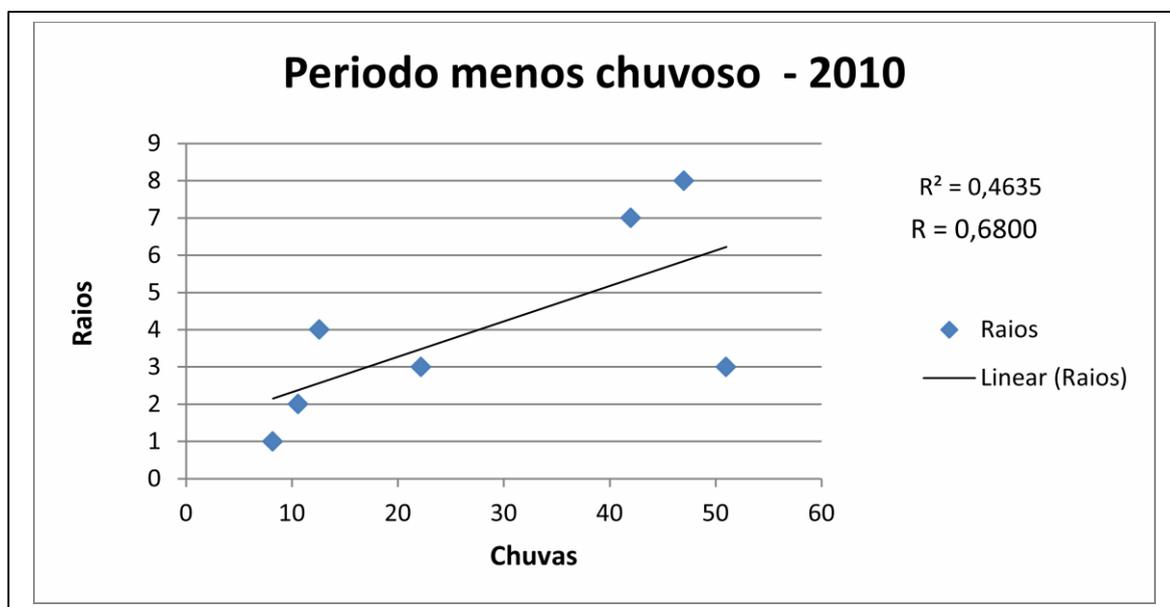


Figura 30 – Análise de regressão dos pares de chuvas e raios para o período seco do ano de 2010, onde percebe-se poucos pontos mais bem relacionados entre si.

No período chuvoso de 2011, a gráfico apresenta a menor de todas as correlações, mesmo retirando 4 outliers, esse valor não apresentou um crescimento significativo, pois a maioria da variabilidade dos raios não apresenta quase nenhuma relação com a variabilidade das chuvas, isso comprovado pelo valor do coeficiente de correlação 0,264 baixíssimo. Observando a inclinação da reta, verificamos que essa correlação é negativa, assim como no mesmo período do ano anterior. (figura 31).

