



**EMBRAPA - UFPA - MPEG  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**MARCELA MACHADO POMPEU**

**RELAÇÕES ENTRE RAIOS E CHUVAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Belém – PA

2012

MARCELA MACHADO POMPEU

## **RELAÇÕES ENTRE RAIOS E CHUVAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais. Área de Concentração: Física do Clima Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza.

Belém – PA

2012

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

---

P123r Pompeu, Marcela Machado

Relações entre raios e chuvas na Amazônia Oriental / Marcela Machado Pompeu; Orientador: José Ricardo Santos de Souza - 2012.  
124fl.: il.

Dissertação (mestrado em ciências ambientais) – Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2012.

1. Precipitação - raios. 2. Bacias Hidrográficas. 3. Leste da Amazônia. I. Souza, José Ricardo Santos de, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22° ed.: 551.57709811

---

**MARCELA MACHADO POMPEU**

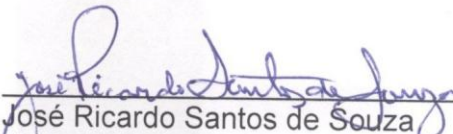
**RELAÇÕES ENTRE RAIOS E CHUVAS NA AMAZÔNIA  
ORIENTAL**

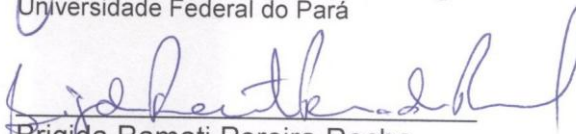
Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Área de Física do Clima.

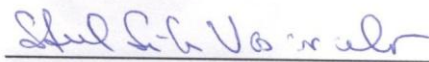
Orientador: Dr. José Ricardo Santos de Souza

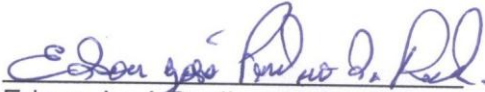
Data da aprovação: 24 / 08 / 2012

Banca Examinado

  
Orientador  
José Ricardo Santos de Souza  
Universidade Federal do Pará

  
Brigida Ramati Pereira Rocha  
Universidade Federal do Pará

  
Steel Silva Vasconcelos  
EMBRAPA-Amazônia Oriental

  
Edson José Paulino da Rocha  
Universidade Federal do Pará

Dedico esse trabalho ao meu pai e minha mãe, que sempre em minha jornada durante o meu viver me educaram e me ensinaram a buscar meus ideais e a lutar por meus sonhos. Ao meu amor que sempre esteve junto de mim mesmo longe ou perto. A minha leal cachorrinha Belinha por seu amor incondicional a minha pessoa.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Deus por ter me dado vida, saúde e paz por estar presente em todas as etapas de minha existência, pela força nas horas em que parecia já não mais ter, pelas oportunidades colocadas em meu caminho e principalmente por todas as bênçãos, pois sem sua vontade nada aconteceria.

Aos meus pais José Caetano Pompeu e Sônia Maria Ribeiro Machado por todo seu amor e por seus esforços para me educar, por sempre estar junto de mim nos momentos mais importantes da minha vida quando cada conquista minha era como se fossem suas próprias, pois nada eu seria sem o apoio deles.

Ao meu orientador Professor José Ricardo de Souza, por todo conhecimento transmitido como professor pesquisador, por suas conversas “extraclasse”, que sempre me faziam sentir melhor nas horas difíceis desse trabalho, e por sua amizade.

Ao Professor, Everaldo Souza pelo acesso aos dados de precipitação.

Ao professor Paulo Kuhn sendo sempre muito disposto em me ajudar nas horas mais complicadas desse trabalho e principalmente por suas sábias palavras e conselhos que me confortaram em vários momentos de tensão.

Ao Dr. Carlos Morales pelos dados de raios da rede STARNET.

Ao Prof. Artur Almeida pela ajuda e concessão do programa LEZEUS.

A Equipe do professor Antonio Lola da Costa em especial Alex (Pirata), e a equipe do Adriano Leitão em especial ao Fabrício Martins amigo fiel sempre disposto em ajudar.

A Wanda Ribeiro que me acompanhou desde o começo, transmitindo conhecimento necessário para o meu trabalho, e sempre com muito empenho me ajudou nas etapas mais difíceis, me aconselhando e confortando e principalmente por acreditar no meu potencial.

Ao meu namorado Flávyo Amorim e sua família por todo seu amor, carinho e compreensão por sempre me ajudar nas horas mais difíceis, mostrando sempre ser muito justo e muito companheiro e acreditando nas minhas conquistas.

Aos amigos da UFPA Renata Kellen, Wesley Rodrigues, Sirlene Castro, Josiane Sarmento, Cássia Camila e Raimundo pela ajuda, convivência e pelas horas de descontração.

Em especial as amigas de Josenete Monteles, Carla Daniele e o meu querido amigo Pedro Pereira, que são exemplos de amigas verdadeiras e de vida também, por todas as

horas agradáveis que passamos juntos e até mesmos pelas horas difíceis, nossas conversas, risadas me ajudaram em muito, nas horas em que parecia que as forças não existiam mais e sabia que sempre os terias ao meu lado me apoiando e sempre torcendo pelo meu sucesso..

As amizades ao longo de minha vida, Leny Aviz, Carmen Torres e Lídia Aviz, pelas conversas e pelas horas em que era preciso uma palavra amiga e poder continuar avançar no meu trabalho.

Aos amigos Andrei , Sandra e o Agnus Dei e sua família por todo apoio e pela força nas horas difíceis.

A CAPES, pelo apoio financeiro com a Bolsa de Mestrado.

Ao projeto LBA e ESECAFLOR, pela concessão dos dados de chuva de Caxiuanã.

Ao Projeto RPCH e LAMAZ pela cessão e ajuda no processamento dos dados de chuva de Santarém.

Ao Projeto REMAM 2/FINEP, pela colaboração e participação na atuação de trabalhos e pesquisas.

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

"Você pode conseguir qualquer coisa que queira na vida, se você ajudar o suficiente outras pessoas a conseguirem o que elas querem. "

( Zig Ziglar ).

"É o esforço constante e determinado que quebra a resistência, e varre todos os obstáculos."

(ClaudeM.Bristol)

"Senhor dá-me serenidade para aceitar tudo aquilo que não pode e não deve ser mudado. Dá-me força para mudar tudo o que pode e deve ser mudado. Mas, acima de tudo, dá-me sabedoria para distinguir uma coisa da outra."

Autor desconhecido

“Porque tu, ó SENHOR, és o meu refúgio. No Altíssimo fizeste a tua habitação.”

Salmos 91:9



## RESUMO

O objetivo desse estudo foi analisar a relação entre descargas elétricas, associadas à precipitação dentro de áreas selecionadas no leste da Amazônia no período de setembro de 2008 a dezembro de 2010. Os estudos foram realizados dentro de um raio de 100 km centralizados em pluviômetros instalados das localidades de Belém, Caxiuanã e Santarém. Essas áreas foram escolhidas por encontrarem-se aproximadamente na mesma latitude, e vão se distanciando do Oceano Atlântico, buscando observar a sazonalidade dos sistemas precipitantes causadores de raios e sua penetração no continente, observando as características climatólogicas distintas de cada área. Os dados de chuvas foram obtidos através do banco de dados da ANA, RPCH, INMET e através do Projeto LBA. Os sistemas meteorológicos de grande escala acompanhados de sistemas de escala menores, parecem atuar primeiramente em Belém e vão adentrando o continente atingindo as outras áreas de estudo. Em Belém, também foram observadas as maiores ocorrências de raios comparados com Caxiuanã e Santarém, sendo que nessas localidades, os raios antecedem as chuvas em quase todas as observações. Foram observadas as defasagens dos máximos de ocorrências de raios e chuvas de aproximadamente dois meses acompanhando principalmente o sentido norte sul de deslocamento da ZCIT e seu acoplamento com outros sistemas de escala local ou de meso escala. Foi feito um estudo de caso em Belém e Santarém onde observou-se que a ZCIT não segue o mesmo padrão de deslocamento para as duas localidades, ou seja, ela atinge primeiramente Belém e aproximadamente três dias depois o sistema atingiu a cidade de Santarém. Mesmo com essa defasagem de tempo foi visto que nas duas localidades as ocorrências de raios antecederam as chuvas. Também foi realizado um estudo pioneiro dentro das bacias do Tocantins e Xingu sobre a relação entre raios e chuva, na tentativa de se desenvolver uma alternativa de método auxiliar para prognóstico dos períodos de cheias e secas dentro dessas bacias através das ocorrências de raios sobre essas áreas. Os estudos mais detalhados foram realizados nas áreas a montante das barragens de Tocantins onde se encontra a usina hidroelétrica de Tucuruí, e dentro da área da bacia do Xingu onde está sendo construída a barragem de Belo Monte. Foram utilizados dados de precipitação pluviométrica das bacias do Tocantins e Xingu obtidos através da HIDROWEB-ANA operados pela CPRM dentro de cada área de estudo. Usando filtros de médias móveis foram observados que as

melhores correlações entre raios e chuvas, se encontravam dentro da bacia do Tocantins, provavelmente pela influencia da presença da barragem na bacia do Tocantins onde possibilitou respostas positivas entre a relação da cota do rio com os raios. Considerando o fato de que o período de dois anos de dados não possuem peso estatístico suficiente para estabelecer relações definitivas entre raios e precipitação, os resultados apresentados devem ser considerados como preliminares. No entanto essa metodologia pode ser aplicada para subsidiar modelos de estimativas de precipitação em localidades selecionadas e aplicações no modelamento hidrológico de bacias hidrográficas, onde dados pluviométricos ainda são escassos no leste da Amazônia.

**Palavras-chave:** Precipitação. Raios. Bacias Hidrográficas. Leste da Amazônia.

## ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the relationship between electrical discharges of the atmosphere and the precipitation in selected areas of eastern Amazonia during the period of September 2008 to December 2010. These areas correspond to three target circles of similar latitudes and two river basins, all located in the eastern Amazon Region. The first type of studies were conducted within radii of 100 km, centered at rain gauges within the towns of Belém, Caxiuanã and Santarém. These areas were chosen because they are situated roughly the same latitudes but, different distances from the Atlantic Ocean. The objective was to observe the seasonality of the precipitation systems which cause lightning and their penetration in the continent, to determine the different climatological characteristics of each area. Lightning data was obtained from the STARNET system. The rainfall data were obtained from the database of the ANA, RPCH, INMET and through the LBA station in Caxiuanã. The large-scale weather systems accompanied by small scale systems, appear to act primarily in Belém and weaken as they propagate to the other areas of study. In Belém, it was observed the highest occurrences of lightning compared to Caxiuanã and Santarém. The peaks of lightning occurrences Caxiuanã and Santarém, approximately two months. The effect of the north-south drift of the ITCZ and its coupling with other systems at local or meso scale was observed. Analysis was made of a case study in Belém and Santarém and it was shown that in the ITCZ does not follow the same pattern for these three areas. A second type of study consisted in an application within the basins of the Tocantins and Xingu River through a pioneering study of the relationship between lightning and rainfall. It was an attempt to contribute to predict the periods of floods and droughts within these basins through electrical discharges data. The detailed study was conducted in the areas upstream of dams in the Tocantins area where the Tucuruí hydroelectric power plant was installed, and also within the area of the Xingu basin is being built where the Belo Monte dam rainfall data from HIDROWEB ANA pluviometric station operated by CPRM in each study area, were and also obtained in these basins. Using moving average filters applied to lightning and rainfall, it was observed that the best relationship between, these variables occurred within the basin of the Tocantins, probably because it has more rainfall stations than the Xingu basin. Considering

the fact that the data corresponding to only two years of observations does not provide enough statistical weight to establish permanent quantitative relationships between lightning occurrences and rainfall, the derived equations may be considered as preliminary results. Nevertheless it was well established that this methodological approach may be applied to subsidize estimates of precipitation over selected areas, as well as, contribute with information to hydrological models for river basins, especially where pluviometric data are scarce and need an alternative source of information, in eastern Amazonia

**Key words:** Precipitation. Lightning. Hydrographic Basins, Eastern Amazonia

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: 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. ....	31
Figura 2: Esquema simplificado dos tipos de descargas atmosféricas que atingem o solo. (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo. ....	33
Figura 3: Mapa isoceràunico do Brasil. ....	36
Figura 4- Distribuição espacial da densidade de incidência de raios no período de 1997 a 2009 utilizando dados do LIS/TRMM (A); Distribuição da densidade de raios no período de jun/2008 a dez/2010 utilizando dados STARNET .....	41
Figura 5- Localização das áreas de estudo de Belém, Caxiuanã e Santarém. ....	43
Figura 6 Distribuição espacial do percentual do tipo de superfície em Belém, Caxiuanã e Santarém. ....	45
Figura 7: Área de Belém centrada no pluviômetro do 4° Distrito Naval. ....	46
Figura 8- Área de Caxiuanã, centralizada no pluviômetro da torre do LBA em Caxiuanã.....	47
Figura 9-- Área de Santarém, centralizada no pluviômetro da ANA em Santarém. ....	49
Figura 10: Localização dos sensores de VLF - detectores de raios da STARNET. ....	51
Figura 11- Ferramenta do ArcView para se criar os raios de 100km;(B) Recortes das áreas de estudo com a quantidade de raios em 100km. ....	54
Figura 12-Média mensal da precipitação pluviométrica, nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010. ....	56
Figura 13- Distribuição da média mensal do número de raios detectados nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010. ....	57
Figura 14- Relação da média mensal entre precipitação e raios nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010. ....	59
Figura 15- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Belém durante o período set/2008 a set2010. ....	61
Figura 16- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Caxiuanã durante o período set/2008 a set2010. ....	62

Figura 17- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Santarém durante o período set/2008 a set2010. ....	62
Figura 18- Distribuição mensal entre a média de raios e média de chuva: (A), (B) e (C) no período chuvoso; (D), (E) e (F) no período seco durante o período de set/2009 a set/2010 em Belém, Caxiuanã e Santarém.....	65
Figura 19- Linhas de tendências entre raios e chuva (set 2008 a set/2010). (A) Belém, (B) Caxiuanã e (C) Santarém.....	66
Figura 20- Relação entre raios e chuva em Belém no dia 27/04/2009. Os dados de chuva nessa análise são do INMET. ....	68
Figura 21- Distribuição temporal dos raios em Belém no dia 27 de abril de 2009. ....	69
Figura 22: Imagens de satélite GOES 12 canal infravermelho (realçada) do dia 27/04/2009 (A) às 1500Z;(B) à 1600Z;(C) às 1700Z e as 1800Z. ....	70
Figura 23- Distribuição do número de raios com as informações do METAR em Santarém nos dias 30/04/2009 e 01/05/2009. ....	72
Figura 24- Informações meteorológicas do Código METAR em Santarém no dia 01/05/2009. ....	72
Figura 25- Distribuição entre precipitação pluviométrica e número de raios em Santarém nos dias 25/04/2009 e 05/05/2009. ....	73
Figura 26- Distribuição temporal dos raios em Santarém: (A) dia 30 de abril de 2009 e (B) dia 01/05/2009.....	74
Figura 27- Imagens de satélite GOES 12 canal infravermelho (realçada) do dia 01/05/2009 (A) às 0300UTC;(B) às 0600UTC ....	74
Figura 28- Usina Hidrelétrica de Tucuruí Barragem no Tocantins.....	79
Figura 29- Área de Belo Monte onde será construída a Hidrelétrica. ....	80
Figura 30- Bacia do Tocantins com as sub-áreas(A); Bacia do Xingu com as sub-áreas (B)..	81
Figura 31- Localização da área de estudo. (A) Bacia do Tocantins; (B) Bacia do Xingu. ....	81
Figura 32-: Média mensal da precipitação pluviométrica na bacia do Tocantins e na bacia do Xingu no período de set/2008 a set/2010. ....	86
Figura 33- Media mensal de raios detectados na bacia do Tocantins e a bacia do Xingu, no período de set/2008 a set/2010. ....	87

Figura 34- Distribuição do filtro de media móvel quinzenal entre raio e chuva na área 1- bacia do Tocantins. ....	88
Figura 35- Distribuição do filtro de media móvel quinzenal entre raio e chuva na área 2 da bacia do Xingu. ....	89
Figura 36- Distribuição mensal do filtro de medias móvel entre raio e chuva durante período chuvoso e durante período seco- área 1 Bacia do Tocantins (A e B); área 2 Bacia do Xingu (C e D) durante o período set/2008 a set/2010. ....	90
Figura 37-Linha de tendência quinzenal entre precipitação e descargas atmosféricas período set/2008 a set/2010: (A) bacia do Tocantins; (B) bacia do Xingu. ....	95
Figura 38-Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota período de 08/12/2008 a 15/07/2010 (A) área 1- bacia do Tocantins; (B) área 2 -bacia do Xingu. ....	97
Figura 39- Linha de tendência entre cota e descarga atmosféricas.Caso de medias moveis de sete dias para o período de 08/12/2008 a 15/07/2010.(A)área 1- bacia do Tocantins; (B) Belo Monte bacia do Xingu. ....	98
Figura 40- Distribuição diária entre cota de rio e descargas atmosféricas. Caso de médias móveis de sete dias para (A) 06/01/2010 a 07/02/2010; (B) 05/05/2010 a 28/07/2010 em Tucuruí. ....	100
Figura 41-Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota do rio para o período: (A) 06/01/2010 a 07/02/2010 e (B) 05/05/2010 a 28/07/2010 na bacia do Tocantins (área 1). .....	102
Figura 42- Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota. (A) período de14/11/2009 a 20/12/2009.Linha de tendência entre cota e descarga atmosféricas caso de medias moveis de sete dias (B): Belo Monte -bacia do Xingu. ....	103
Figura 43- Resultados dos Estudos de Remanso para o Reservatório do Xingu, Vazão de 7.851 m3/s (média de longo termo). Perfis das linhas d'água para as condições naturais e com reservatório. ....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação das estações meteorológicas e suas localizações geográficas e médias trimestrais de precipitação em Belém, Caxiuanã e Santarém.....	55
Tabela 2: Relação das estações meteorológicas e médias mensais de precipitação na bacia do Tocantins. ....	83
Tabela 3: Relação das estações meteorológicas e médias mensais de precipitação na bacia do Xingu. ....	84
Tabela 4: Correlação entre precipitação e descargas atmosféricas dado não ajustados no período set/2008 a set/2010 – Bacia do Tocantins e na bacia do Xingu nas áreas 1,2e3 respectivamente. ....	91
Tabela 5: Regressão entre precipitação e descargas atmosféricas para Bacia do Tocantins e bacia do Xingu - áreas 1, 2 e 3, respectivamente. Dados ajustados no período set/2008 a set/2010.....	92
Tabela 6- Regressão entre precipitação e raios para Bacia do Tocantins e bacia do Xingu . Dados ajustados no período set/2008 a set/2010. ....	94



## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA- Agência Nacional de Águas  
ATD -Arrival Time Difference  
BHX- Bacia Hidrográfica do Xingu  
CB's -Cumulonimbos  
CPRM -Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
CPTEC -Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos  
DEA -Descargas Elétricas Atmosféricas  
DJF - Dezembro-Janeiro-Fevereiro  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
ELN - Eletronorte (Centrais Elétricas do Norte do Brasil)  
FURNAS -Furnas Centrais Elétricas S.A  
HN -Hemisfério Norte  
HS -Hemisfério Sul  
IN - Relâmpago Intra-Nuvem  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
JJA - Junho, Julho e Agosto  
LBA- Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia  
LI's - Linhas de Instabilidade  
LLS - Lightning Location System  
LPATS - Lightning Positioning and Tracking System  
MAM - Março, Abril e Maio  
NN - Relâmpago nuvem-nuvem  
NS - Relâmpago Nuvem-Solo  
REMAM Rede de Monitoramento de Eventos Extremos da Amazônia  
RINDATRede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas  
STARNET- Sferics Tracking and Ranging Network  
SF - Sistema Frontal

SN - Relâmpago solo-nuvem

SON - Setembro-Outubro-Novembro

TOA - Time of Arrival (Tempo de Chegada)

VCAN - Vórtice Ciclônico em Altos Níveis

VLF - Very Low Frequency

WWLLN - World Wide Lightning Network Location

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
1.1.1 Distribuição da precipitação pluviométrica na Amazônia.....	25
1.1.2 Sistemas Meteorológicos Produtores de Tempestades.....	26
1.1.3 Formação de nuvens de tempestades e seus mecanismos .....	28
1.1.4 Descargas elétricas na atmosfera -DEA .....	31
1.1.4.1 Tipos de raios .....	32
1.1.5 O Índice Ceráunico.....	35
1.1.6 Estudos de raios na Amazônia.....	36
1.1.7 Sistema de detecção de descargas elétricas atmosféricas.....	38
<b>2 ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE RAIOS E CHUVAS EM ÁREAS ENTORNO DE BÉLEM,CAXIUANÃ E SANTARÉM. ....</b>	<b>39</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	39
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	42
2.2.1 Áreas de estudo.....	42
2.2.2 Distribuição e classificação espacial dos tipos de superfície .....	43
2.2.3 Caracterização da área de Belém.....	45
2.2.4 Caracterização da área de Caxiuanã .....	46
2.2.5 Caracterização da área de Santarém .....	47
2.3 BASE DE DADOS .....	49
2.3.1 Dados de raios .....	49
2.3.1.1 O desempenho da rede STARNET.....	51
2.3.2 Dados de precipitação pluviométrica .....	53
2.4 TRATAMENTOS DOS DADOS.....	53
2.4.1 Dados de raios .....	53
2.4.2 Dados de precipitação.....	54
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
2.5.1 Média mensal da Precipitação .....	56

2.5.2 Média mensal do número de raios .....	57
2.5.3 Média mensal da relação entre precipitação e raios usando ajustes de raios em relação à chuva com um mês de antecipação. ....	58
2.5.4 Distribuição da relação entre raios e chuva em Belém, Caxiuanã e Santarém.....	59
2.5.5 Distribuição trimestral entre raios e chuvas .....	63
2.5.6 Análise de Dispersão entre Raios e Chuvas. ....	66
2.6 ESTUDO DE CASO .....	67
2.6.1 Dados e metodologia .....	67
2.6.2 Estudo de caso do dia 27 de abril de 2009 em Belém. ....	68
2.6.3 Estudo de caso do dia 01 de maio de 2009 em Santarém.....	71
<b>3 ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DAS OCORRÊNCIAS DE RAIOS EM DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	76
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO TOCANTINS E BACIA DO XINGU. ....	77
3.2.1 Bacia do Tocantins .....	77
3.2.2 Bacia do Xingu .....	79
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	80
3.3.1 Área de estudo .....	80
3.3.2 Base de dados .....	82
3.3.3 Tratamento dos dados.....	82
3.3.3.1 Dados de raios. ....	82
3.3.3.2 Dados de precipitação.....	82
3.3.3.3 Dados de cota. ....	84
3.3.4 Construções dos Gráficos .....	84
3.3.4.1 Gráficos de regressão e linhas de tendência .....	85
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	85
3.4.1 Média mensal da precipitação e número total de raios detectados.....	85
3.4.2 Relação entre raios e chuvas nas áreas das bacias.....	87
3.4.3 Distribuição trimestral entre raios e chuva nos períodos secos e chuvosos .....	89
3.4.4 Regressão entre raio e chuva. ....	90
3.4.5 Relação entre cotas de rios e raios dentro das áreas das bacias.....	96
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>

<b>5 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO A - REPORTAGENS DAS FORTES CHUVAS OCORRIDAS NAS CIDADES     DE BELÉM E SANTARÉM.....</b>	<b>123</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é um dos mais importantes biomas 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 apresenta 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 região Amazônica também se destaca por apresentar um dos maiores índices cerânicos do mundo. Isso era esperado, em decorrência da formação frequente de nuvens cumulonimbos sobre toda a região, que apresenta elevados índices pluviométricos nas sub-regiões leste e extremo oeste (SOUZA, et al 2003).