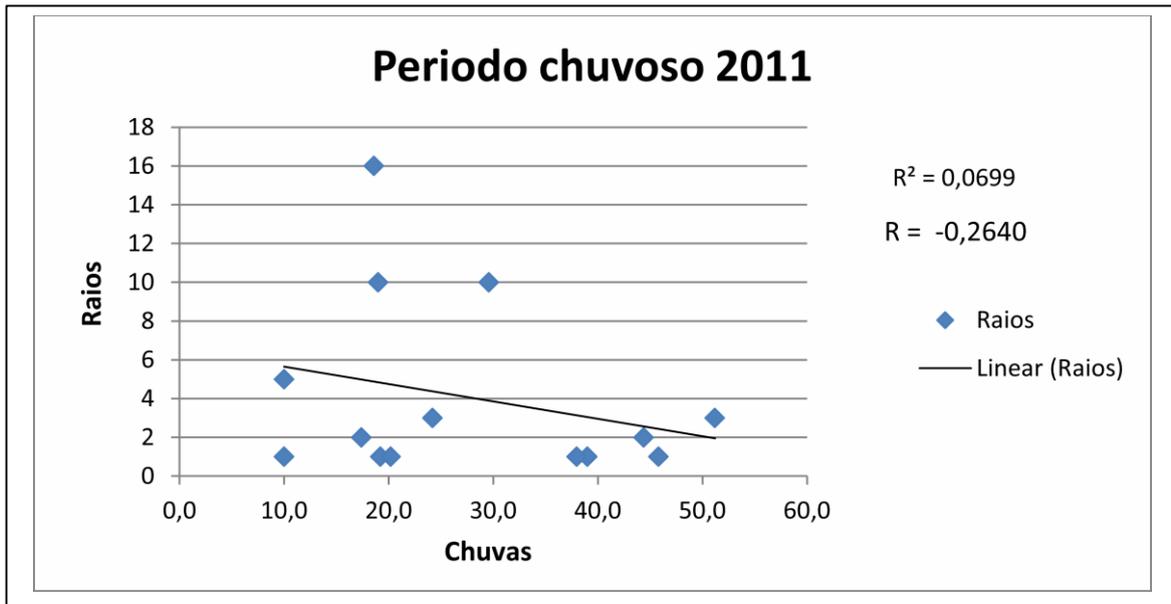


Figura 31 – Análise de dispersão para o período chuvoso de 2011, mostrando uma fraca e negativa correlação.

No último gráfico apresentado, que representa o período seco de 2011, verifica-se que como nos outros períodos com características meteorológicas semelhantes, um comportamento concordante. Os poucos pontos do gráfico são resultados das poucas chuvas fortes no período avaliado, mas eles indicam uma forte correlação ($r = 0,66$). (figura 32)

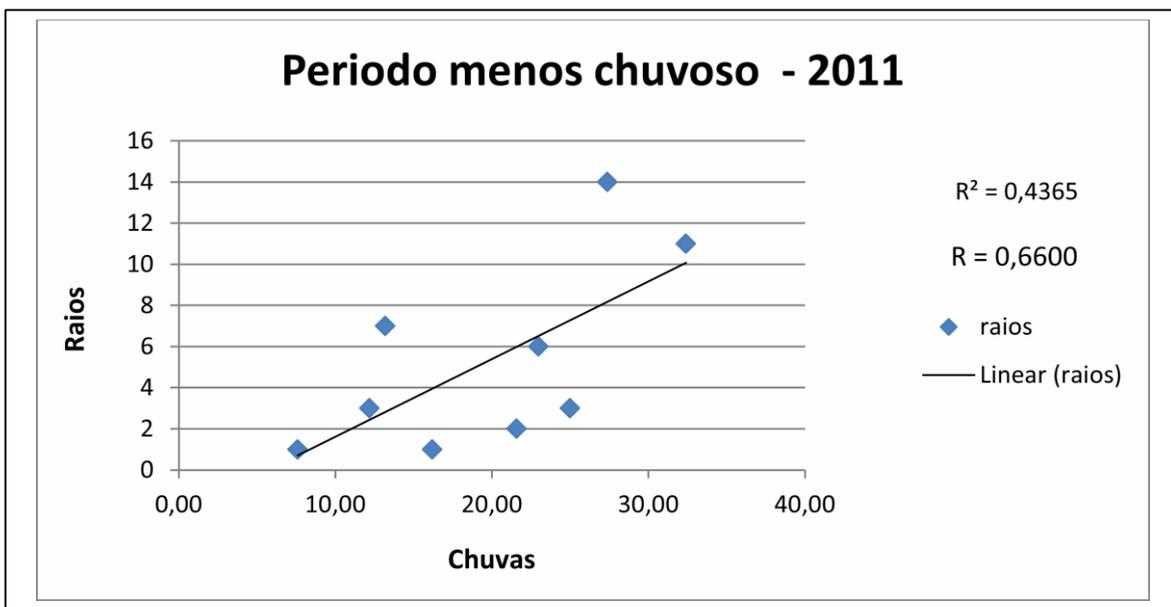


Figura 32 – Análise de dispersão do período seco de 2011, concordando com os períodos menos chuvosos dos outros anos.

A melhor correlação entre chuvas e raios no período seco, pode estar relacionado a disponibilidade em nossa área de estudo à soma de dois ingredientes necessários a formação de chuvas convectivas (com propriedades elétricas mais intensas). O primeiro fator é a água precipitável (vapor d'água disponível para o processo de precipitação (Benwell-1965)), que segundo Marques et al. (1979) é praticamente constante durante todo o ano (variando de 39,4 a 47,9mm), em seguida percebe-se que o segundo fator (ainda mais determinante) que associado ao primeiro pode explicar chuvas mais eletrificadas no período menos chuvoso é maior quantidade de radiação solar que chega à superfície entre os meses setembro e outubro (meses de grande atividade elétrica durante o período de estudo) (Fisch et al. (1998) .

Estes resultados são coerentes com Teixeira et. al.(2008) quando analisou a distribuição e ocorrência de relâmpagos na Amazônia, entre os meses de janeiro de 1998 a novembro de 2000, e verificou que dentre oito localidades na Amazônia, Manaus é uma das que apresentam a maior incidência de descargas elétricas, associadas a sistemas precipitantes, e que no período menos chuvoso existe uma melhor correlação entre essas variáveis, quando comparado ao período com mais chuvas, como pode ser verificado na figura 33.

Gungle e Krider(2006), ao analisar a relação entre chuvas e raios no período quente no estado da Florida(USA), encontrou coeficientes de correlação(R^2) variando entre 0,75 e 0,83, valores que corroboram com os verificados neste trabalho. Aqueles autores relacionaram estas fortes índices a intensas correntes ascendentes nas nuvens de tempestades, que dentre outras características são, fisicamente um dos critérios mais importantes nos processos de eletrificação destas nuvens. (Willians et al. – 1989)

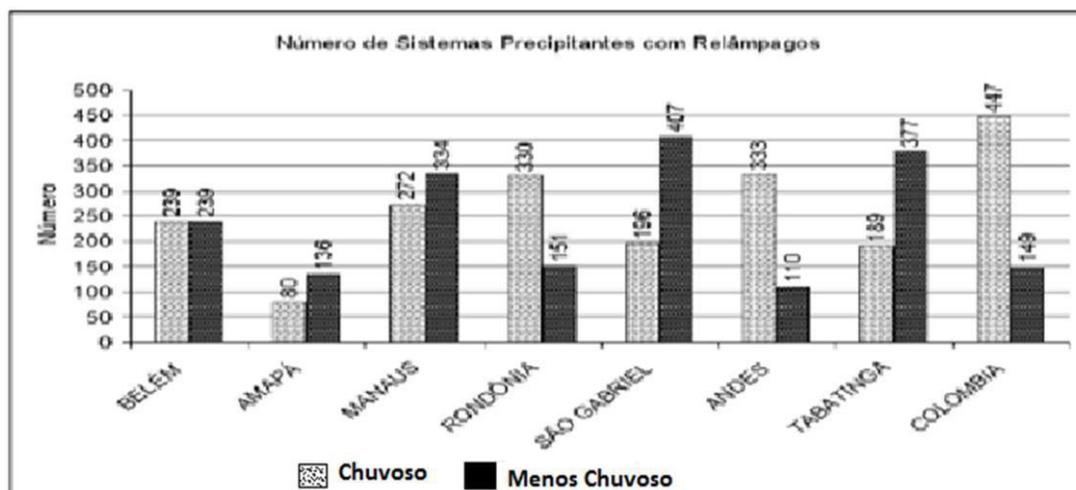


Figura 33 – Numero de descargas elétricas de 1998 a 2000 em localidades na Amazônia, distribuídas entre períodos seco e chuvoso, onde se percebe que além de Manaus, no Amapá, em São Gabriel e em Tabatinga há uma maior distribuição de DEAs no período seco comparada ao período chuvoso. Fonte: Adaptada de Teixeira et al. 2008

Verifica-se também na figura 33 que o comportamento das descargas elétricas no período menos chuvoso seguem uma tendência em Tabatinga, São Gabriel e no Amapá. Porém o trabalho informa que todos os raios aqui analisados estão relacionados com sistemas precipitantes (PFs) que apresentam refletividade maior ou igual a 20 dBZ próximo da superfície, e esses sistemas apresentam grande desenvolvimento vertical, o suficiente para garantir que processos de eletrificação nessas nuvens produzem uma grande quantidade de raios. E apesar de não termos discriminados as chuvas em nosso trabalho com a mesma metodologia utilizada por Teixeira et al. (2008), verifica-se que a relação entre a medida pluviométrica das chuvas (fortes a intensas) e os raios observados apresentam a mesma tendência linear, que aquele trabalho nos mostrou.