A relação entre os parâmetros de raios, a precipitação e os sistemas meteorológicos convectivos têm sido estudados por vários métodos. Roohr (1994) e Carey (2005) utilizaram imagens de satélites para mostrar a similaridade espacial da distribuição dessas variáveis. Gungle (2005) e Soriano (2001), usando radar, sondagens de ar superior e sistema de detecção e localização de raios na superfície, associaram os parâmetros de raios e precipitação nos, Estados Unidos e Espanha, respectivamente.

O Brasil, devido à enorme extensão territorial e sua posição geográfica, predominantemente tropical, é o país de maior incidência de raios em todo o mundo, embora a região com maior densidade de raios por  $\text{km}^2/\text{ano}$  esteja na África Central. Segundo Pinto Junior. (2004) no Brasil ocorrem anualmente de 50 a 70 milhões de raios que produzem em média uma centena de mortos e trazem perdas estimadas em R\$ 500 milhões, na maior parte relacionadas ao setor elétrico, mas outros setores são bastante prejudicados, como o setor de agropecuária, transporte viário, telefonia.

Segundo as informações do Grupo de eletricidade atmosféricas (ELAT) o ano de 2010 houveram 89 mortes causadas pelos raios no Brasil, somente no estado do Pará foi registrado

oito casos seguido de 12 casos em São Paulo. Sendo que as circunstâncias dessas mortes se deram por vários motivos: embaixo de árvores, setores agropecuários, praias, campos de futebol etc., é a época do ano que mais se tem vítimas é no verão.

Baseado nos danos que as descargas atmosféricas podem causar a sociedade, vários estudos foram desenvolvidos na região para conhecer melhor e principalmente ajudar a evitar maiores transtornos que advêm desse fenômeno.

Na região Amazônica já se estuda raios com sistema de detecção desde 1997, em Belém, as primeiras tentativas de estimar chuva, a partir da frequência de ocorrência de descargas foram feitas por Rocha et al (1997a, b).

No entanto a observação dos raios se tornou mais viável a partir da implantação do projeto de monitoramento de relâmpagos na Amazônia, coordenado pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) em 2009, e pela Universidade Federal do Pará (UFPA), financiado pela concessionária de energia elétrica CELPA, que estudou as diversas características das ocorrências de raios em nossa região.

Atualmente o projeto REMAM (Rede de Monitoramento de Eventos Extremos) vem realizando vários estudos sobre raios, cumprindo assim, um dos seus objetivos de determinar as características dos sistemas precipitantes produtores de raios na Amazônia Oriental. Esses projetos possibilitaram desenvolver estudos para uma melhor compreensão sobre a ocorrência de raios e os períodos de maior frequência e intensidades desses fenômenos na região Amazônica.

Essas pesquisas são importantes para minimizar os danos causados pela incidência de raios, saber qual a época do ano e mais frequente, quais os sistemas atmosféricos contribuem mais para as ocorrências de raios com isso dar proteção aos seres vivos, setores industriais e contribuir com outros interesses socioambientais.

Desta forma, o objetivo dessa pesquisa foi analisar a relação entre a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas, associadas à precipitação pluviométrica em áreas que se encontram em latitudes próximas, mas com distâncias distintas do Oceano Atlântico Belém, Caxiuanã e Santarém. Procurando evidenciar as influências climáticas, as possíveis influências geográficas, e verificar a sazonalidade e os principais sistemas produtores de raios.

Adicionalmente foi analisado a relação entre raios e chuva que foram aplicados em bacias hidrográficas, Tocantins e Xingu a fim de dar de subsídio para a aplicação em modelos hidrológicos, através das ocorrências de raios buscando estimar precipitação e possibilitar prognósticos de enchentes e estiagens.

Os raios e as chuvas são produzidos por nuvens do tipo cb e a relação entre as variáveis demonstra diferentes proporções que dependem da estação do ano, do clima local da composição da superfície. Sabe-se que a quantidade de raios é maior nos continentes e nas latitudes tropicais, e observamos poucos raios em regiões oceânicas e nas latitudes médias e altas.

A importância em quantificar a influência dos raios e chuvas na Amazônia Oriental em áreas com relação ao oceano Atlântico em latitudes semelhantes que estão sujeitas a influência da Zona de convergência tropical (ZCIT), que é um sistema de grande escala e outros sistemas de escala local. Por esses fatores escolhemos as regiões de Belém, Caxiuanã e Santarém que se distribuem na mesma faixa de latitude, sendo que Belém é uma região mais urbanizada, que apresenta uma grande quantidade de água é mais próxima do oceano Atlântico, Caxiuanã é uma região de floresta preservada, e Santarém apresenta composição de superfície semelhante a Belém em relação a superfície líquida e semelhante a Caxiuanã no que tange a floresta.

A escolha das áreas das bacias foi pelo pioneirismo do estudo, sendo estudadas as áreas a montante do rio Tocantins e Xingu, ou seja, a barragem de Tucuruí, e a futura instalação da barragem de Belo Monte.

Os resultados desta pesquisa estão apresentados em dois estudos, o primeiro estudo abordará a relação entre raios e chuva em áreas de diferentes longitudes que se distanciam gradativamente do Oceano Atlântico e serão também realizados dois estudos de caso.

O segundo estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas, para se tentar verificar a relação entre raios e chuva, e com isso tentar prever chuvas através das ocorrências dos raios para verificar se os raios podem servir de subsídios em modelos hidrológicos, para futuramente prognosticar períodos de estiagem e cheias em bacias hidrográficas.

Cada capítulo terá sua própria introdução, metodologia e resultados que foram divididos em capítulos próprios.



## 1.1 REFERENCIAL TEÓRICO.

### 1.1.1 Distribuição da precipitação pluviométrica na Amazônia

O valor de precipitação anual para a Amazônia é de aproximadamente 2300 mm, com áreas apresentando valores superiores a 3000 mm nos setores oeste, noroeste e no litoral norte (FIGUEROA; NOBRE, 1990). Apresentando em seu curso sazonal médio duas estações bem distintas: a estação de estiagem durante o inverno nos meses de junho, julho e agosto (JJA) e primavera nos meses de setembro, outubro e novembro (SON) do Hemisfério Sul (HS), com valores de precipitações inferiores a 100 mm/mês; e a estação chuvosa durante o verão no meses de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) e outono meses de março, abril e maio (MAM) do HS, com valores de precipitações superiores a 200 mm/mês.

A origem de toda essa precipitação sobre a Amazônia é resultante da quantidade de água evaporada localmente (evapotranspiração) adicionada a uma contribuição de água advinda do Oceano Atlântico. Segundo estudo de Salati et al (1979), o qual foi realizado através do balanço de vapor d'água em toda a região amazônica, foi possível estimar que 50% do vapor d'água que precipita pelas chuvas são gerado localmente (pela evapotranspiração) e o restante importado para a região pelo fluxo atmosférico proveniente do Oceano Atlântico.

Posteriormente LEAN et al 1996, estimaram que a porcentagem de água reciclada dentro da bacia Amazônica esteja entre 20 e 30%, e não mais a tradicional estimativa de 50% feitas por SALATI e VOSE, 1984. De qualquer maneira é irrefutável o papel que os ecossistemas amazônicos têm na produção e manutenção das chuvas locais, regionais e devido a sua grande extensão nas regiões do centro-sul, sudeste e sul do Brasil, a partir da transferência de vapor d'água através dos ventos entre essas regiões.

A convecção na região Amazônica é um importante mecanismo de aquecimento na atmosfera tropical, com isso em termo de intensidade e posição, exercem um papel fundamental na determinação do tempo e clima desta região (FIGUEROA e NOBRE, 1990).

Molion (1993) apresentou as diversas características da variabilidade climática na Amazônia e o impacto na chuva. Numa classificação resumida os principais sistemas de

tempo que afetam as diferentes regiões da Amazônia e tem impacto na chuva são: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade da Amazônia (LIA), frentes frias associadas ao fenômeno das friagens, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o jato de baixos níveis (JBN) que ocorre paralelo e próximo aos Andes, ondas de leste, a Alta da Bolívia e cavados de altos níveis que se propagam de leste para oeste.

### **1.1.2 Sistemas Meteorológicos Produtores de Tempestades.**

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

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

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

É uma persistente faixa de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, que se estende do sul da Amazônia ao Atlântico Sul-Central por alguns milhares de km, bem caracterizada nos meses de verão. Estudos mostram o importante papel dessas bandas de nebulosidade na transferência de calor, momento e umidade dos trópicos para as latitudes mais altas (MOLION, 1993).

Uma das características marcantes da ZCAS é a sua rica variabilidade em diferentes escalas de tempo. Em escala sinótica, nota-se que a incursão de frentes frias sobre a Argentina e o Sul do Brasil até latitudes mais baixas é acompanhada de um reforço da atividade convectiva no oeste – sudoeste da Amazônia, estendendo-se sobre a ZCAS.

O estudo de Liebmann et al. (1999) mostrou que o espectro de variância de ROL apresentou vários picos estatisticamente significativos sobre a região de influência da ZCAS. Flutuações com períodos mais curtos que 90 dias mostraram máxima variância sobre a ZCAS e a região central da América do Sul, e mínima sobre a região amazônica, onde a convecção, em média, é bastante intensa. Portanto, em escalas de tempo subsazonais (10-100 dias), a ZCAS mostra regimes de variabilidades distintas.

#### *Linhas de Instabilidade (Lis)*

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

#### *Brisa Fluvial*

A brisa fluvial é um mecanismo físico no qual o ar, devido ao contraste térmico entre água-terra, move-se em direção do continente durante o dia e vice-versa à noite. Imagens de satélites mostram que as nuvens formam-se preferencialmente sobre o continente durante o dia, com movimentos de subsidência na área dos rios. Oliveira e Fitzjarrald (1993) comprovam a existência desta circulação fluvial nos baixos níveis (até 1500-2000 m), possuindo o sentido floresta/rio durante a noite e início da manhã, revertendo o sentido (rio/floresta) durante a tarde e início da noite.

### 1.1.3 Formação de nuvens de tempestades e seus mecanismos

Uma típica nuvem de tempestade apresenta um diâmetro de 10 a 20 km, alcança altitudes 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 e 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 gelo, saraiva, granizo ou neve, 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. Uma nuvem de tempestade pode ser constituída por várias células eletrificadas em diferentes estágios de desenvolvimento (NACCARATO, 2001).

Nuvens de tempestades, também conhecidas como nuvens cumulonimbos (Cb), comumente são classificadas em tempestades isoladas e tempestades organizadas, onde as isoladas tem duração de aproximadamente um ou duas horas e sua ocorrência está relacionada a fatores locais, 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 bastante violentos e granizo (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

A importância da eletrificação das nuvens no crescimento das gotas de chuva, por colisão e coalescência, foi destacada por Colgate (1967). Observações feitas com radares meteorológicos e sistemas eletromagnéticos por Battan e Theiss (1970), Hiser (1973) mostraram que as regiões das chuvas de onde raios se originam, apresentam um subseqüente abrupto crescimento de gotas precipitáveis.

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

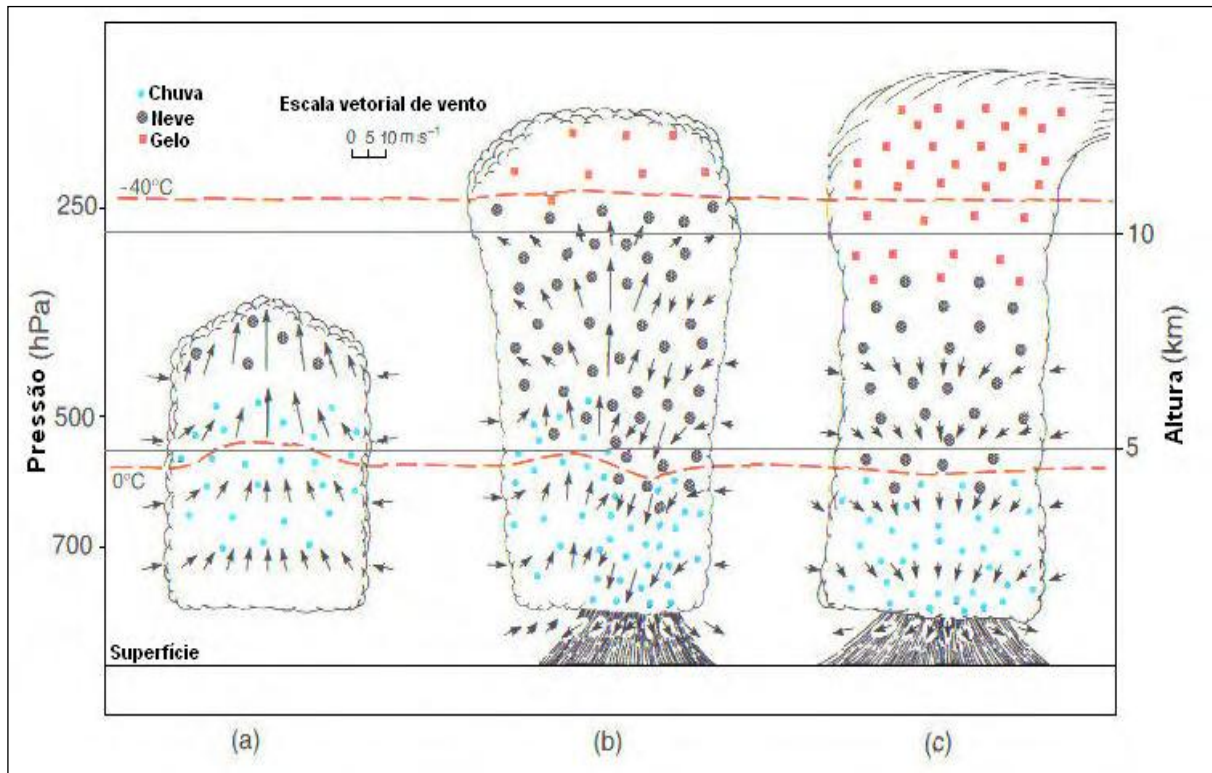
Se o campo elétrico atmosférico tiver um papel predominante na separação de cargas das partículas, o processo será denominado colisional indutivo. No processo colisional termoelétrico, a diferença de temperatura é o fator predominante. Em 1913, Elster e Geitel foram os primeiros a propor a teoria do processo colisional indutivo de eletrificação de uma nuvem de tempestade. Era uma teoria simples e baseada em princípios básicos de física. Esta teoria é assunto de debate nos dias de hoje. Neste processo uma gota grande, é polarizada devido ao campo elétrico externo, que é dirigido para baixo. Desta maneira, a parte inferior da gota fica positivamente carregada enquanto a parte superior fica negativamente carregada. Quando esta gota colide, na sua parte inferior 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 de água ficam carregadas, elas são separadas por processos microfísicos. 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 considerado como um mecanismo primário de geração de cargas para as tempestades.

O ciclo evolutivo de uma nuvem de tempestade é composto por três estágios diferentes de desenvolvimento: O estágio de cúmulos, estágio de maturação e estágio de dissipação, cada um com duração de 20 a 40 minutos (Figura 1). Na fase de formação, conhecida também por estágio de *Cumulos*, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes, arrastando assim 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, eram arrastadas para cima, tornam-se maiores e mais numerosas, iniciando-se a chuva a partir da parte inferior da nuvem. O movimento descendente que, no início desta fase, era apenas a partir da base, passa a se intensificar horizontalmente e verticalmente. A temperatura dentro da nuvem irá depender da região. Para uma dada altura, as regiões onde o movimento do ar é ascendente, a temperatura no interior será maior que no exterior e, para regiões de movimentos descendentes, a temperatura no interior é menor que a temperatura no exterior da célula de tempestade. A duração desta fase é de aproximadamente 30 minutos e sua extensão vertical pode ser de 10 a 18 km. (WALLACE e HOBBS 2006).

A fase de dissipação constitui o último estágio, o qual é caracterizado por movimentos predominantemente descendentes. Nesta fase, a temperatura do interior da nuvem é menor que a do seu exterior. 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 1: 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).

#### 1.1.4 Descargas elétricas na atmosfera -DEA

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

As DEAs, predominantemente associadas às tempestades, podem também ocorrer durante erupções vulcânicas, explosões nucleares, em tempestades de areia e de neve ou, ainda, em outras circunstâncias especiais. Todavia, nestes outros episódios, geralmente apresentam extensão e intensidade menores. O termo descarga atmosférica tem sido frequentemente empregado de forma equivalente a relâmpago ou raio. Existem dois tipos

fundamentais de relâmpagos: (1) aqueles que ocorrem somente na atmosfera e (2) aqueles que atingem o solo.

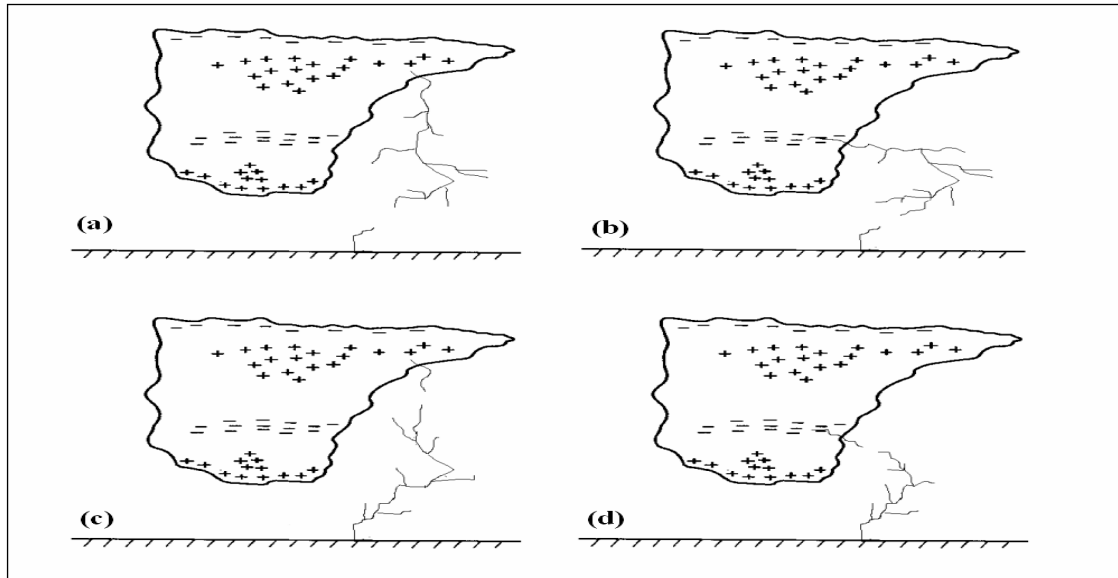
#### 1.1.4.1 Tipos de raios

Os raios, dependendo de onde eles se originam e de onde eles terminam, apresentam várias classificações. As mais comuns são: Nuvem-solo (NS) negativos, que ocorrem da nuvem em direção ao solo trazendo cargas negativas da nuvem para o solo; Nuvem-solo (NS) 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; Nuvem e o ar, raio que sai da nuvem e se dirige para atmosfera (PINTO Jr. e PINTO, 2000).