A tabela 2 traz uma comparação os valores dos coeficientes de determinação e correlação para todas as chuvas extremas acompanhadas de raios independente da quantidade destes.

É possível inferir dessas informações que os períodos com menos chuvas estão bem mais diretamente correlacionadas com raios do que os períodos chuvosos. E quando se compara esses valores de coeficientes com as relações feitas no início do capítulo em que todas as chuvas foram analisadas, percebe-se que só é possível essa análise discriminando as chuvas sazonalmente, pois as características físicas destas chuvas em cada período, são diferentes entre si.

Ano	Período	r ²	r
2009	Chuvoso	0,2367	0,4860
	Seco	0,7201	0,8480
2010	Chuvoso	0,0163	-0,1270
	Seco	0,4635	0,6800
2011	Chuvoso	0,0699	-0,2640
	seco	0,4365	0,6600

Tabela 2: comparação dos coeficientes de correlação e determinação para os períodos menos chuvosos e chuvoso dos anos de 2009, 2010 e 2011.

Ainda comparado os resultados desse trabalho com outros semelhantes, percebemos que Santos (2010) verificou, ao analisar a relação diária entre raios e chuvas na região Metropolitana de Belém entre 2004 e 2005, que no período chuvoso o coeficiente de correlação (0,0038) era significativamente maior do que no período seco (0,0009), o que segundo a autora essas descargas do período chuvoso estavam associadas a sistemas de grande escala, como a zona de convergência intertropical, enquanto as do período com menos chuvas, os raios estavam associadas a sistemas de meso escala, como linhas de instabilidade que gerava chuvas contínuas porém e com poucas descargas elétricas.

Infer-se destas informações que apesar de este trabalho não ter dados de velocidade das correntes ascendentes (updrafts) das chuvas com descargas elétricas no período menos chuvoso, é razoável afirmar que as melhores correlações aqui encontradas podem estar relacionadas ao

crescimento das nuvens convectivas com propriedades elétricas intimamente ligadas aquelas características que são importantes nos processos eletrificatórios dessas nuvens frias do período com menos chuvas, pois segundo Pessi e Businger(2008), o aumento do fluxo de massa para cima resulta em precipitação convectiva pesada.

6-CONCLUSÕES

Pode-se concluir em principio, que a relação entre raios e chuvas na área escolhida para esse estudo, não é simples e nem necessariamente direta.

De acordo com a quantificação dos raios incidentes no período analisado, associados à precipitação, verificou-se que, para obter uma melhor resposta dos gráficos de dispersão gerados, se faz necessário discriminar os tipos de chuvas que serão correlacionadas com as descargas.

Analisando-se todas as chuvas de maneira indiscriminada não se encontrou uma correlação coerente. Porém quando se fez a análise das chuvas de acordo com sua sazonalidade, encontrou-se uma melhor correlação.

Nos períodos menos chuvosos de cada ano analisado, quando se calcula e avalia os coeficientes de correlação, a grande maioria das chuvas fortes está intimamente relacionada com raios, pois as características físicas destas são suficientes para processos de eletrificação das nuvens.

Quando se estratifica ainda mais os dados para os períodos os coeficientes de correlação e determinação apresentaram valores ainda maiores, concordando com trabalhos como o de RIBEIRO(2010).

Na distribuição superficial dos raios, na área de estudo não se observou uma tendência de acumulação destes em determinados pontos. Isso pode estar relacionado ao fato da área ser pequena e não apresentar uma significativa diferença de nível. Recomenda-se aumentar a área em trabalhos futuros para se verificar uma melhor resposta.

Percebeu – se que quando a escala temporal é aumentada, é possível se fazer uma melhor inferência dos dados, pois quando se comparou os gráficos mensais com os trimestrais, foi possível concluir que os trimestrais apresentaram um comportamento mais tendencioso que os trimestrais. Porém é necessário se fazer um estudo com um período de dados muito maior para obter respostas mais significativas.