Os raios NS podem ser classificados como descendentes ou ascendentes e, ainda, de raios positivos ou negativos. Os raios descendentes ou ascendentes podem ser tanto positivos quanto negativos. Sendo que, os raios descendentes ocorrem quando o fechamento do canal, por onde ocorre à descarga elétrica, ocorre 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 2). 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 ou posicionados sobre elevações. Segundo Uman (1971) e Fernandes (2005), nuvens de tempestade produzidas sobre ambientes com maior número de queimadas podem apresentar uma maior ocorrência de raios positivos.



Figura 2: Esquema simplificado dos tipos de descargas atmosféricas 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. O campo eletrostático abaixo das nuvens possui valores entre 10 a 30 mil volts por metro sobre a superfície da terra durante uma tempestade. Este campo induz uma carga igual, porém de sinal contrário no solo da terra logo abaixo da nuvem. A “sombra de carga induzida” acompanha a movimentação da nuvem.

Existem duas hipóteses, mais aceitas, que buscam explicar o processo de eletrificação macroscópico das nuvens, sendo que, em geral, estas hipóteses admitem uma estrutura elétrica das nuvens na forma de um dipolo elétrico vertical, com o centro de cargas positivas na parte superior da nuvem, acima de um centro de carga negativa. Admite-se ainda a existência de um centro secundário de cargas positivas, abaixo do centro de cargas negativas (MACGORMAN, 1998), são elas: (1) hipótese precipitativa e (2) hipótese convectiva:

Hipótese Precipitativa: proposta pelos físicos alemães Julius Elster e Hans F. Geitel em 1885, esta hipótese afirma que a separação de cargas que ocorre no interior da nuvem, não

depende diretamente ou apenas dos movimentos convectivos. Mas, que a precipitação é parcialmente responsável pela separação de cargas e que a sedimentação diferencial de grandes e pequenos hidrometeoros contribui significativamente para a separação de regiões com carregamento preferencial de polaridades positivas ou negativas.

A hipótese admite a influência de um campo elétrico (E) de bom tempo, que irá reorientar a distribuição das cargas nos hidrometeoros dentro da nuvem. Esse campo irá fazer com que as partículas possuam cargas positivas na parte inferior e negativa na parte superior, com a transferência ocorrendo pela colisão entre as partículas menores (mais leves) com partículas maiores que precipitam. Durante esta colisão as partículas maiores capturam uma fração das gotículas menores que estão carregadas negativamente na parte superior, fazendo com que o hidrometeoro maior possua um excesso de cargas negativas, enquanto as partículas menores ficam carregadas positivamente. Por fim, as partículas precipitantes se armazenam na região da base da nuvem com cargas negativas e as partículas com cargas positivas são carregadas pelas correntes ascendentes para o topo da nuvem. A partir deste momento a nuvem passa a apresentar uma configuração de momento de dipolo. (MACGORMAN, 1998).

Hipótese Convectiva: Proposta por Grenet (1947) e por Vonnegut (1980) propõe que a distribuição de cargas positivas sobre a superfície terrestre e as moléculas ionizadas pelos raios cósmicos e pela radiação solar, em regiões da alta troposfera (em cima das nuvens) são as que administram a distribuição de cargas dentro da nuvem. Ao se formar uma nuvem, os íons positivos de baixas regiões são levados para cima pelas correntes de ar ascendentes. Este processo aumenta a densidade de cargas positivas no topo da nuvem, favorecendo o ingresso dos íons negativos resultantes da ionização das moléculas. Devido à concentração de cargas positivas na parte superior da nuvem, cria-se um campo elétrico vertical que aponta para baixo, o qual irá polarizar as partículas de precipitação separando as cargas em seu interior, de modo que a parte inferior fique positiva. Com a precipitação dessas partículas polarizadas, os íons negativos são atraídos e se aderem na parte inferior. Em consequência, as partículas tornam-se carregadas negativamente e aumentam o campo inicial por estarem agora em regiões mais baixas. A realimentação de cargas positivas ocorre devido ao forte campo elétrico (agora intensificado) ao redor dos objetos pontiagudos, sobre o solo, que produz uma

“corrente corona” de íons positivos, para a base da nuvem que serão novamente elevados pelas correntes ascendentes.

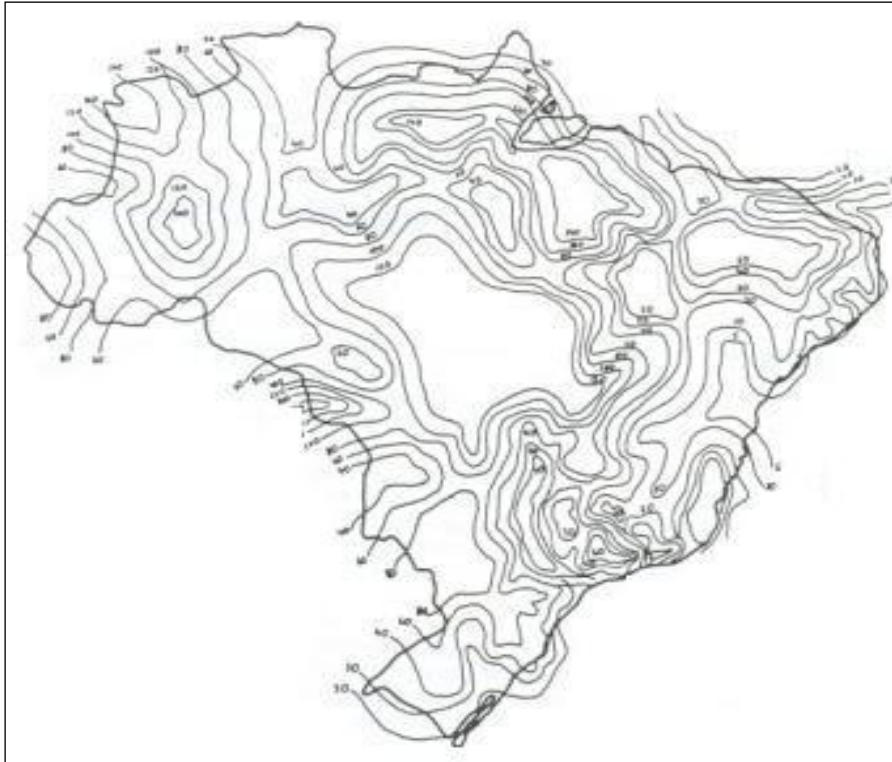
### 1.1.5 O Índice Ceráunico

Vários países, baseados na localização de terrenos mau condutores e elevados, já realizaram estudos para demarcar os locais onde a probabilidade de incidência de raios é maior. Em regiões onde há muita precipitação com tempestades, a incidência de raios também é grande. Estas informações são importantes para o planejamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, para isto usa-se o índice ceráunico e a densidade de raios em determinadas localidades.

O índice ceráunico é um parâmetro que indica o número de dias de trovoadas por ano em uma determinada localidade (KINDERMANN, 1992). Normalmente esse índice é tabulado pela Organização Mundial de Meteorologia (World Meteorological Organization). A partir de observações feitas pelos operadores de estações meteorológicas de superfície, um dia de tempestade é definido como o dia do calendário no qual pelo menos um trovão é ouvido, sendo estes dados registrados por um observador. Esse parâmetro vem sendo usado há muito tempo pelos meteorologistas para caracterizar as atividades relativas às descargas atmosféricas em uma localidade. Leite (1997) ao unir mapa das localidades de mesmo índice ceráunico no Brasil, gerou o mapa isoceráunico do Brasil (Figura 3).

Existem limitações relacionadas ao uso das informações dos dias de trovoadas em todas as áreas, devido a inexatidão em saber o número de relâmpagos ocorridos, por exemplo. Trovões raramente são ouvidos a distâncias que excedem 25 km do canal do relâmpago (UMAN, 1989) e o limite médio de audibilidade prático parece ser cerca de 15 km (PINTO JR. e PINTO, 1996). O problema, portanto, é que, exceto para áreas densamente povoadas, irão ocorrer trovões que não serão ouvidos por pessoa alguma. Um segundo problema com as informações do índice ceráunico é que elas não contêm informações sobre a intensidade ou duração de uma tempestade, ou se uma ou várias descargas ocorreram no mesmo dia.

Figura 3: Mapa isoceráunico do Brasil.



Fonte: Leite (1997).

### 1.1.6 Estudos de raios na Amazônia

Os primeiros estudos de raios realizados na região amazônica foram feitos utilizando dados de trovoadas registrados por observadores em estações meteorológicas de superfície (SERRA, 1977; NECHET, 1994). Estes estudos mostraram que a região apresenta um dos maiores índices ceráunicos do mundo. Isso era esperado, em decorrência da formação frequente de nuvens cumulonimbos sobre toda a região, que apresenta elevados índices pluviométricos nas sub-regiões leste e extremo oeste (SOUZA et al, 2003).

O estudo de raios com equipamentos modernos de detecção remota e localização teve início em 1995, onde foi instalado no campus da UFPA, em Belém, um sistema adquirido pelo INPE, da Lightning Location and Protection Inc. (LLP), com sensor modelo 430 TSS.

Com a obtenção dos dados no período 1995-1998 foi possível adquirir análises das características peculiares dos raios regionais no que tange: aos campos elétricos e magnéticos produzidos (ROCHA et al, 1996); a estatística das distribuições espaciais e temporais dos

eventos, bem como suas intensidades e polaridades (SOUZA et al 1997, ROCHA e SOUZA, 1998); estimativas de precipitação a partir de correlações com a frequência de ocorrência das descargas detectadas (ALMEIDA et al., 2007; ROCHA et al., 1997; SOUZA et al., 1997); correlações com desligamentos no sistema telefônico de Belém (RIBEIRO et al., 1998; ROCHA et al., 1998); e finalmente, os efeitos detectados das descargas atmosféricas no sistema de distribuição de energia elétrica em torno de Belém (ROCHA et al., 1996; LESSA et al., 2008).

Mais estudos sobre raios continuaram sendo desenvolvidos e com os estudos de Teixeira et al. (2008, 2009) e Ribeiro et al (2009 a,b) mostraram as ocorrências de raios associadas com sistemas convectivos de mesoescala em várias sub regiões da Amazônia Oriental. Essas análises foram feitas com raios e precipitação observados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e mostraram que há uma boa correlação entre raios e precipitação em todas as subregiões estudadas.

Outros estudos comparativos desses sistemas produtores de chuvas também foram feitos através de modelamento numérico (REGCM3), que mostra a precipitação sazonal sobre a Amazônia Oriental indicando os principais padrões espaciais anômalos da precipitação (Souza, et al. 2009).

Nos anos de 2010 e 2011 houve ainda várias contribuições de estudo de raios, onde Ribeiro (2010) mostrou a relação entre raios e precipitação sobre diferentes tipos de superfície. Os estudos foram feitos dentro de uma área definida pelas coordenadas geográficas  $0^{\circ}$  a  $6^{\circ}$  S e  $50^{\circ}$  a  $47^{\circ}$  W, abrangendo partes dos estados do Pará, Maranhão e extremo norte de Tocantins. Almeida et al. (2010) verificou em seus estudos dentro de uma área que abrange Amazônia Oriental, a distribuição horária dos eventos de raios que indicaram um nível máximo de ocorrência entre 15 e 20 horas local.

Sabe-se que a ocorrência de raios no espaço e sua distribuição temporal dependem da climatologia regional (Ribeiro et al., 2011a), outros fatores como os índices de instabilidades, Convective Available Potential Energy (CAPE) foram observados por (Pompeu et al., 2011a). Também verificou-se que as densidades de raios na região leste da Amazonia Oriental mostram um incremento sazonal significativo durante os meses de dezembro a maio, que correspondem à estação das chuvas regionais (Ribeiro et al., 2011b).

Assim, estudos sobre descargas elétricas atmosféricas são relevantes, visto a gama de aplicações que seus resultados apresentam tanto para fins científicos, quanto socioeconômicos. Não obstante se reconheça a importância das inúmeras pesquisas já realizadas sobre o assunto em questão, há ainda vários aspectos a serem descobertos e explorados.

### 1.1.7 Sistema de detecção de descargas elétricas atmosféricas

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

**RINDAT** - Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas abrange grande parte da Área monitorada do Brasil, opera em alta e baixa frequência. É um consórcio entre companhias do setor elétrico e institutos de pesquisa brasileiros e opera desde 2005.

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

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

**WWLL** - World Wide Lightning Location Network é um consórcio entre o INPE e a Universidade de Washington. Esta é uma rede que opera desde 2004, em baixa frequência e cobre o Brasil inteiro, mas com baixa eficiência de detecção e precisão de localização dos eventos.

**STARNET**- operada pelo IAG-USP desde 1997, oferece dados de esféricos de baixa frequência, com ampla cobertura, mas com baixa eficiência de detecção.

**RDR-SIPAM** - Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia. Operou com cobertura do leste da Amazônia entre os anos de 2005 e 2010. Atualmente está fora do ar no , dependendo de relocação dos seus sensores.

## **2 ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE RAIOS E CHUVAS EM ÁREAS ENTORNO DE BÉLEM, CAXIUANÃ E SANTARÉM.**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A necessidade de monitorar, compreender e prever o clima, bem como a crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelas atividades antrópicas, em escalas regional e global, ampliaram a importância das observações ambientais. Pesquisas recentes indicam uma espécie de relação entre as emissões da floresta (evapotranspiração), a formação das nuvens e a chuva na Amazônia. Por isso, o funcionamento do sistema climático da Amazônia, e a complexa relação entre a floresta e o clima amazônico sempre foram aspectos intensamente investigados pelos cientistas (Xavier et al 2000).

As chuvas convectivas são características das regiões tropicais, uma vez que os ventos são fracos e a movimentação do ar ocorre basicamente na vertical (TUCCI, 1997), produzindo processos de convecção, nuvens e chuvas. Este processo é tipicamente local (escala de variação inferior a 10 km) e de curta duração (tempo menor que 1 hora). Outra característica importante associada a este processo é a intermitência da ocorrência de chuvas. É na Amazônia que ocorrem as principais atividades convectivas do planeta que podem ter uma influência grande no clima de outras localidades, devido ao transporte horizontal de energia e vapor d'água. Essas atividades convectivas geram nuvens de grandes extensões verticais que são responsáveis por tempestades produtoras de eletricidades atmosféricas.

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

Dissing e Verbyla (2003) estudaram a relação entre a distribuição de raios e a vegetação, constatando que as circulações de mesoescala desencadeada pelo aquecimento diferencial entre dois tipos de vegetação contrastantes foram capazes de produzir raios. Vidale e Pielke (1995) observaram que um maior fluxo de calor sensível sobre um tipo particular de vegetação aumentou a temperatura do ar, provocando convecção.

Anagnostou (2002) apontou dois modos básicos de convecção: um associado à presença de ZCAS e outro a períodos de ausência de ZCAS. Do ponto de vista da circulação de baixos níveis, os dois distinguem na parte sudoeste da Amazônia com uma diferença marcante na direção dos ventos que são de oeste durante as ZCAS e de leste durante a ausência de ZCAS.

A incidência de raios na região amazônica tem causado perdas humanas, materiais e danos ao meio-ambiente. O estudo das descargas atmosféricas no leste da Amazônia e seus efeitos socioambientais têm obtido maior relevância a partir da divulgação de resultados de vários trabalhos.

Rocha et al. (2007),mostraram que as localidades de Belém e Paragominas apresentaram um número considerável de ocorrências de raios (NS e IN), com um total acima de 1500 ocorrências. Sendo que Belém registrou o número máximo de ocorrências de raios no mês de dezembro, e Paragominas teve seu máximo de raios registrados no mês de março. Nesse estudo foi possível verificar que localidades litorâneas tendem a apresentar um número menor de raios.

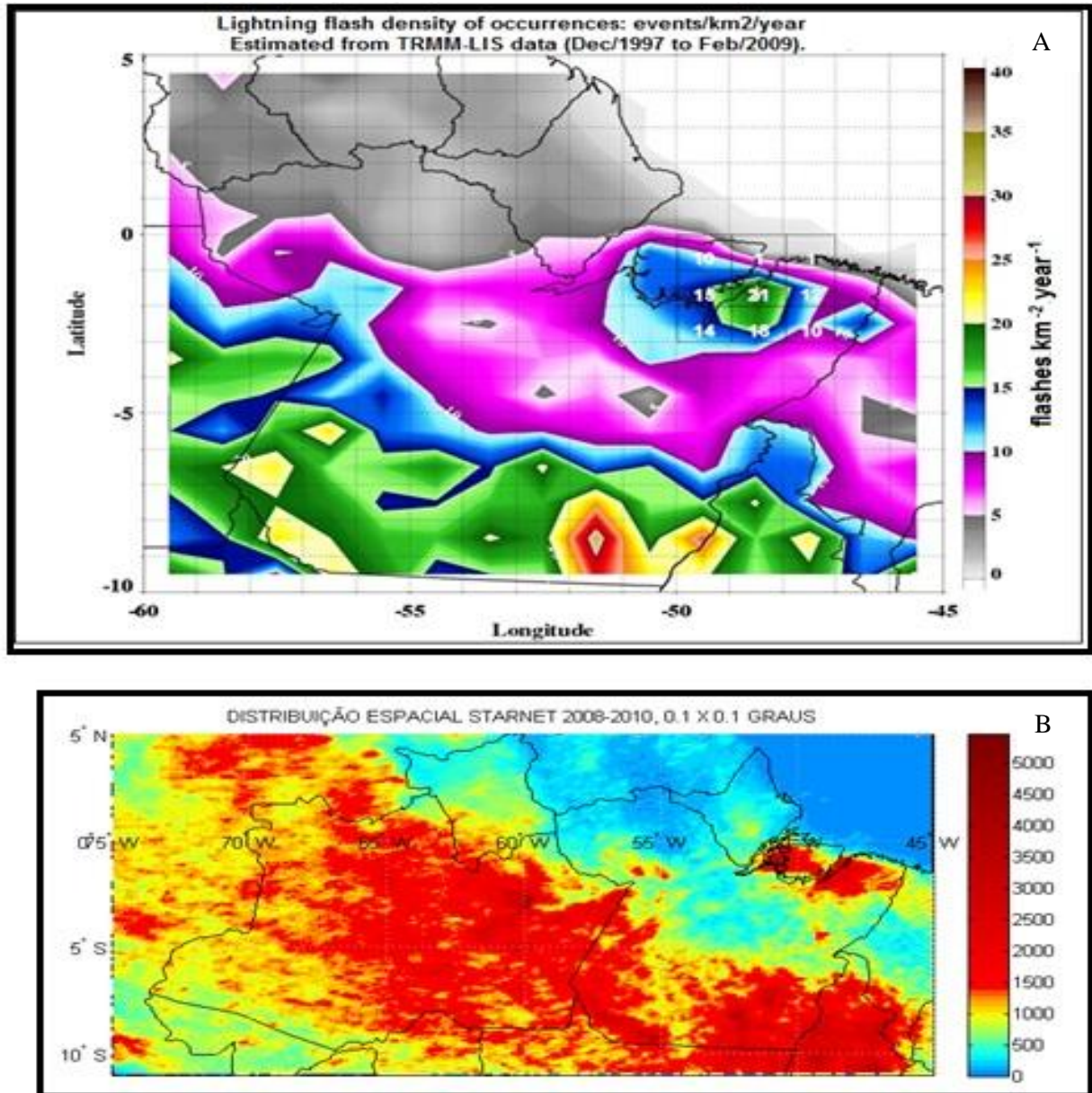
Estudo recente de Teixeira et al.,(2011) verificou a distribuição de raios na Amazônia a partir dos dados de 12 anos de observação do Lighting Imager Sensor (LIS) e dos sensores a bordo do satélite Tropical Rainfall Mesuring Mission(TRMM),mostrado na Figura 5 A e Almeida (2012)<sup>1</sup> que realizou estudos de distribuição de raios na Amazônia por um período de 3 anos e 6 meses de observação usando os dados da STARNET (figura 5B) , verificaram as grandes diferenças de densidade de ocorrências de raios na região da Amazônia. Sendo um indício das diferenças que provavelmente ocorrerão entre as áreas selecionadas para o presente estudo

---

<sup>1</sup> Almeida (2012) [informação pessoal] arthur@ufpa.br em 10/jul/2012.



Figura 4- Distribuição espacial da densidade de incidência de raios no período de 1997 a 2009 utilizando dados do LIS/TRMM (A); Distribuição da densidade de raios no período de jun/2008 a dez/2010 utilizando dados STARNET



Fonte : Teixeira et al (2012) e Almeida (2012)

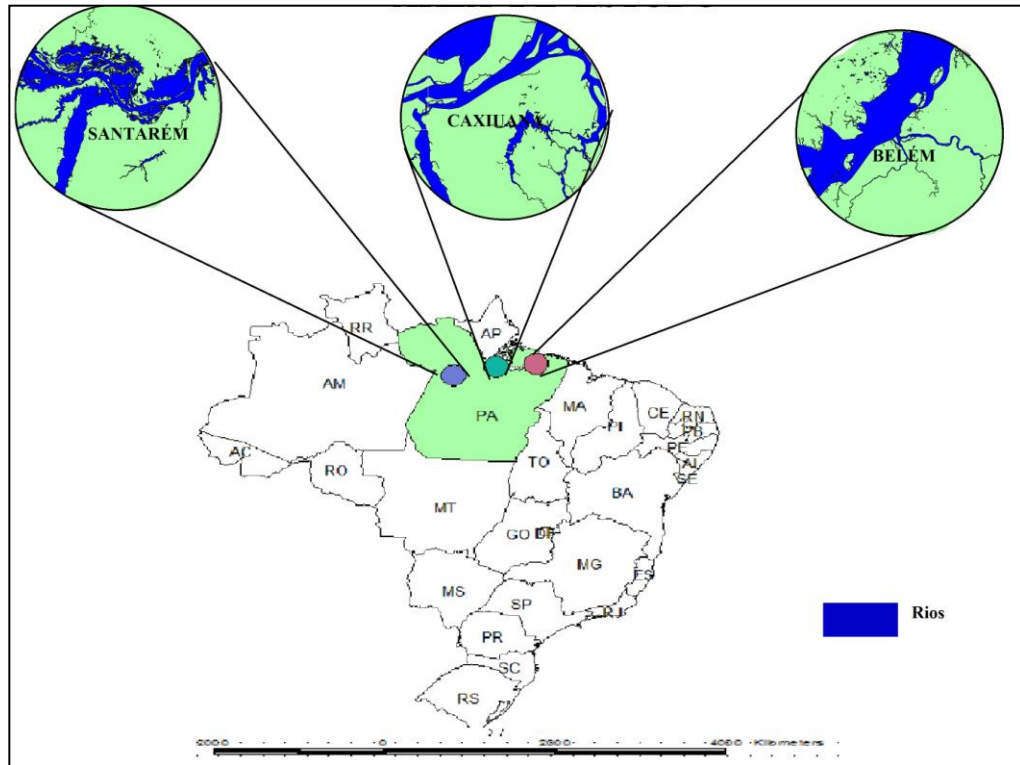
## 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.2.1 Áreas de estudo

Para a realização desse estudo primeiramente foram selecionadas no Leste da Amazônia três regiões que se situam-se em sua totalidade dentro do estado do Pará aproximadamente na mesma faixa de latitude, porém se distanciando gradativamente do Oceano Atlântico. As áreas delimitam-se entre 0° e 2° S de latitude e 50° a 47° W de longitude, abrangendo as seguintes cidades de Belém, Caxiuanã e Santarém (Figura 5).

Para realizar o estudo de raios e chuvas dentro de cada região escolhida, foi preciso delimitar as áreas de estudo, este procedimento foi realizado dentro do ambiente do Arc View 3.2, na ferramenta Theme, opção *creat buffers* escolhia-se o diâmetro do raio de circunferência, no caso 100 km de abrangência, centrado em um pluviômetro em cada região, para Belém foi escolhido o pluviômetro do 4° distrito Naval localizado à latitude de -1°47'53'' e longitude -48°30'16'' para a região e Caxiuanã o pluviômetro escolhido foi do projeto LBA localizado à latitude -1°42'30'' da latitude e longitude -51°31'45'', em Santarém foi escolhido o pluviômetro da Agência Nacional de águas (ANA) operado pela CPRM, que está localizado na latitude -2° 24' 52'' e longitude -54° 42' 36''.

Figura 5- Localização das áreas de estudo de Belém, Caxiuanã e Santarém.



Essas regiões foram escolhidas por estarem estrategicamente na mesma região de atuação das oscilações dos pulsos da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e também a atuação e interação de outros sistemas atmosféricos, buscando verificação da quantidade de raios em cada uma dessas áreas. Como as três regiões que foram estudadas possuem distintas características de tipo de superfície, as proporções entre os tipos foram totalizadas para eventual consideração nas análises e resultados desse trabalho.

### 2.2.2 Distribuição e classificação espacial dos tipos de superfície

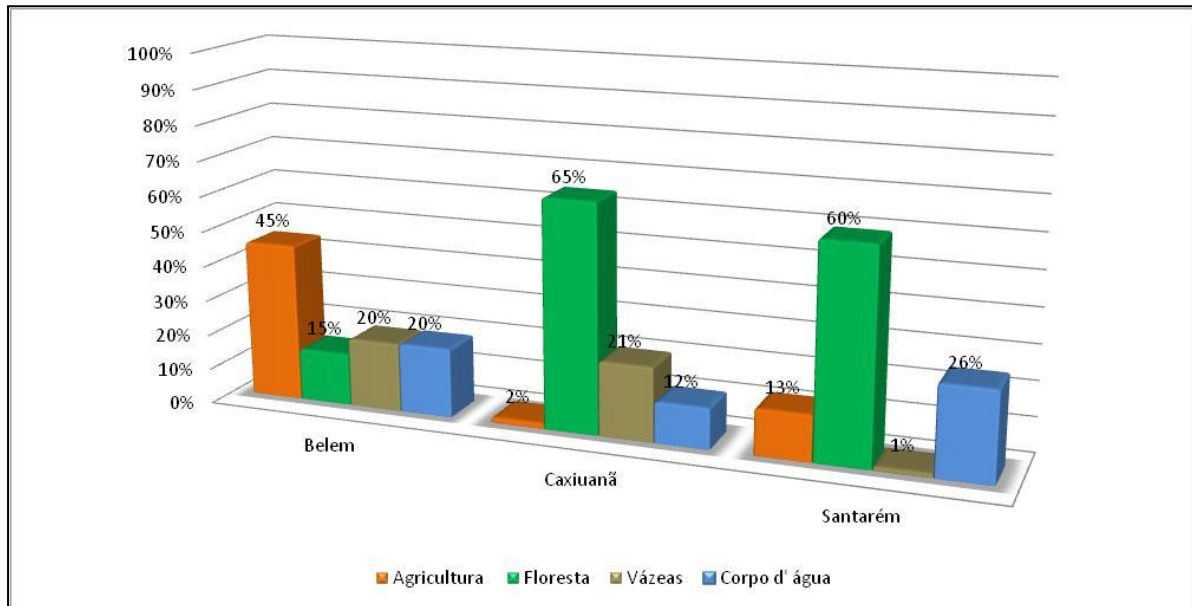
Foi feita uma análise simplificada dos tipos de superfície do solo, em cada uma das áreas de estudo. Para isso, foram utilizados dados da classificação da vegetação do Instituto Brasileiro de Geografia - IBGE. Esses dados foram analisados em um Sistema de Informação Geográfica - Arc View 3.2. Devido ao fato do arquivo de dados da vegetação estar em formato de vetor, primeiramente ele foi transformado em formato de grade ou matriz, onde já

se definiu o tamanho da célula de 1 km<sup>2</sup>, facilitando assim, o cálculo da área de ocupação da cobertura vegetal, em cada área de estudo.

Em seguida, foi feita uma classificação da vegetação bem detalhada das três áreas, obtendo-se varias subdivisões de florestas, campos e pastos, mangues, savanas, corpo d'água e áreas urbanizadas, totalizando 19 tipos de áreas. Essa distribuição foi calculada no Arc View e após obter os valores de cada área foi feito um histograma no EXCEL. Como as florestas apresentaram varias subdivisões, foi feito uma nova reclassificação, criando-se assim cinco grupos; (a) em um grupo foram agrupadas todos os tipos de florestas, (b) outro com áreas alagadas, várzeas e igapós; (c) outro grupo com rios e toda massa d'água, (d) outro grupo com áreas urbanas; (e) um grupo com áreas de agricultura e pastagens, diminuindo assim, o número de classes. Utilizando-se o comando “**Reclassify**” do menu “**Analysis**” o grid resultante dessa reclassificação apresentou 05 classes de cobertura vegetal, ficando apenas as classes de florestas, pastagens, várzeas, água e área urbana. Sendo adotada a mesma metodologia utilizada por Ribeiro (2010).

A área em torno de Belém é bem distribuída quanto ao uso e ocupação do solo, sendo que a maior parte é de agricultura e pastagem (45%), seguida de várzeas (20%), rios (20%) e floresta (15%). Em torno da área estudada de Caxiuanã, 65% do uso e ocupação é floresta e 21% são de várzeas ou igapós e 12% e rios. Em Santarém 60% de sua superfície é coberta por áreas de floresta, 13% é agricultura e pastagem e 26 % são áreas de rios, sendo o Rio Tapajós um principais dessa área (Figura 6).

Figura 6 Distribuição espacial do percentual do tipo de superfície em Belém, Caxiuana e Santarém.

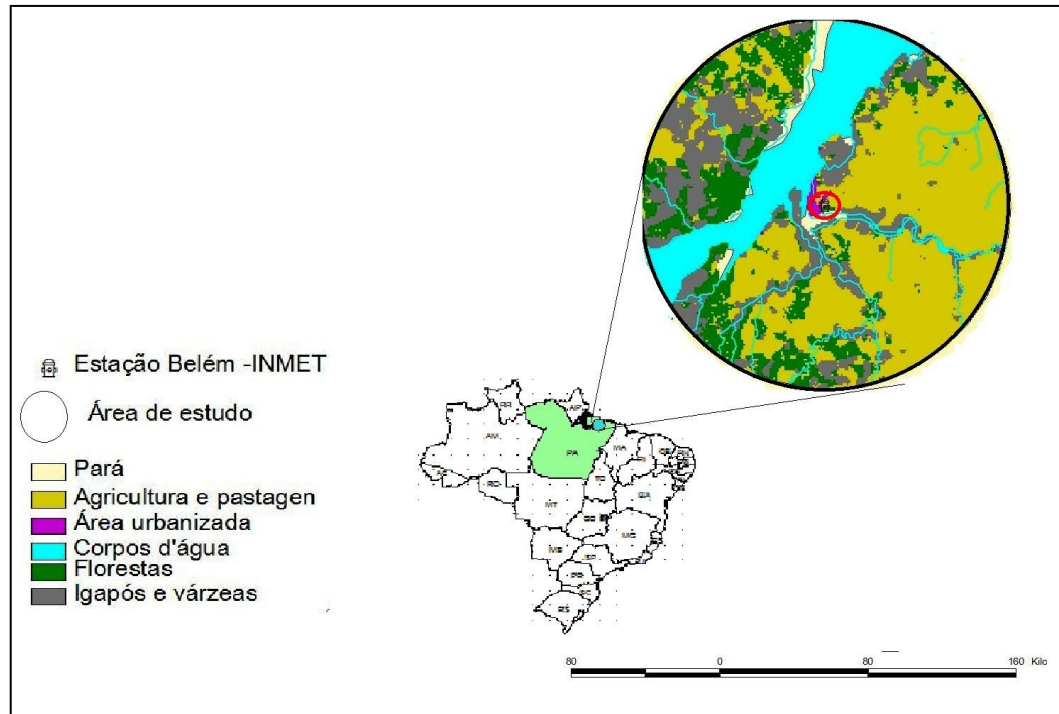


### 2.2.3 Caracterização da área de Belém.

Belém é a capital do Estado do Pará e fica localizada geograficamente a  $1^{\circ} 27' 21''$  de latitude Sul e  $48^{\circ} 30' 15''$  de longitude Oeste, em média quatro metros acima do nível do mar, às margens da Baía do Guajará e do Rio Guamá, distante 120 quilômetros do mar no estuário do Rio Pará (Figura 7).

A precipitação pluviométrica de Belém varia de 2000 a 3000 mm por ano, (FIGUEROA e NOBRE, 1990), sendo os meses de dezembro a maio os de maiores volumes de chuva, associados aos padrões de circulação atmosférica quase estacionários de grande escala, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SOUZA 2003). A precipitação local é fortemente influenciada pela variabilidade inter-anual da circulação geral da atmosfera. Eventos de El Niño no Pacífico parecem diminuir os totais pluviométricos na Amazônia, enquanto durante anos de La Niña se observa anomalia positiva de precipitação (CUTRIM et al., 1995).

Figura 7: Área de Belém centrada no pluviômetro do 4º Distrito Naval.



#### 2.2.4 Caracterização da área de Caxiuanã

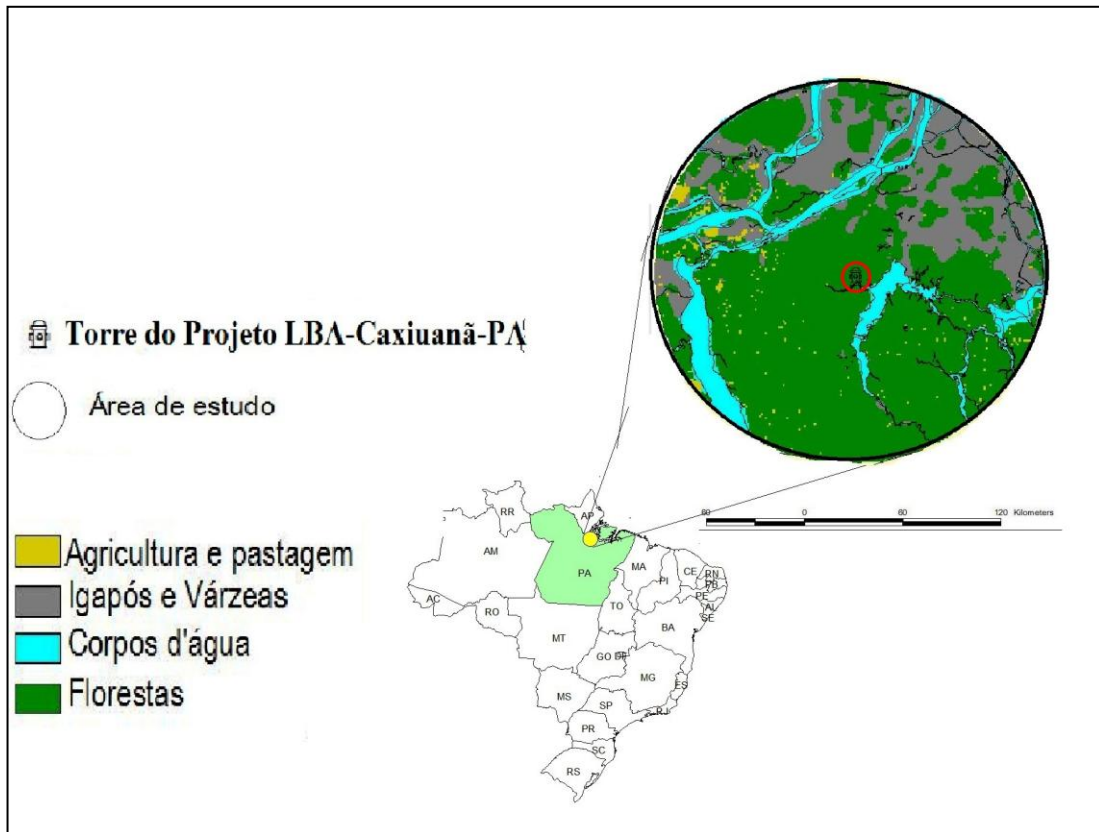
A Floresta Nacional de Caxiuanã está inserida nos municípios de Melgaço e Portel, onde se encontra a Estação Científica Ferreira Penna localizada no município de Melgaço ( $1^{\circ}42'30''S$ ;  $51^{\circ}31'45''W$ ), acerca de 480 km de Belém, na bacia de Caxiuanã (Figura 8).

Sua vegetação é composta por floresta ombrófila densa de terra baixa denominada localmente de terra firme, por florestas secundárias de diferentes idades (ALMEIDA et al., 1993) e dois tipos de florestas alagadas, por rios de água branca (várzeas) e por rios de água preta (igapós) (FERREIRA et al., 2005).

Em Caxiuanã prevalece um regime sazonal de precipitação bem definido, um período chuvoso entre os meses de janeiro a maio que se concentram 67,7% do total da precipitação, anual um período seco entre os meses de junho a outubro com 16,6% do total da precipitação

e um período intermediário entre os meses de novembro e dezembro com 15,7% do total da precipitação anual.

Figura 8- Área de Caxiuanã, centralizada no pluviômetro da torre do LBA em Caxiuanã.



### 2.2.5 Caracterização da área de Santarém

A cidade de Santarém situa-se a  $2^{\circ} 24' 52''$  de latitude sul e  $54^{\circ} 42' 36''$  de longitude oeste, na região do oeste paraense, mesorregião do Baixo Amazonas e microrregião de Santarém. Localiza-se na margem esquerda do rio Tapajós, na confluência com o rio Amazonas. Dista cerca de 810 km, em linha reta, da capital do Estado (Figura 9).

Segundo Sioufi (2005), a maior expressão territorial do Município é recoberta pela Floresta Equatorial Latifoliada, representada pelos seguintes subtipos: Floresta Densa Submontana, em relevo aplainado (a maior área) e Floresta Aberta Mista (cocal). A leste do

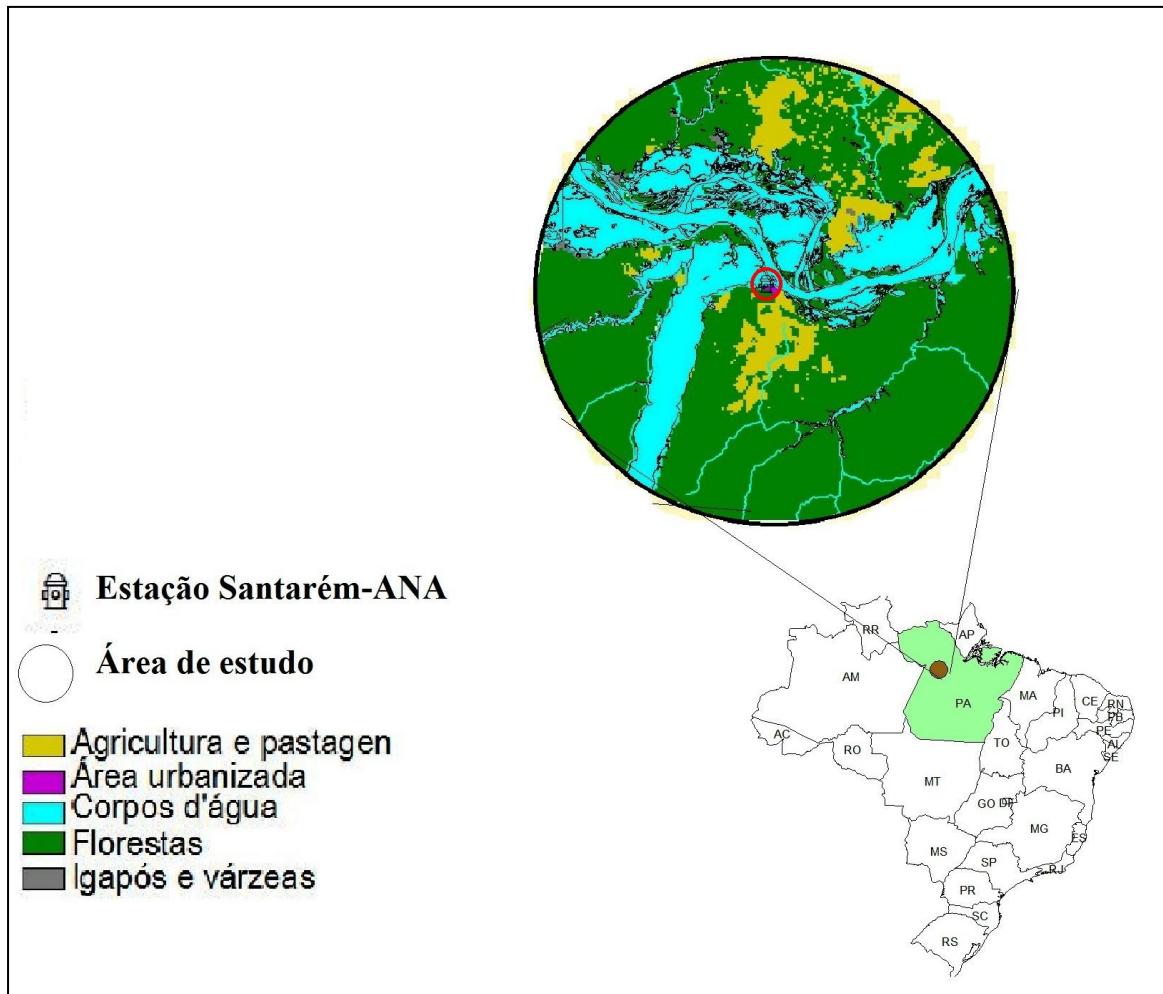
município, em um trecho próximo ao rio Araguaia, uma variação do relevo propicia o aparecimento do Cerradão. Em vários pontos nota-se, também, a presença de pastos, em grandes extensões, com isso a floresta foi removida para o cultivo de pastagens. Às margens do Araguaia e do Tocantins, surge, em alguns pontos, a Floresta Aluvial, dominando os terraços inundáveis e as ilhas.