Para trabalhos futuros recomenda-se analisar um período de no mínimo 10(dez) anos e com escalas temporais que variem de metros a dezenas de quilômetros afim de verificar em quais dessas análises a correlação entre chuvas e raios será mais forte.

7 - REFERÊNCIAS

- ANAGNOSTOU, E.N.; T. CHRONIS, 2004. The worth of long-range lightning observations on overland satellite rainfall estimation, *Book Chapter*, Kluwer Academic Publishers (in review).
- BENWELL. The estimation and variability of precipitable water. *THE METEOR. MAG.*, London, 94(1120:319-327 - 1965
- BISQUERRA, R.; SARRIERA, J. C.; MARTINÉZ, F. Introdução à estatística. Porto Alegre: Artmed; 2004.
- BATTAN, L.J; J.B. THEISS. Measurements of Vertical Velocities in Convective Clouds by Means of Pulsed-Doppler Radar. *J.Atmosph. Sci.* Vol.2 pp.193-298.1970
- CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.
- 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”, *J. Geophys. Res.*, vol. 110, D03105, doi:10.1029/2004JD004371, 2005
- CHAMBERS, J.Q.; HIGUCHI, N.; Teixeira, L.M.; Santos, J.; Laurance, S.G.; Trumbore, S.E. 2004. Response of tree biomass and wood litter to disturbance in a central Amazon forest. *Oecologia*, 141, 596 –611doi:10.1007/s00442-004-1676-2.
- COLGATE, S.A. Enhanced Drop Coalescence by Electric Fields in Equilibrium with Turbulence. *J. Geophys. Res.* Vol.72, pp 479-487.1967
- COHEN, J.C.P. *Um estudo observacional de Linhas de Instabilidade na Amazônia*. Dissertação de MSc em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 1989. (INPE-4865-TDL/376)
- COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, 4(11): 34 - 40, 1989;)
- LAURENT, H.; MACHADO, L.A.T.; HERDIES, D.; MORALES, C. Características dos sistemas convectivos observados por satélite durante o experimento WET AMC/LBA. Inpe(2000)
- FARIA, H. H. Estudo comparativo da atividade e características dos relâmpagos nas regiões de Rondônia e Sudeste, no período de outubro de 1999 a março de 2000. São José dos Campos, 224p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2002.

FERNANDES, W.A. Característica dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob influencia de queimadas em Rondônia /W.A.Fernandes.-São José dos Campos : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005.182p

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. 1998. Uma revisão geral do clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, 28(2): 101 126.

GIN, R.B.B. Estudo coordenado de um sistema de tempestade sobre a América do Sul. São José dos Campos. 98 p. (INPE-5388 -TDI/477). Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.

GOMES, M. A. S. S. Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas. São José dos Campos, 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (ELAT). Acessado em 04/04/2012 <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>

GUNGLE, B.; KRIDER, E. P. Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 111, D19203. 2006. doi:10.1029/2005JD006802, 2005

HISER, H.W. Sferics and Radar Studies of South Florida Thunder Storms.*J.Applied. Met.* Vol.12, pp 4479-483. 1973

HOREL, J.D.; HAHMANN, A.N.; GEISLER, J.E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2(11), 1388 - 1403, 1989;

HURREL, J. W.; VINCENT, D. G. On the maintenance of short-term subtropical westerly maxima in the Southern Hemisphere during SOP-1, FGGE. *Journal of Climate*, 4, p. 1009-1022, 1991

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.