A época chuvosa da região é de fevereiro a maio, chamada regionalmente de inverno. No mês de junho há uma transição para o período seco. A época seca ocorre entre os meses de julho e dezembro, chamada regionalmente de verão, e no mês de janeiro ocorre a transição do período seco para o chuvoso. A pluviosidade média é de 2000 mm anuais, apresentando um regime de chuva irregular durante o ano. A média mensal de temperatura mínima é superior a 18 °C (NECHET et al., 2006).

Santarém possui circulações locais (brisa fluvial e de brisa terrestre) devido aos rios Amazonas e Tapajós. A brisa fluvial é definida pelo mesmo processo físico que a brisa marítima, sendo que a primeira representa o processo para um rio. As brisas de rio (fluvial) e floresta (terrestre) se apresentam de forma bem definidas, sendo que a brisa fluvial fica mais bem caracterizada no período mais quente do dia, nos horários entre 10:00 HL e 14:00 HL, enquanto a brisa terrestre se evidencia no período de 16:00 HL às 08:00 HL (MOURA et al., 2004).



Figura 9- Área de Santarém, centralizada no pluviômetro da ANA em Santarém.



## 2.3 BASE DE DADOS

### 2.3.1 Dados de raios

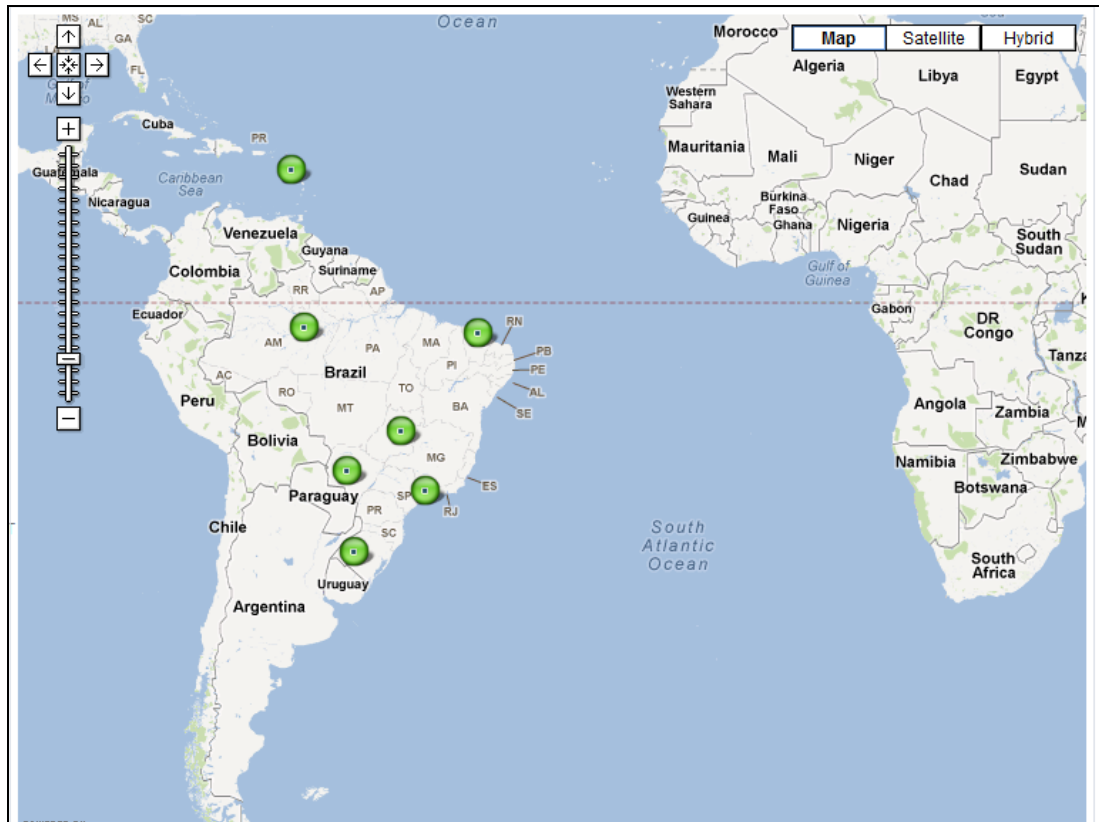
Para a realização deste trabalho foi escolhida a Rede STARNET em função da cobertura precária de outras redes, da falta de atualização e manutenção de dados das redes existentes em nossa região, como recentemente ocorreu com a rede do SIMPAM. A STARNET - Sferics Tracking and Ranging, foi concebida pela 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 sensores de ondas de rádio de baixa

frequência (7-15 kHz - VLF) instalados sobre os continentes Africano, Sul Americano e Caribe. Estes sensores estão precisamente instalados em Addis Ababa (Etiópia), de Dar es Salaam (Tanzânia), Bethlehem (África do Sul) e os americanos localizados em Guadalupe (Caribe), e os brasileiros em Fortaleza (UECE), Cachoeira Paulista (CPTEC) e Campo Grande(UFMS) recentemente foi instalado um em Manaus e futuramente será em Cabo Verde e Belém (Figura 10).

Estes sensores detectam e localizam descargas atmosféricas baseando-se na detecção dos “esféricos” (ANAGNOSTOU et al., 2004, MORALES et al., 2003). Os “esféricos” são ruídos de rádio emitido 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 proveniente das descargas atmosféricas é utilizado o método do ATD (Arrival Time Difference) (LEE, 1986; LEE, 1989).

Os arquivos emitidos pela rede STARNET são padronizados em formato ASCII, e os campos de dados são separados por espaços, e cada arquivo fornece dados diários de um tempo de 15 minutos.

Figura 10: Localização dos sensores de VLF - detectores de raios da STARNET.



Fonte: Morales et al. (2011).

### 2.3.1.1 O desempenho da rede STARNET

A rede STARNET está incluída nas redes ambientais sem fio (Environmental Wireless Network) que funcionam em 3 etapas: detecção, comunicação e computação. Cada uma das etapas encontra falhas de funcionamento ou de processamento que multiplica a vulnerabilidade da rede e afeta a qualidade dos dados.

Os sensores da rede STARNET detectou para o período de estudo selecionado um total de 140.534.273 de eventos de descargas elétricas na área de abrangência dos sensores. Sendo que o maior número de eventos foram referentes ao ano de 2009, o que representou 60% do total de número de raios; em 2008 a rede detectou apenas 11% desse total e em 2010 o número de eventos aumentou para 29% do total de número de eventos raios segundo levantamento da autora a partir do banco de dados da STARNET.

A STARNET apresenta uma distribuição uniforme, porém instável. Para os anos de 2008 a 2010 foi observado falhas nos sensores na rede, sendo os sensores de Manaus e Brasília aqueles que apresentaram as maiores falhas nesse período (Dentel, 2012), o que pode ter comprometido a qualidade na detecção do número de raios nos anos mencionados.

Apesar da instabilidade temporal dessa rede a sua detecção espacial é quase uniforme segundo Morales (2011) e Dentel (2012)<sup>2</sup> Assim sendo, para observações simultâneas o número de eventos de raios de uma área podem ser comparados com os de outra.

Como atualmente ainda não existe um programa capaz de uniformizar temporalmente os níveis de detecção de eventos de raios no banco de dados da STARNET, os ajustes estatísticos entre as variáveis de chuva e raios não podem ser considerados como definitivas, pois a rede evolui temporalmente. Com essas ressalvas, devemos acrescentar que no momento a STARNET é a única que cobre toda a Amazônia e disponibilizou seus dados para pesquisas pioneiras da equipe de raios da UFPA.

---

<sup>2</sup> Dentel (2012) Relatório técnico científico sobre o desempenho da rede STARNET [informação pessoal].< lauredentel@ufpa.br> em 01 jul 2012

### 2.3.2 Dados de precipitação pluviométrica

Os dados de chuvas foram obtidos por pluviômetros de estação meteorológicas automáticas de superfície localizados nas áreas de estudo. As principais bases de dados de chuvas foram obtidas no Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Agência Nacional de Águas - ANA, sendo que as estações são operadas pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), e dados provenientes das torres do projeto LBA, e do projeto ESECAFLOR na estação Ferreira Pena, em Caxiuanã.

## 2.4 TRATAMENTOS DOS DADOS

### 2.4.1 Dados de raios

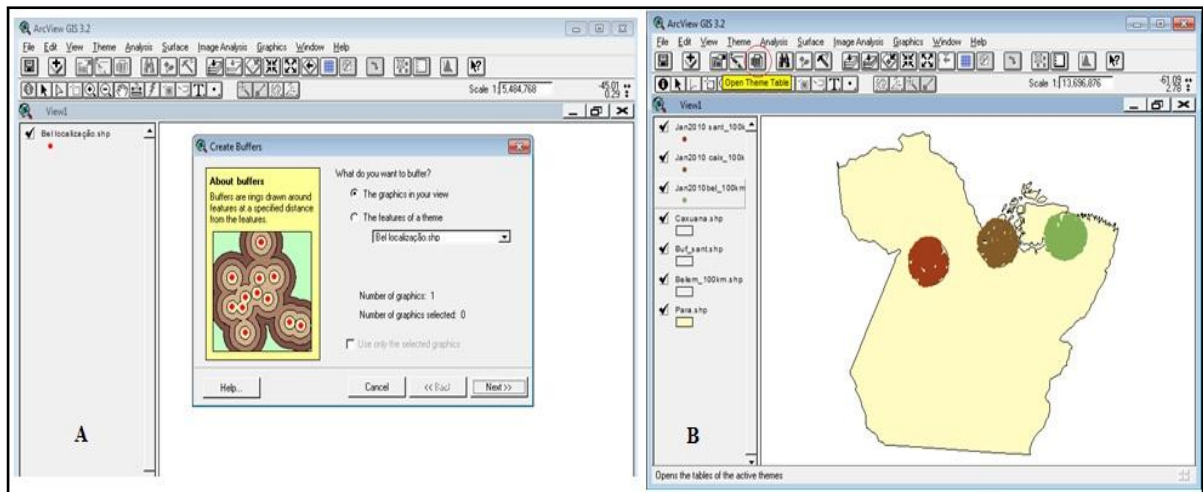
Para análise dos dados de raios foram utilizados vários métodos e programas. Primeiramente os dados de raios diários de 15 em 15 min. fornecidos no formato ASCII, foram manipulados dentro do software Matlab, através de um programa denominado de LEZEUS, que foi elaborado pela equipe de raios da UFPA. Dentro do LEZEUS os dados de raios eram reorganizados em períodos mensais e também era feito uma filtragem que se descartava os dados que apresentavam valores zeros e informações que não eram utilizadas, como a polaridade dos raios.

Após esse procedimento dos dados de saída de raios do programa LEZEUS encontravam-se no formato TXT, o que possibilitava a manipulação dos dados dentro do Arc View 3.2. Com isso foram feitas seleções de dados, através da opção *View – Geoprocessing– Clip*, sendo possível criar arquivos no espaço e no tempo de modo a considerar apenas os raios detectados dentro da área de estudo (Figura 11), que no caso foi de 100 km como foi supracitado anteriormente.

Para quantificar o número de raios dentro das áreas em estudo foi utilizada a ferramenta Open theme table que mostrava uma tabela com o número de descargas elétricas atmosféricas que o programa identificou.

Após a seleção apenas dos dados correspondente em cada área de estudo, este passaram a ser manipulados dentro de planilhas do EXCEL 2007 sendo possível confeccionar as médias mensais.

Figura 11- Ferramenta do ArcView para se criar os raios de 100km;(B) Recortes das áreas de estudo com a quantidade de raios em 100km.



#### 2.4.2 Dados de precipitação

Os dados de precipitação acumulada selecionada para análises foram medidos por pluviômetros basculantes das estações meteorológicas automáticas de superfície.

Em cada área foi selecionada um determinado número de estações meteorológicas, conforme a disponibilidade dos dados, tanto no portal da Hidroweb-ANA quanto no portal do INMET na internet. Após a coleta dos dados foram calculadas as médias mensais em cada área e agrupadas por trimestre seco e chuvoso que foram tratados em planilhas EXCEL,

Cada local de estudo possui um determinado número de estações pluviométricas. Belém contou com três estações, Caxiuanã com duas estações e Santarém com cinco estações (Tabela 1).

Tabela 1- Relação das estações meteorológicas e suas localizações geográficas e médias trimestrais de precipitação em Belém, Caxiuanã e Santarém.

Nome da estação	Responsável	Operador	Lat	Long	DJF	MAM	JJA	SON
Belém INMET	INMET	INMET	-1,43	-48,43	909,9	1263,6	511,4	219,0
Belém Mosqueiro	ANA	CPRM	-1,09	-48,40	799,9	1322,7	605,1	252,9
Belém 4DN	ANA	CPRM	-1,46	-48,50	224,6	658,8	476,8	266,2
Estação Ferreira Pena -Caxiuanã	ESECAFLOR	ESECAFLOR	-1,73	-51,45	572,7	849,5	261,3	85,4
Torre projeto LBA-Caxiuanã	LBA	LBA	-1,72	-51,46	975,9	555,7	390,4	150,1
Obidos – Santarém	INMET	INMET	-1,91	-55,51	712,1	961,4	233,9	217,8
Santarém-Pará	ANA	CPRM	-2,44	-54,7	553,1	854,4	98,1	191,6
Curuai - Santarém	ANA	CPRM	-2,26	-55,48	557,2	1004,2	372,4	106,2
Cachoeira do Aruã - Santarém	ANA	CPRM	-2,65	-55,72	505,6	988,5	309,5	100,1
Taperinha - Santarém	INMET	Desativada	-2,41	-54,33	444,5	1098,1	253,2	11,9
São José – Santarém	ANA	CPRM	-2,56	-55,37	728,1	730,4	115,7	66,8
Média Trimestral					634,9	935,2	329,8	151,6

Com a obtenção dos dados de raios e precipitação que já se encontravam tratados, foram confeccionados no *software* EXCEL, tabelas, histogramas, gráficos de barra e de linhas mensais e trimestrais, além de médias mensais e gráficos de dispersão e linha de tendência entre raios e chuvas, assim como a sua distribuição dentro das áreas de estudo.

Foram feitos ajustes temporais dos raios em relação à chuva, em cada área sendo utilizado deslocamentos dos máximos valores de raios com os máximos valores de chuva o que resultava em um valor de  $\Delta t$  de aproximadamente 2 meses. Para Belém não foi necessário realizar o ajuste temporal por isso esse deslocamento possui um  $\Delta t$  de valor zero, para

Caxiuanã contou com ajuste temporal bem discreto não chegando a um mês o valor do  $\Delta t$ , Santarém foi o maior ajuste que precisou ser realizado, o máximo valor do raios foi ajustado com o máximo da chuva em um  $\Delta t$  de 2 meses.

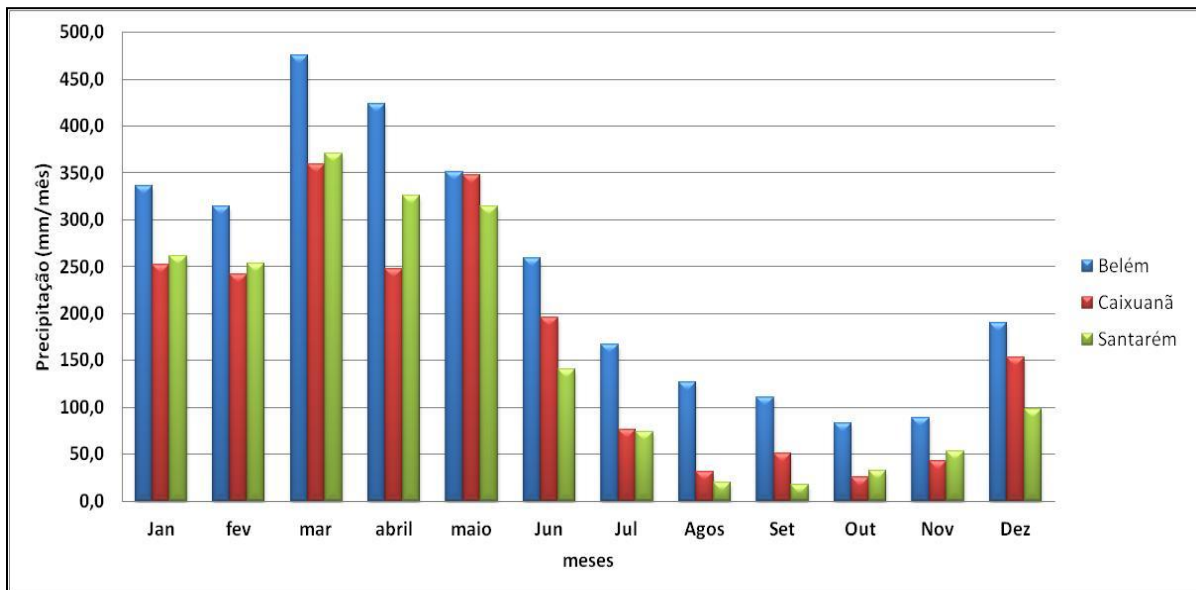
Após os ajustes temporais foram realizados os gráficos de regressão sendo considerado todos os meses de estudo de ambas as variáveis, e verificava-se qual a melhor regressão se ajustava aos dados.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Média mensal da Precipitação

Os resultados apontaram o mês de março apresentando o maior índice de chuvas nas três localidades, Belém, Caxiuanã e Santarém com os seguintes valores 314 mm/mês, 359 mm/mês e 371 mm/mês, respectivamente. O mês menos chuvoso foi setembro em Santarém com 17,2 mm, e o mês de agosto em Caxiuanã com 31,8mm (Figura 12). A figura 12 nos permite observar que há uma variabilidade da quantidade de chuva em cada área, onde podemos associar com a flutuação da ZCIT ao longo do ano.

Figura 12-Média mensal da precipitação pluviométrica, nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010.

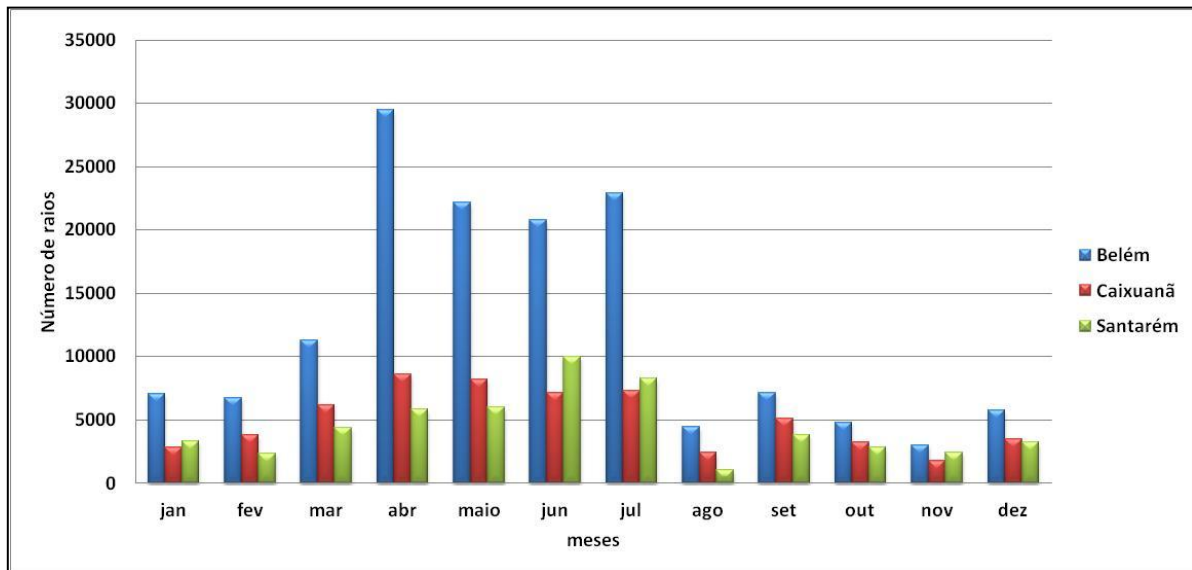




### 2.5.2 Média mensal do número de raios

As maiores ocorrências de raios foram observadas para a cidade de Belém, tendo valores mais elevados nos meses de abril a julho. Uma das explicações para o incremento nos eventos de raios se deve aos efeitos sazonais da ZCIT e ZCAS. Já o menor número de raios foi observado na cidade de Santarém no mês de agosto e em Caxiuanã no mês de novembro. Tal fato está associado a menor ocorrência de chuvas nesse período, o que desfavorece a produção de nuvens convectivas produtoras de raios (Figura 13).

Figura 13- Distribuição da média mensal do número de raios detectados nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010.



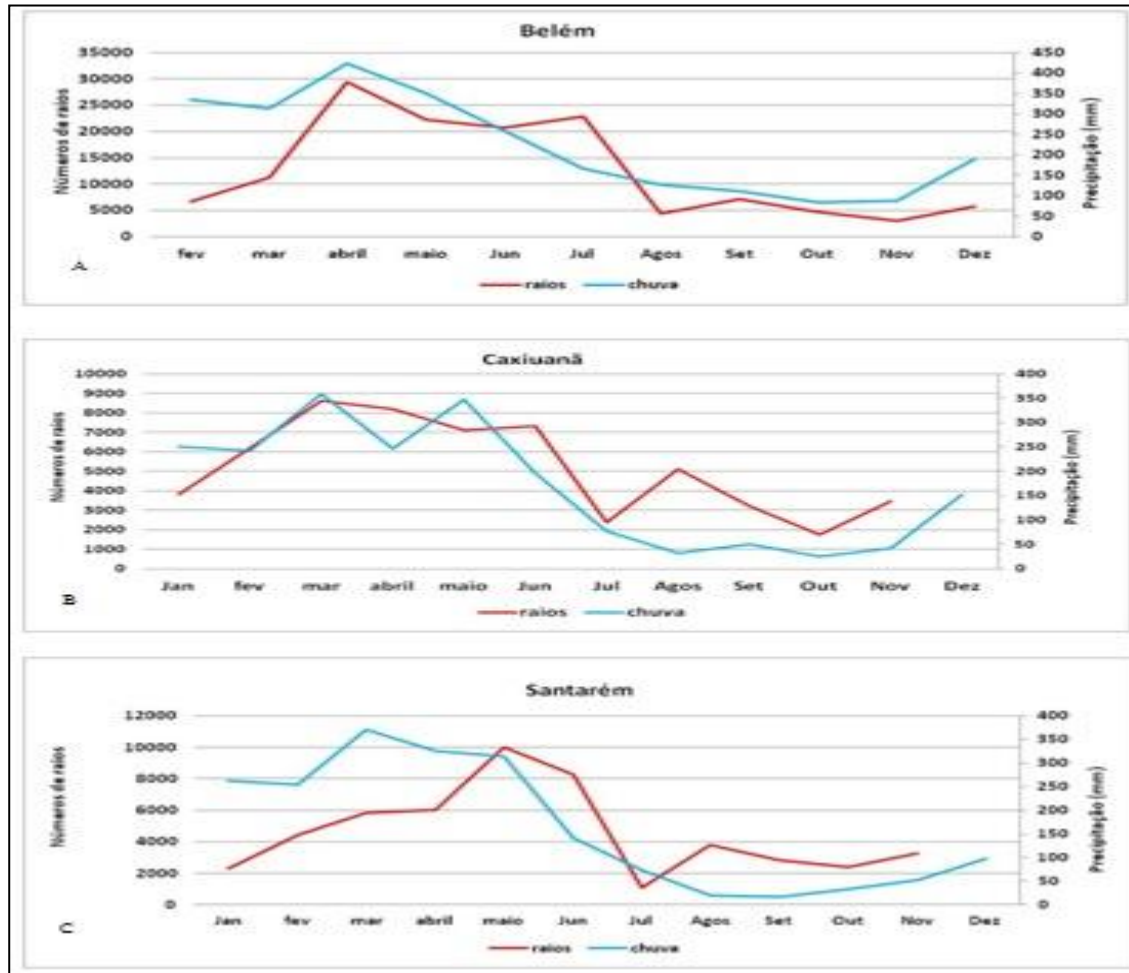
Analisando a figura 12 e 13 notamos que há uma defasagem dos raios em relação à chuva, como vimos os máximos valores de chuva ocorreu no mês de março nas três regiões, enquanto que os máximos valores de raios correram em abril bem destacado em Belém, o alto volume de chuva observado esta associado à permanência da ZCIT que contribui para um regime de muita chuva o que é bem característico nessa época do ano.

Com relação à ocorrência dos raios parece que a intensificação dos sistemas locais juntamente com a ZCIT contribuem muito para a produção de raios, ou seja a interação dos sistemas atmosféricos de grande escala mais os sistemas de escala menor favorecem no surgimento dos raios.

### **2.5.3 Média mensal da relação entre precipitação e raios usando ajustes de raios em relação à chuva com um mês de antecipação.**

Notamos que em Belém (Figura 14 a) e Caxiuanã (Figura 14 b) os raios antecedem as chuvas e que sua relação parece ser direta. Para Santarém, um comportamento diferente foi observado (Figura 14 c), onde os máximos de chuva não acompanharam os máximos de raios, porém nos períodos de poucas chuvas as três regiões apresentaram uma uniformidade nas variáveis. Isso demonstra os efeitos sazonais de posicionamento e deslocamento da ZCIT e ZCAS que podem ter contribuído mais decisivamente para produção de raios na sequência de tempo observada (Figura 14). Teixeira (2010), em seu estudo realizado com dados do TRMM para a Amazônia Oriental, encontrou os mesmos resultados obtidos no presente estudo.

Figura 14- Relação da média mensal entre precipitação e raios nas áreas de Belém, Caxiuanã e Santarém. Período de set 2008 a set/2010.



#### 2.5.4 Distribuição da relação entre raios e chuva em Belém, Caxiuanã e Santarém.

Nas Figuras 15, 16 e 17 são apresentadas as distribuições entre a média mensal da chuva e o número mensal de eventos de raios detectados, pela STARNET, durante o período de set/2008 a set/2010.

Em Belém observa-se que os meses de março e abril/2009 apresentaram a maior média pluviométrica, com 582 e 498 mm, respectivamente. Enquanto que o mês de

novembro/2009 apresentou o menor índice, com apenas 45,1 mm. Com relação ao número de raios, o mês de abril/2010 teve o maior número de ocorrências, com 63.783 eventos e o mês outubro/2009 teve a menor ocorrência, com apenas 213 eventos (Figura 14).

Para Caxiuanã os meses de janeiro, fevereiro e maio/2009 tiveram a maior média pluviométrica, com 364 mm, 363 mm e 414 mm, respectivamente. Já o mês de agosto/2009 obteve o menor índice, com apenas 15,5 mm. Quanto aos números de raios, pode-se observar que o mês de junho/2009 teve o maior número de ocorrências com 16.837 eventos e o meses de agosto e outubro/2009 tiveram as menores ocorrências, com apenas 8 e 106 eventos (Figura15).

Em Santarém foi observado que o mês de março/2009 teve a maior média pluviométrica, com 458 mm, enquanto que os meses de agosto e setembro/2009 obtiveram os menores índices, com apenas 7mm e 5mm, respectivamente. Com relação ao número de raios, o mês de junho/2009, teve o maior número de ocorrências de raios, com 18.443 eventos, seguido do mês de junho/2010 com 16.063. Já o mês de agosto/2009 teve a menor ocorrência com apenas 45 eventos (Figura 16).

A distribuição da precipitação mensal na Amazônia mostra de forma mais clara os máximos de precipitação ligados ao posicionamento da ZCIT. Gandu (2004), sugeriu que, embora as características sobre o leste da Amazônia sejam determinadas pela circulação de grande escala, a proximidade com o oceano e grandes rios, cria áreas específicas com variabilidades espaciais e temporais de precipitação. A circulação de mesoescala associada com a brisa marítima é um exemplo de um sistema bastante atuante, uma vez que a convecção estruturada pelas linhas de instabilidade costeiras, bem como sua propagação, é responsável por uma parte significativa da precipitação nessa região (COHEN et al,1995).

A relação entre as descargas elétricas e a precipitação acumulada não se mostrou totalmente direta nas três localidades. A frequência de raios não seguiu um padrão, porém, quando observamos os períodos de transição do chuvoso para o seco, raios e chuvas seguem um comportamento aonde se percebe que as variáveis se acompanham de forma mais direta.

O mês de junho de 2009 nas três localidades apresentou o mesmo comportamento, em relação ao número de atividades elétricas. Já as chuvas se mostraram diferentes, sendo a localidade de Caxiuanã a que apresentou o maior volume de chuva (Figura 15). O aumento do

número de raios no mês de junho foi pela convergência de umidade registrada pelos boletins do CPTEC que mostram os sistemas mais significativos como as LI (BOLETIM/CLIMANÁLISE junho de 2009). Os meses em que as chuvas apresentam valores altos a frequência de raios aumenta proporcionalmente no período chuvoso e decaem também nessa mesma frequência na época de poucas chuvas nas três regiões de estudo. Mostrando com isso o deslocamento e os pulsos da ZCIT em Belém, Caxiuanã e Santarém.

Figura 15- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Belém durante o período set/2008 a set/2010.

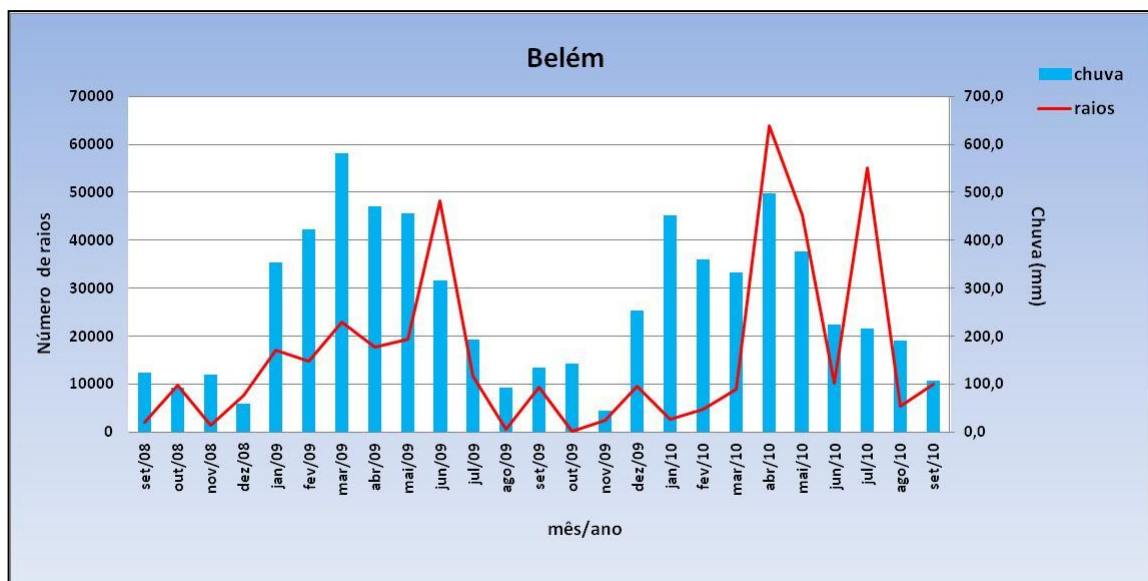


Figura 16- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Caxiuana durante o período set/2008 a set2010.

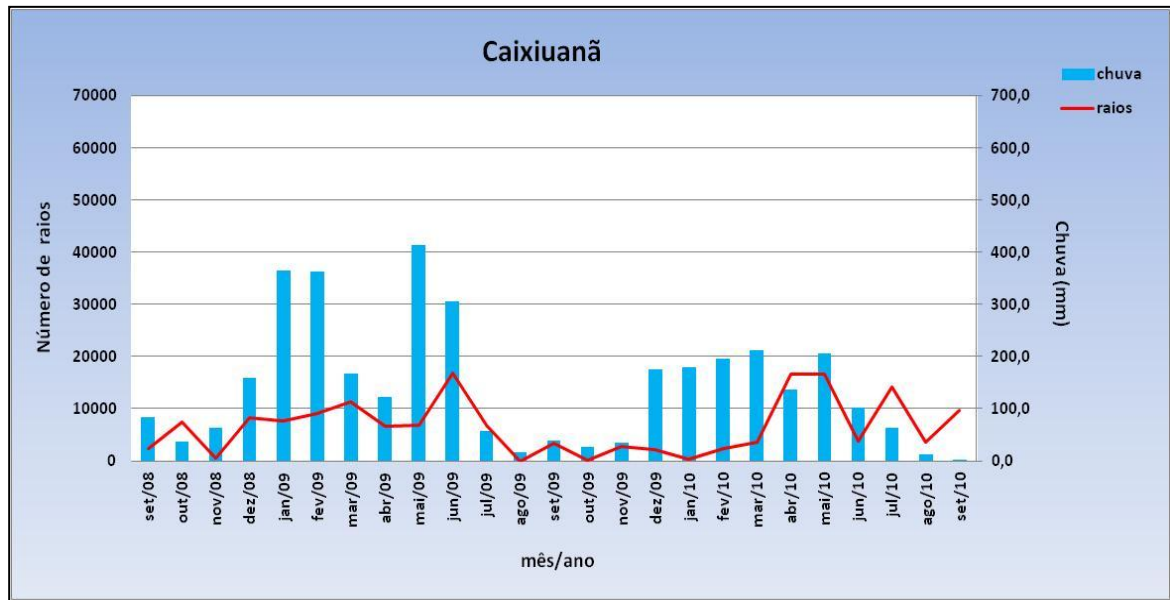
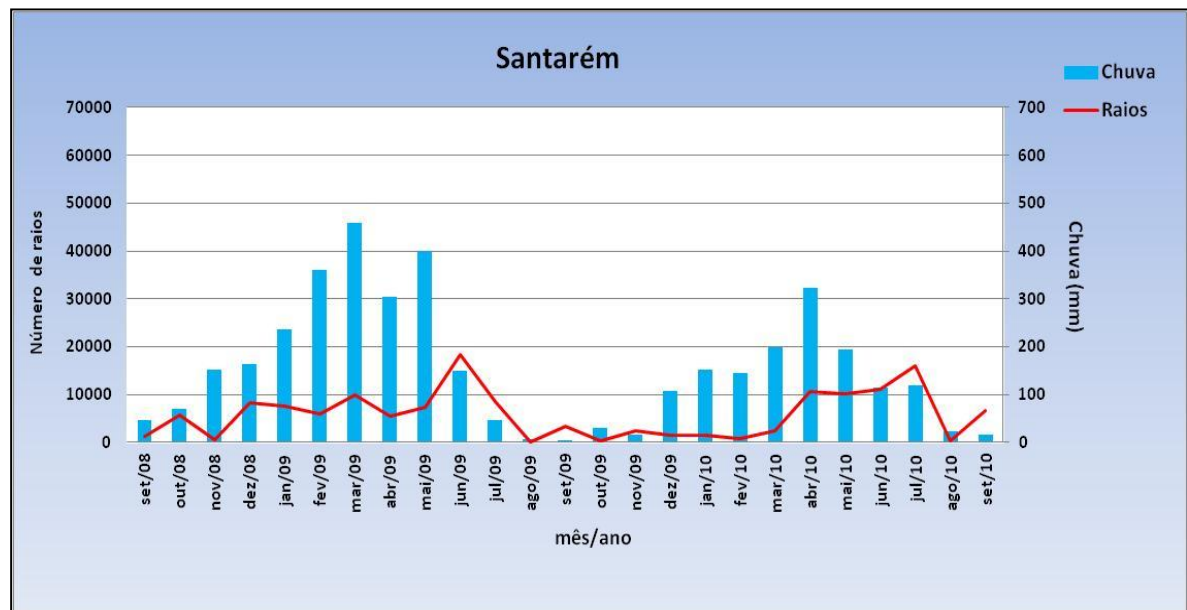


Figura 17- Distribuição da média mensal dos raios e precipitação em Santarém durante o período set/2008 a set2010.



A climatologia dos lugares estudados apresentam peculiaridades, com os sistemas meteorológicos comumente chegando primeiramente em Belém a interação do sistema de grande escala, ZCIT acoplada a sistemas locais favorece a formação de nuvens eletrificadas.

À medida que vamos nos direcionando para dentro do continente, a quantidade de raios é bem diferente, contudo é observado que, para Caxiuanã, aglomerados convectivos e sistemas locais contribuem para a formação de nuvens produtoras de raios.

A cidade de Santarém, por sua localização próxima ao rio Tapajós apresenta um circulação de brisa fluvial no período da tarde, e o desenvolvimento de CCM que ajudam na formação de nuvens produtoras de relâmpagos. Outro fator relevante é que parece que as ZCAS possuem maior influência na quantidade de raios do ZCIT, devido a maior convecção.

No entanto as variações na ocorrência de raios e chuvas seguem o sentido de deslocamento sazonal da ZCIT, o que evidencia uma influência da circulação de grande escala na circulação local, observada nas três localidades.

Assim como a climatologia o tipo de superfície das três regiões são diferentes notamos que Belém apresenta uma vasta área de pastagem e isso pode ter influenciado nas quantidades de raios, as áreas que apresentam mais cobertura vegetal como Caxiuanã e Santarém mostram uma grande quantidade de chuva e uma ocorrência menor de raios. O que corrobora com os estudos de Ribeiro (2010) que apontou uma grande quantidade de raios em áreas de agricultura e pastagem na época seca e em regiões de floresta apresentou poucos raios.

Mas o que pode ser observado é que o principal fator na distribuição dos raios é causado pela presença dos sistemas atmosféricos característico de cada região.

#### **2.5.5 Distribuição trimestral entre raios e chuvas**

A relação da precipitação pluviométrica com os raios nos períodos seco e chuvoso, mostra que as curvas de raios e chuvas seguem uma mesma tendência durante o período seco em todas as áreas, enquanto que no período chuvoso não se observa essa tendência (Figura 17).

Em Caxiuanã houve um decréscimo das chuvas em abril, mas o número de raios se manteve quase que constante havendo um encontro da chuva com o raio apenas no mês de

abril (Figura 17 b). Em Santarém há uma distinção entre a ocorrência de raios e chuvas, não havendo encontro das duas curvas em nenhum dos meses (Figura 17 b).

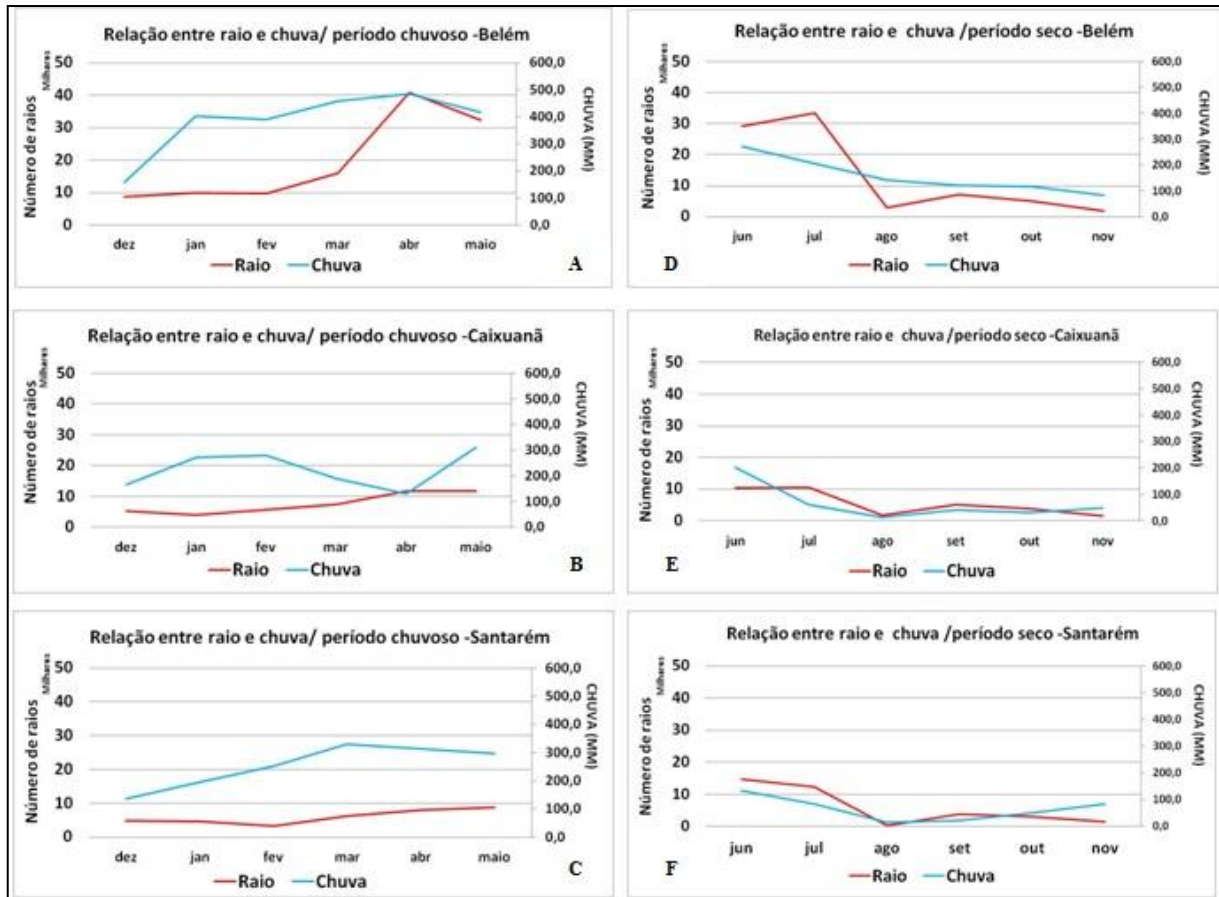
No período seco as frequências de raios tendem a acompanhar as chuvas, de modo que quando ocorre a diminuição das chuvas nos meses de junho a novembro o número de descargas elétricas também diminuem (Figura 17 d, e, f).