KODAMA, Y. M. Large-scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for degenerating STCZs. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 71, p. 581–610, 1993)

- 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.*, 112, 203 – 229. 1986.
- LEE, A.C.L.. The Limiting Accuracy of Long Wavelength Lightning Flash Location, *American Meteorological Society*, 6, 43 – 49. 1989
- LOPES,M.N.G. Aspectos regionais da variabilidade de precipitação no estado do Pará: estudo observacional e modelagem climática em alta resolução .Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais , Instituto de Geociências , Universidade do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA,2009
- 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.*, 133, pp. 2583–2607, 2005.
- MAGONO, C. Thunderstorms. Amsterdam: Elsevier, 261 p. (Development in Atmospheric Science, 12). 1980.
- MARENGO J.A, Nobre, C.A. 2001. General characteristics and variability of climate in the Amazon Basin and its links to the global climate system. In: McClain ME, Victoria RL, Richey JE (eds), *The Biogeochemistry of the Amazon Basin*, pp. 17–41. *Oxford University Press*, Oxford.
- 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.1993
- MOORE, S. D.; MCCABE, G.P.: *Introdução à Prática da Estatística*.LTC, 2002
- 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.
- NOBRE, C.A. et al. Mudanças climáticas e Amazonia. *Ciencia e Cultura*, Campinas, v.59, n.3,p.22-27, 2007.
- 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.;”Tempestades e Relâmpagos no Brasil” In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE- São José dos Campos- SP ,2000.
- 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*. Global Atmospheric, Inc., Tucson, AZ.2000.

PINTO JR., O.. A arte da guerra contra os raios – São Paulo: Oficina dos Textos, 2005

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.

REICHARDT, K. A Água em Sistemas Agrícolas. São Paulo: Manole. 1986. 188 p.

RENNÓ, C.D. et al. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2008.03.018

ROOHR, P.B., VONDER HAAR, T.H.. “A Comparative Analysis of the Temporal Variability of Lightning Observations and GOES Imagery”. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 33, pp. 1271-1290, 1994.

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”. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Vol. 2, pp. 1163-1166, São Paulo - SP, 1997a.

SANTO. D.M. Análise e modelagem hidrometeorológica na bacia do rio Tocantins em Marabá-PA.Dissertação(Mestrado em Ciências Ambientais) , Instituto de Geociências , Universidade do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA,2008

SANTOS, I. et al. Hidrometria Aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

DOS SANTOS, A.P.P. Raios e precipitação na Amazônia Oriental: Efeitos no Sistema Elétrico. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Meteorologia – UFPA, 2010

SILVA, A. M. Princípios Básicos de Hidrologia. Departamento de Engenharia.UFLA. Lavras-MG. 1995.

Sombroek, W. Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. *Ambio*, v.30, p.388-396, 2001.

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, E.B. AMBRIZZI, T.Pentad Precipitation climatology over Brasil and associated atmospheric mechanisms.Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática , 2003.

RODRIGUES, C. A. M., ROCHA, R. P., BOMBARDI, R, “On the development of summer thunderstorms in the city of São Paulo: Mean meteorological characteristics and pollution effect”. *Atmospheric Research* 96 (2010) 477–488

STRETEN, N. A. Some characteristics of satellite observed bands of persistent cloudiness over the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, v.101, p.486-495, 1973

SEABRA, M. S.; D’ALMEIDA ROCHA, C. H. E.; MENEZES, W. F. Comparação dos efeitos dos eventos ZCAS de janeiro de 2006 nas cidades do Rio de Janeiro e Brasília In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis – SC. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. SBMET, 2006.

UMAN, Martin A. and KRIDER, E Philip. Natural and Artificially Initiated Lightning. *Science*, Volume 246, Issue 4929, pp. 457-464, USA, 1989.

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

WALLACE, J. M.; HOBBS, P.V. Atmospheric science: An introductory survey. San Diego: Academic Press, 467 p.1977

WALLACE, J.M.; HOBBS, P. V. Atmospheric science – an introductory survey. New York: Academic Press, 2006, p. 504, v. 92., International Geophysics Series., 60, 61, 62. 2006

WANG, K. Y., LIAO, S. A.. “Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2-4 July 2004 severe convective system over Taiwan area”, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, D05206, doi:10.1029/2005JD006411, in press, 2006 (SCI).

WILLIAMS, E.R. The Electrification of Thunderstorms, *Scientific American*, pp. 48 – 65.1998

WILKS, D. S.; 2006. STATISTICAL METHODS IN THE ATMOSPHERIC SCIENCES, *Book Chapter* 6, Second Edition pp. 179 – 187. Elsevier

YASUNARI, T. Stationary waves in the Southern Hemisphere mid-latitude zone revealed from average brightness charts. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 55, p. 274-285, 1977