Em áreas desflorestadas há maior ocorrência de nuvens rasas (NEGRI et al, 2004; CHAGNON e BRAS, 2005) relacionadas ao desenvolvimento de circulação de mesoescala (WANG et al., 2009). Este incremento da ocorrência de nuvens rasas, junto com a diminuição da convecção noturna é responsável pela diminuição da precipitação durante a época seca em áreas desflorestadas, enquanto que durante a época úmida há um incremento da precipitação como resultado do aumento da convecção profunda (DIURIEUX et al., 2003). Por outro lado, a variabilidade detectada nas séries de precipitação na Amazônia está associada com variabilidade climática interanual, decadal e interdecadal (MARENGO, 2009; CHEN et al., 2001; ESPINOZA et al., 2009).

A relação entre raios e precipitação não é totalmente direta nas três cidades estudadas, os resultados mostram uma defasagem que pode ser entre 2 a até 4 meses entre os máximos de chuva e de raios.



Figura 18- Distribuição mensal entre a média de raios e média de chuva: (A), (B) e (C) no período chuvoso; (D), (E) e (F) no período seco durante o período de set/2009 a set/2010 em Belém, Caxiuana e Santarém.

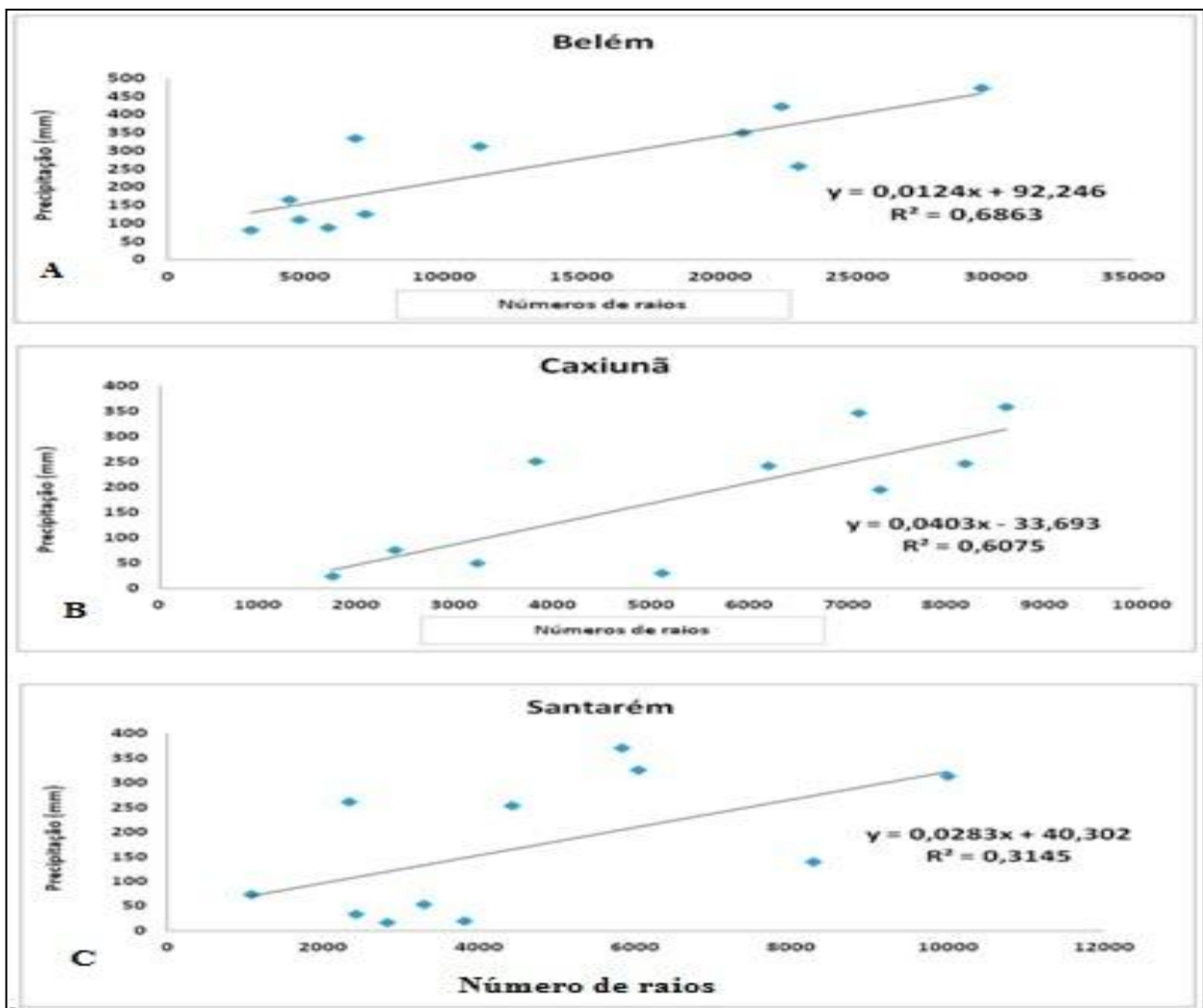


Este estudo mostra que o número de raios é consideravelmente maior em Belém que em Caxiuana e Santarém, corroborando com o observado por Teixeira et al. (2011) e Almeida (2010), os quais encontraram a cidade de Belém em uma área de intensa atuação de raios enquanto Caxiuana e Santarém em áreas de poucos eventos de raios (Figura 5a e 5b). Essa diferença na quantidade de raios pode está relacionada ao fato de que a rede STARNET operou melhor no ano de 2009 que em 2008 e 2010, como já foi relatado anteriormente.

### 2.5.6 Análise de Dispersão entre Raios e Chuvas.

O melhor coeficiente de determinação entre raios e chuvas foi observado em Belém, com  $R^2 = 0,6863$  o que representa 68% de correlação entre as variáveis, sendo sua linha de tendência linear. Para Caxiuanã o valor da correlação foi de 0,6075 o que corresponde a aproximadamente 61%. Já Santarém não apresentou uma correlação satisfatória para o período de estudo com  $R^2 = 0,3145$  o que representa 31% de correlação (Figura 18 a, b, c).

Figura 19- Linhas de tendências entre raios e chuva (set 2008 a set/2010). (A) Belém, (B) Caxiuanã e (C) Santarém.



## 2.6 ESTUDO DE CASO

A ZCIT corresponde à região de confluência dos ventos alísios de sudeste provenientes do Hemisfério Sul com os de nordeste provenientes do Hemisfério Norte caracterizada por intensa atividade convectiva. A ZCIT pode atuar de duas formas indiretas no norte do Brasil: através de aglomerados convectivos que se formam ao longo dela e que ao se propagarem para oeste atingem a bacia Amazônica; e através da interação dos alísios com a circulação da brisa marítima formando LI que adentram o continente e se regeneram durante a propagação para oeste, sendo que muitas alcançam os Andes (KOUSKY, 1980; COHEN et al., 1989; COHEN et al., 1995)

Para mostrar a influencia da ZCIT com a interação de outros sistemas nas áreas de estudo, foram escolhidos dias de intensas chuvas com a presença de raios para acompanhar como um sistema de grande escala com diferença espacial e temporal pode afetar determinadas localidades. Os dias escolhidos foram o dia 27 de abril de 2009 e o dia 01 de maio de 2009.

Para esses dias, observou-se que a ZCIT primeiramente afetou a cidade de Belém e aproximadamente três dias depois sua banda de nebulosidade chegou a Santarém. Aparentemente esse sistema de grande escala vem atuando do litoral para dentro do continente. Com a banda de nebulosidade não sendo uniforme nas duas regiões. Nos meses de abril e maio de 2009 segundo o boletim meteorológico do CPETC esses foram considerados meses acima da média climatológica, o motivo dessas anomalias foi à intensidade do fenômeno de grande escala La Ninã, que contribuiu para o aumento das chuvas na Amazônia.

### 2.6.1 Dados e metodologia

Para a realização e análises dos eventos severos de chuva e raios foi preservado o limite de 100 km de circunferência centrados no pluviômetro do 4º Distrito Naval em Belém e para Santarém foi usado o pluviômetro o INMET.

A seleção dos dias de chuva seguiu um critério de tempestades severas onde foi considerada a intensidade de precipitação, sendo selecionados dias em que ocorreram chuvas acima de 25 mm em uma hora ou 40 mm em duas horas que, segundo o Manual de

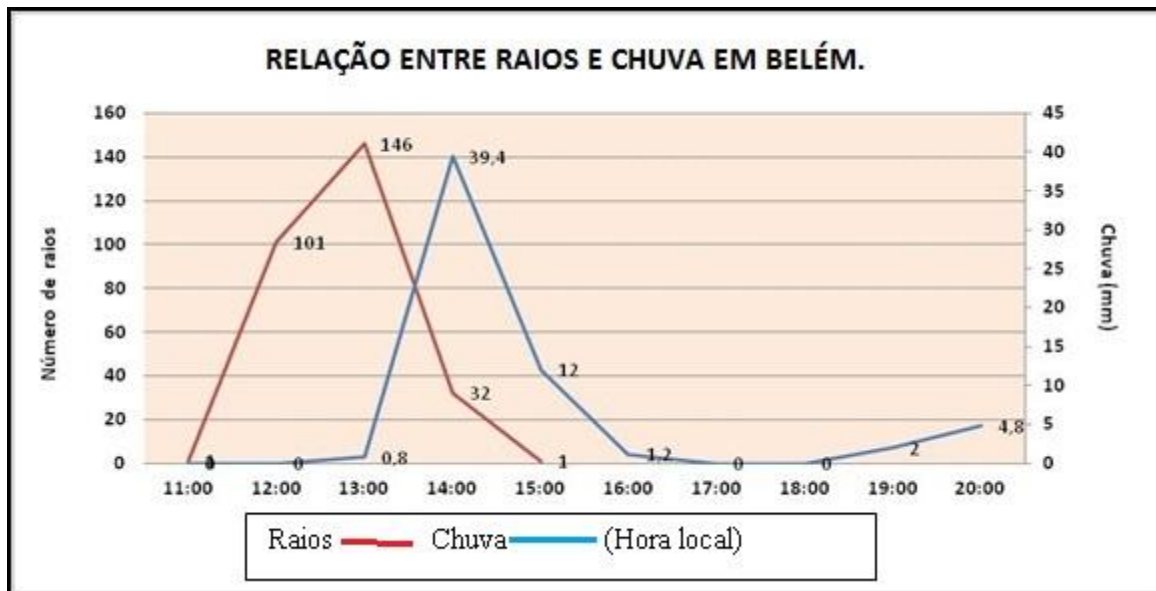
Meteorologia Aeronáutica 105 – 2 da Diretoria de Rotas Aéreas (1964), chuva entre 25,1 e 50 mm é considerada forte, e acima de 50 mm é considerada severa.

### 2.6.2 Estudo de caso do dia 27 de abril de 2009 em Belém.

Para o dia 27 de abril de 2009, a distribuição espacial horária do número de raios e da precipitação, onde se verifica a maior atividade elétrica ocorreu às 12:00 HL e 13:00 HL, com 101 e 146 eventos, respectivamente (Figura 19). Ao longo do dia choveu 60,2 mm sendo que a máxima ocorreu às 14:00 HL com 39,4 mm e às 15:00HL com 12mm resultando num acumulo de 51,4 mm em duas horas de chuva.

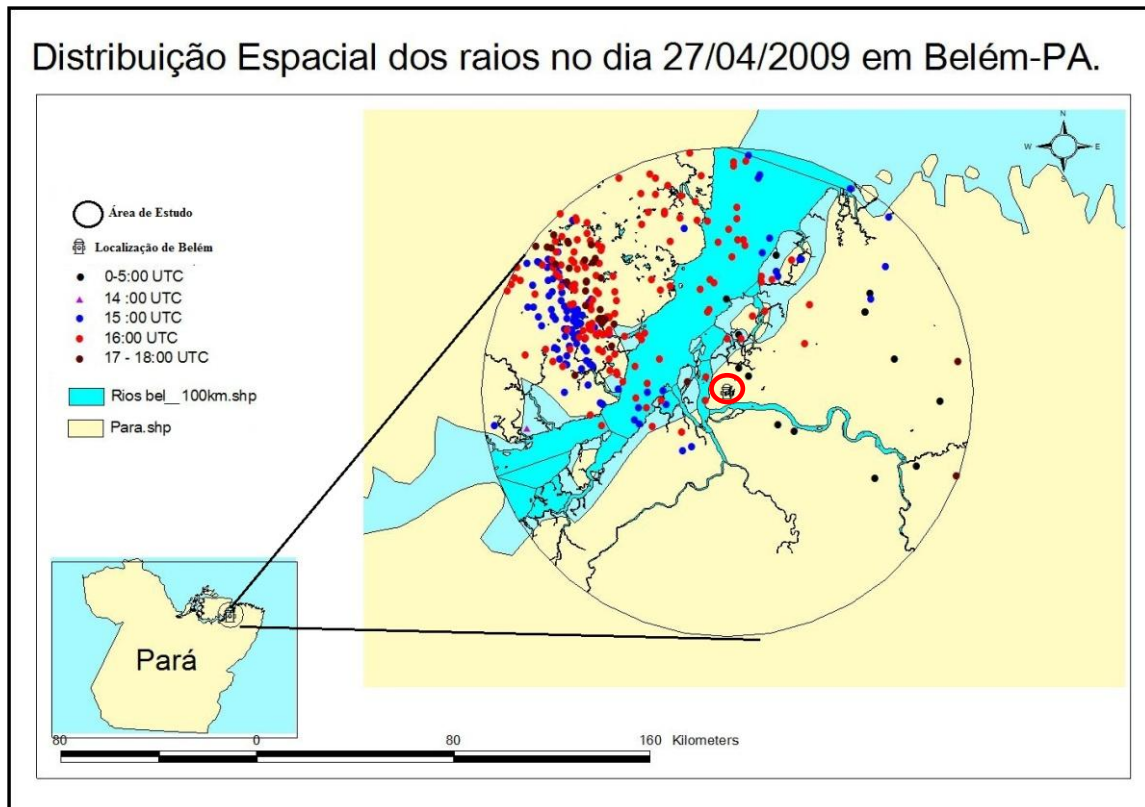
O comportamento temporal dos raios com relação à chuva mostrou que o intervalo de tempo entre o máximo de raios e o máximo da chuva ficou em torno de 2 horas, tempo em que os raios antecederam as chuvas .A formação de nuvens eletrificadas antes da a chuva ficou evidente nas imagens de satélite mostradas na Figura 21,a,b,c,e d.

Figura 20- Relação entre raios e chuva em Belém no dia 27/04/2009. Os dados de chuva nessa análise são do INMET.



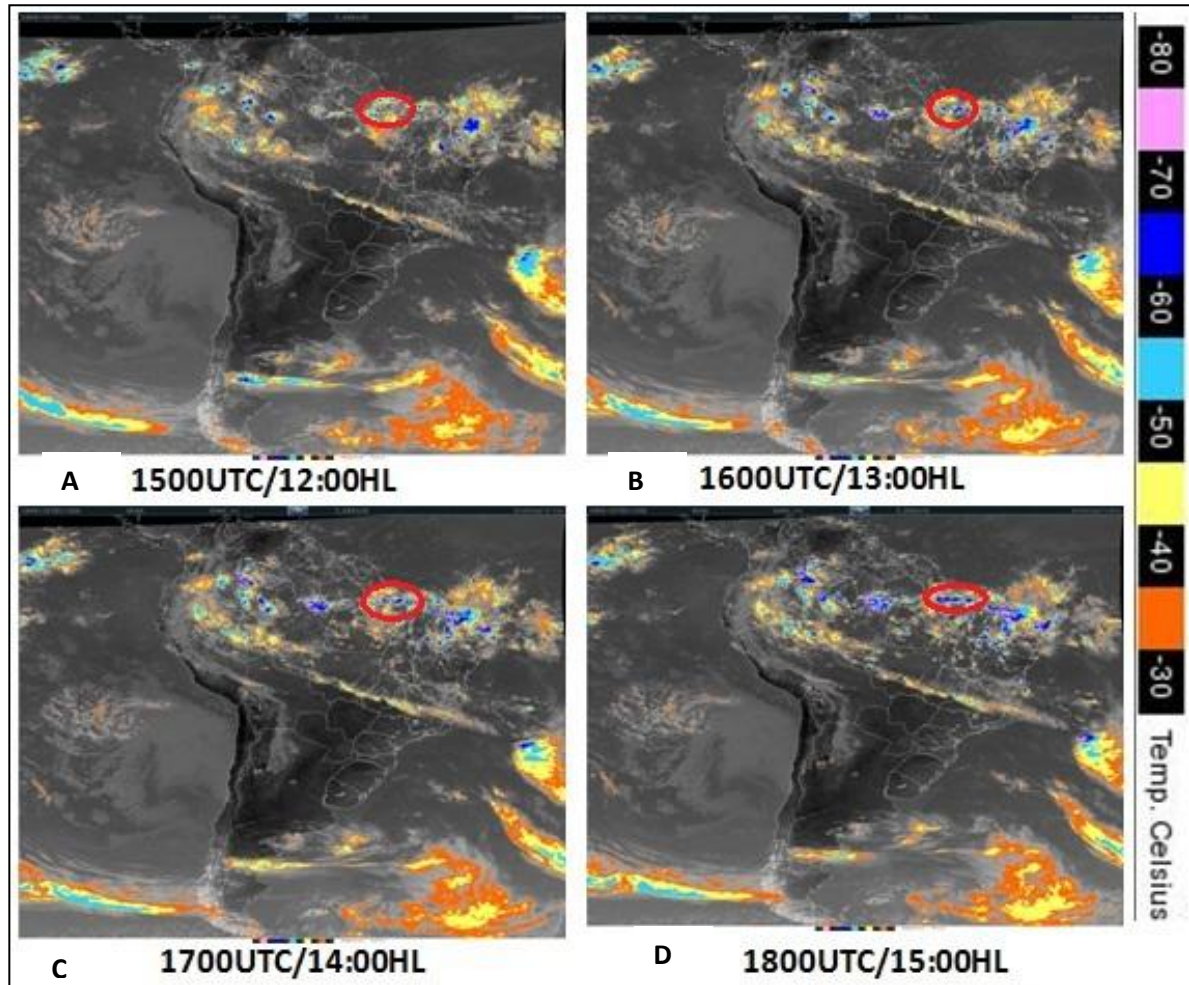
Para a distribuição temporal dos raios neste dia, foi observado que a maior atividade elétrica ocorreu entre 15 e 16:00 UTC, ou seja, às 12 e 13:00 HL. Com os raios ocorrendo de noroeste e para leste, ficando bem definido o sistema convectivo provocado pela presença da ZCIT e também pela interação de outros sistemas que ajudaram na formação de nuvens profundas (Figura 20).

Figura 21- Distribuição temporal dos raios em Belém no dia 27 de abril de 2009.



A figura 21 mostra a imagem de satélite GOES-12 no canal infravermelho do dia 27/04/2009 para os respectivos horários 1500 UTC ou 12:00 HL, 1600 UTC ou 13:00 HL, 1700 UTC ou 14:00 HL e 1800 UTC ou 15:00 HL. Nesta figura é representada a atuação da banda de nebulosidade associada à ZCIT, onde esse sistema maior interage com outros sistemas (LI) produzindo grande atividade convectiva acompanhada de descargas elétricas ao norte do estado do Pará afetando a cidade de Belém a maior atividade se deu nos horários entre às 1700 UTC e 1800 UTC (Anexo b).

Figura 22: Imagens de satélite GOES 12 canal infravermelho (realçada) do dia 27/04/2009 (A) às 1500Z;(B) à 1600Z;(C) às 1700Z e as 1800Z.



### 2.6.3 Estudo de caso do dia 01 de maio de 2009 em Santarém

Para realizar o estudo de caso em Santarém do dia 01 de maio de 2009 foi necessário observar o dia anterior (30/04/2009) no qual se iniciou a tempestade que se estendeu até a madrugada do dia 01/05/2009.

A distribuição do número de raios ocorridos entre os dias 30/04/2009 e 01/05/2009 em Santarém mostrou que nesse dia houve uma intensa atividade elétrica que se iniciou as 21:00 HL do dia 30/04/2009 até a 00:00 HL do dia 01/05/2009, sendo seus máximos às 22 e 23:00 HL com 256 e 279 raios, respectivamente (Figura 22).

Não foram obtidas as informações dos valores exatos da precipitação pluviométrica horária da cidade de Santarém, então foram utilizadas as informações meteorológicas horárias das condições do tempo através do código METAR. No qual foi destacado através de cores dentro do gráfico a evolução da chuva (Figura 23). Para mostrar o total diário de chuva foi utilizada uma faixa de 10 dias (Figura 24).

Para esse dia o METAR informou que as chuvas iniciaram as 21:00 HL do dia 30/04/2009, mas era ainda considerada chuva leve com trovoadas. Entre as 22 e 23:00 HL ainda permanecia a ocorrência de chuvas leves, mas os raios foram mais intensos (Figura 23). Depois de muita atividade elétrica, as chuvas mais fortes foram informadas pelo código METAR somente às 00:00 HL do dia 01/05 até as 05:00 HL, sendo que às 00:40 HL foi observado a informação de SPCI, considerada no METAR uma formação especial do tempo, ou seja, as chuvas para esse horário foram consideradas intensas.

Desde o dia 29/04/2009 foi presenciada intensa atividade elétrica atmosférica, contudo, foi no dia 01/05/2009 que as chuvas e raios chegaram em seus valores máximos elétrica (Figura 23).

Somente com as informações meteorológicas do METAR foi possível observar que os raios antecederam as chuvas mais fortes em até 2 horas de defasagem, e que os raios também antecederam as chuvas em até um dia.

Figura 23- Distribuição do número de raios com as informações do METAR em Santarém nos dias 30/04/2009 e 01/05/2009.

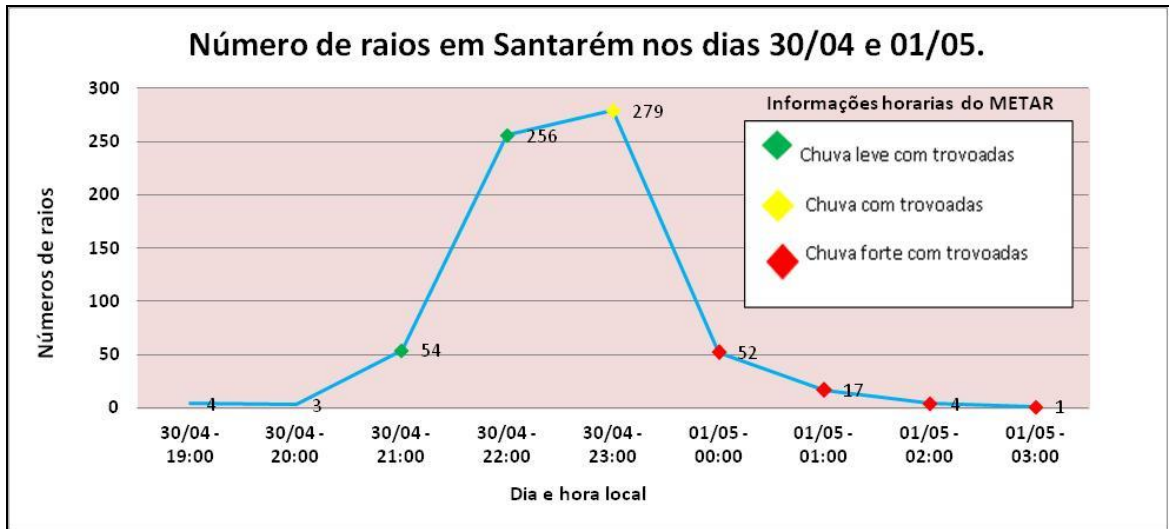


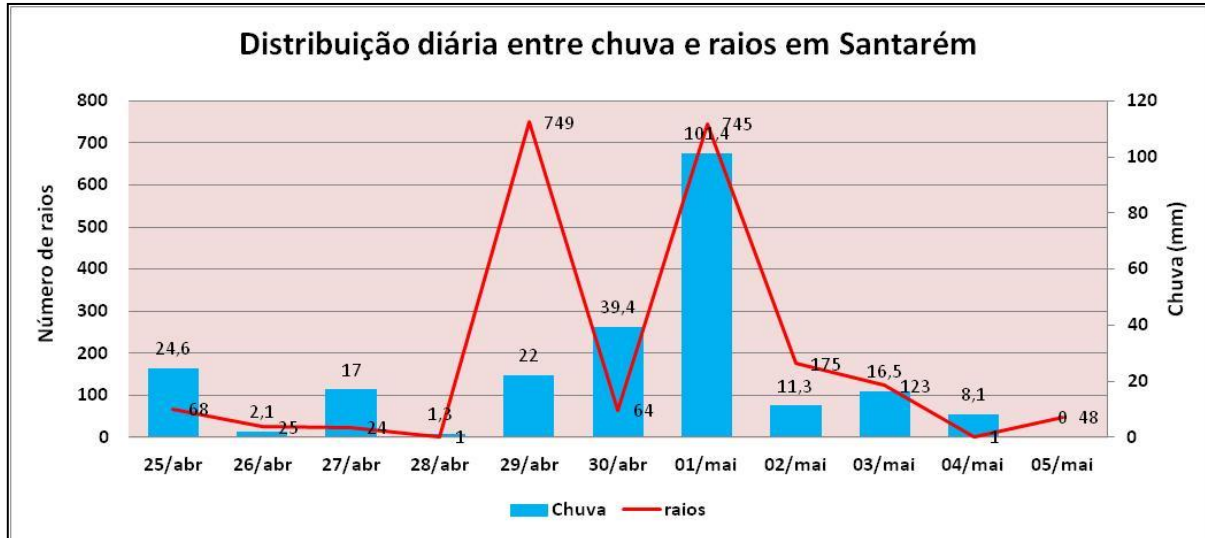
Figura 24- Informações meteorológicas do Código METAR em Santarém no dia 01/05/2009.

Data	Mensagem ( METAR_SPECI )
01/05/2009	SBSN 010000Z 00000KT 9999 FEW017 FEW020CB BKN100 25/25 Q1012=
01/05/2009	SBSN 010100Z 00000KT 9999 VCTS SCT017 FEW020CB BKN100 26/25 Q1012=
01/05/2009	SBSN 010200Z 00000KT 9999 TS SCT017 SCT020CB BKN100 25/24 Q1013=
01/05/2009	SBSN 010300Z 06010KT 6000 -TSRA SCT010 SCT015 SCT020CB 24/24 Q1014=
01/05/2009	SBSN 010340Z 12006KT 5000 TSRA SCT008 BKN013 FEW020CB OVC100 23/23 Q1013=
01/05/2009	SBSN 010400Z 20006KT 4000 TSRA SCT008 BKN013 FEW020CB OVC100 23/23 Q1013=
01/05/2009	SBSN 010500Z 20006KT 3000 TSRA SCT008 BKN013 FEW020CB OVC100 23/23 Q1012=
01/05/2009	SBSN 010600Z 18005KT 3000 TSRA SCT008 BKN013 FEW020CB OVC100 23/23 Q1012=
01/05/2009	SBSN 010700Z 20008KT 2000 TSRA BKN007 BKN013 FEW020CB OVC100 23/22 Q1012=
01/05/2009	SBSN 010800Z 20010KT 1600 R10/1000 +TSRA BKN007 BKN010 FEW020CB OVC100 22/22 Q1013=

Fonte Rede de Meteorologia do Comando a Aeronáutica.



Figura 25- Distribuição entre precipitação pluviométrica e número de raios em Santarém nos dias 25/04/2009 e 05/05/2009.



Os maiores números de raios ocorreram entre as 20 e 23:00 UTC e o início das chuvas ocorreu no dia 30/04/2009 durante a noite se estendendo até a madrugada do dia 01/05/ 2009 (Figura 25 a). Já as atividades elétricas atmosféricas se intensificaram entorno de 00:00 e 02:00 UTC, vindo de norte para nordeste ( Figura 25b). Isso ocorreu pela presença de um sistema que se aglomerou com a banda mais ao sul da ZCIT (Figura 26).

Figura 26- Distribuição temporal dos raios em Santarém: (A) dia 30/04/2009 e (B) dia 01/05/2009.

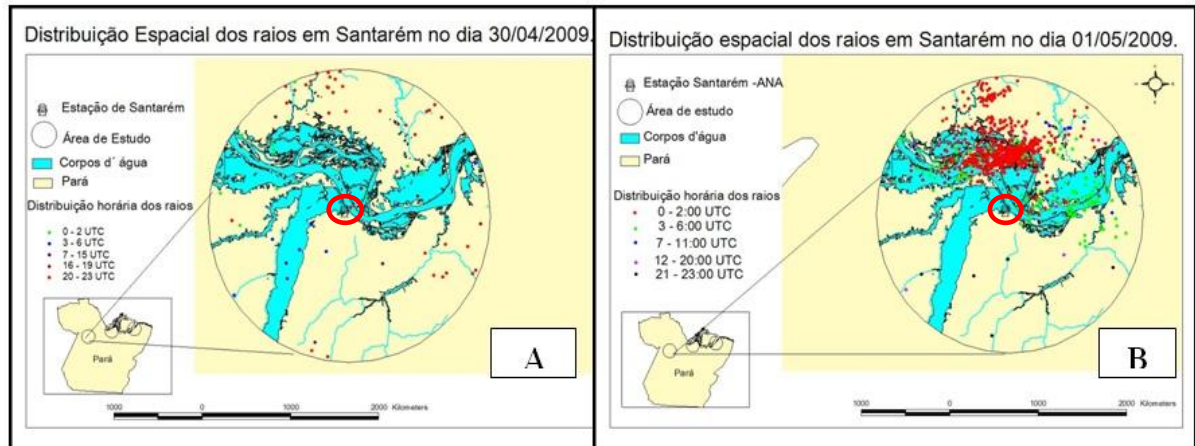
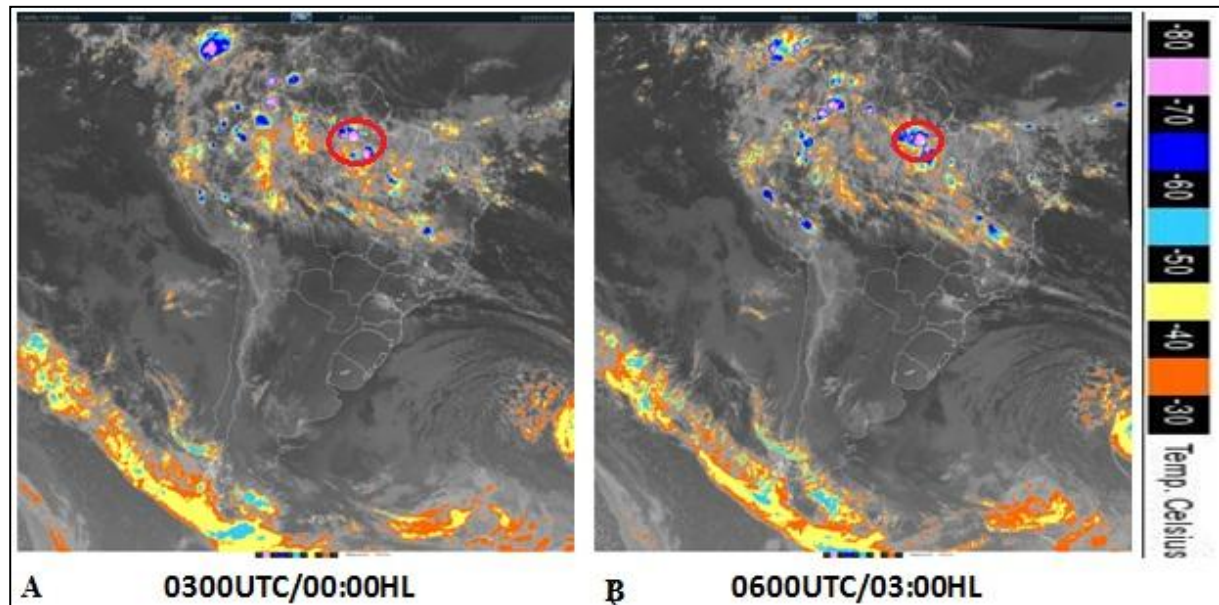


Figura 27- Imagens de satélite GOES 12 canal infravermelho (realçada) do dia 01/05/2009 (A) às 0300UTC; (B) às 0600UTC.



Fonte CPTEC (2009).

A figura 26 mostra as imagens de satélite do dia 01/05/2009 às 0300 UTC ou 00:00 HL e 0600 UTC ou 03:00 HL. Nela verificamos que a permanência da ZCIT juntamente com a atuação LI. Para esse dia a ZCIT favoreceu consideravelmente a produção de muitas chuvas e raios na cidade de Santarém, favorecendo a formação de nuvens de grande extensão vertical com topos mais frios. Nesse horário foi informado a ocorrência de muitas chuvas em Santarém. Depois da passagem desses sistemas a cidade de Santarém se encontrava com vários pontos de alagamento devido o transbordamento do rio Tapajós afetando a comunidade local (Anexo b).

Através das análises desses dois estudos de caso podemos observar que os sistemas meteorológicos que atuam na mesma faixa de latitude não seguem um padrão uniforme. Pois vimos que primeiramente a cidade de Belém é afetada pela ZCIT juntamente com outros sistemas locais, e só três dias depois os pulsos da ZCIT acoplado a outros sistemas de escala local afetaram Santarém, ou seja, esses sistemas se deslocam no sentido de leste para oeste.

E interessante observar que os horários de máximas ocorrências de raios e chuvas também são distintos nas duas cidades. Em Belém esses máximos ocorreram pelo período da tarde e em Santarém durante a madrugada. Esse resultado corrobora com os de Moura et al., (2004) e Fitzjarrald et al., (2008), que verificaram que as brisas fluviais do Amazonas e Tapajós diminuem a convecção nos canais no período da tarde, o que não ocorre em Belém onde a convecção diurna é mais representativa.

Nos dois estudos de caso vimos que os raios antecederam as chuvas em até 1 hora, os mesmos resultados foram encontrados por Ribeiro (2010) em 13 estudos de caso observando que os máximos valores de raios antecederam as chuvas com valores máximos. Almeida et al. (2007) realizou uma análise das características dos raios em cinco eventos de tempestades severas em Belém, com precipitações acima de 40 mm em menos de três horas, registradas por pluviômetro do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Através desse trabalho foi possível verificar que em todos os eventos analisados ocorreu um máximo da frequência de raios com antecedência de 20 a 70 minutos em relação ao máximo de precipitação.

Esses estudos mostram que pode ser possível criar alertas de tempestades severas através das ocorrências de raios, para se evitar perdas materiais como os desligamentos, transtornos para a sociedade (anexo b) e também perdas de vidas humanas e animais.

### **3 ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DAS OCORRÊNCIAS DE RAIOS EM DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O Brasil possui uma rede hidrográfica das mais extensas do globo, muitos de seus rios destacam-se pela profundidade, largura e extensão, o que constitui um importante recurso natural. As bacias brasileiras são divididas em dois tipos: Bacia de Planície, utilizada para navegação, e Bacia Planáltica, que permite aproveitamento hidrelétrico GEOBRASIL (2001). Para a região amazônica, em decorrência da natureza do relevo local, é observado o predomínio de rios de planalto.

A energia hidráulica é a fonte primária de geração de eletricidade no Brasil garantindo a produção de 91% da eletricidade consumida no Brasil, o equivalente a um valor aproximado de 10 bilhões de dólares/ano, se computado somente o aferido na etapa da geração de energia (Freitas, 2003). O potencial hidrelétrico brasileiro referente a janeiro de 1998 era de aproximadamente 260 GW, dos quais se encontram em operação apenas cerca de 20%, existindo, portanto um percentual de potencial hidrelétrico a ser aproveitado (ELETROBRÁS, 1999).

Entre as principais hidrelétricas destacam-se a usina de Tucuruí localizada no baixo Tocantins e as usinas Serra da Mesa, Cana Brava e Luis Eduardo Magalhães (Lajeado), localizadas no alto Tocantins. Somente a usina de Tucuruí é responsável pelo abastecimento de energia elétrica de 96% do estado do Pará e 9% do Maranhão (ISA 2010)

Segundo os estudos elaborados pela Eletronorte entre 1975 e 1980, a Bacia Hidrográfica do Xingu, que se estende por 450 km<sup>2</sup>, tem um potencial hidrelétrico de 22 mil megawatts, um dos maiores do país. A volta Grande do Xingu, uma queda de 96 metros, onde o rio quadriplica de largura e forma diversas cachoeiras e ilhas concentra boa parte do potencial hidrelétrico do rio, sendo por isso o local escolhido para a construção da Usina Hidrelétrica de Belo Monte.

Diversos trabalhos estudaram o comportamento extremo das chuvas nos trópicos e Subtrópicos sul-americanos (QUADRO, 1994; ROCHA, 2001; SOUZA et al., 2005), contudo uma análise desta variável associada à variabilidade hidrológica em bacias hidrográficas é

fundamental como um suporte aos modelos hidrológicos que utilizam a precipitação como uma variável de entrada, ou assim como aos centros de previsões de níveis e vazões que baseiam-se nesta variável para uma correção subjetiva aos modelos utilizados.

Problemas com cheias e estiagens na Amazônia são de ocorrência anual. Cidades como Rio Branco, Porto Velho, Manaus, Óbidos, Santarém, Altamira, Marabá, entre outras, historicamente são impactadas pelo aumento do nível dos rios de suas respectivas bacias.

Os períodos de cheias e de estiagem influenciam diretamente em áreas onde estão localizadas áreas de UHT, dar continuidade aos estudos nessas regiões é considerado de grande importância contribuindo pra comunidade científica bem como para meio social e econômico.

Atualmente em estudos relacionados a bacias hidrográficas utilizando modelos hidrológicos têm levado em consideração apenas a entrada de dados de precipitação. Porém recentes estudos como o de Almeida et al. (2007) que verificou a importância do monitoramento da frequência de ocorrência dos raios, como suporte para alertar em tempo real acontecimentos de tempestades severas. E o de Ribeiro et al. (2008), que analisou a relação entre raios e precipitação pluviométrica, mostrando que a frequência de ocorrência horária dos raios apresentam seus máximos valores sempre antecedendo os máximos de precipitação dão um indicativo de que os estudos de ocorrência de raios em áreas de bacias pode ser uma importante ferramenta a ser introduzida em modelos hidrológicos.

Nesse capítulo vamos apresentar um trabalho pioneiro para tentar estimar a precipitação pluviométrica através das ocorrências de raios, e assim subsidiar modelos de estimativa de precipitação e possíveis aplicações em modelagem hidrológica de bacias hidrográficas.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO TOCANTINS E BACIA DO XINGU.

### 3.2.1 **Bacia do Tocantins**

A bacia hidrográfica Araguaia-Tocantins é uma das doze regiões hidrográficas do Brasil, quase inteiramente localizada entre os paralelos 2°S e 18°S e os meridianos 46°W e 56°W. Os principais rios da bacia são o Tocantins e o Araguaia. A bacia se estende pelos

estados de Tocantins e Goiás (58%), Mato Grosso (24%), Pará (13%), Maranhão (4%), além do Distrito Federal (1%).

É a maior bacia hidrográfica totalmente brasileira. Sua extensão é de aproximadamente 2.500 km, desde a sua origem, na confluência do rio Maranhão com o rio das Almas (Goiás), até a foz, na baía de Marajó (Pará). Tem uma configuração alongada no sentido longitudinal, que segue os dois eixos fluviais - o Tocantins e o Araguaia - que se unem no extremo norte da bacia hidrográfica.

A bacia do Tocantins-Araguaia é a segunda em produção de energia do Brasil. A descarga média da bacia hidrográfica, em Tucuruí (Figura 27) é estimada em 12.000 m<sup>3</sup>/s, sendo a contribuição dos rios Araguaia e Tocantins similar, e a do rio Itacaiúnas, bastante inferior (600m<sup>3</sup>/s) (ELETROBRÁS, 1999).

Figura 28- Usina Hidrelétrica de Tucuruí Barragem no Tocantins.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 2010 .

### 3.2.2 **Bacia do Xingu**

Dos afluentes da Bacia Amazônica, que é a maior bacia hidrográfica do mundo, com uma drenagem de 5,8 milhões de km<sup>2</sup>, sendo 3,9 milhões no Brasil, destaca-se a Hidrográfica do Xingu (BHX).

A BHX desenvolve-se entre os paralelos 01°23'24" e 09°48'05" de latitude sul e entre os meridianos 50°19'44" e 55°15'06" de longitude oeste. Abrange uma área de 531.250 km<sup>2</sup>, sendo que 216.823 km<sup>2</sup> (40,8%) pertencem ao estado do Mato Grosso e os restantes 59,2% ao estado do Pará, onde ocupa uma área de aproximadamente 314.427 km<sup>2</sup> que corresponde a 25,1% do estado. Territorialmente engloba os municípios de Altamira, São Félix do Xingu, Senador José Porfírio, Vitória do Xingu, Brasil Novo, parte de Medicilândia, Placas e a parte oeste do município de Anapú. Os principais cursos d'água formadores dessa bacia, no Pará são os rios: Xingu, Iriri, Curua, Fresco, Bacajá, Caeté, Ximxim e Chiche (ISA, 2011).

A Usina Belo Monte terá uma barragem principal no Rio Xingu, localizada 40 km abaixo da cidade de Altamira, no Sítio Pimentel. Será a partir deste reservatório que a água vai se dividir por canais que irão compor o reservatório, localizado a 50 km de Altamira (Figura 28).

Figura 29- Área de Belo Monte onde será construída a Hidrelétrica.



Fonte: Eletrobrás (1999).

### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.3.1 Área de estudo

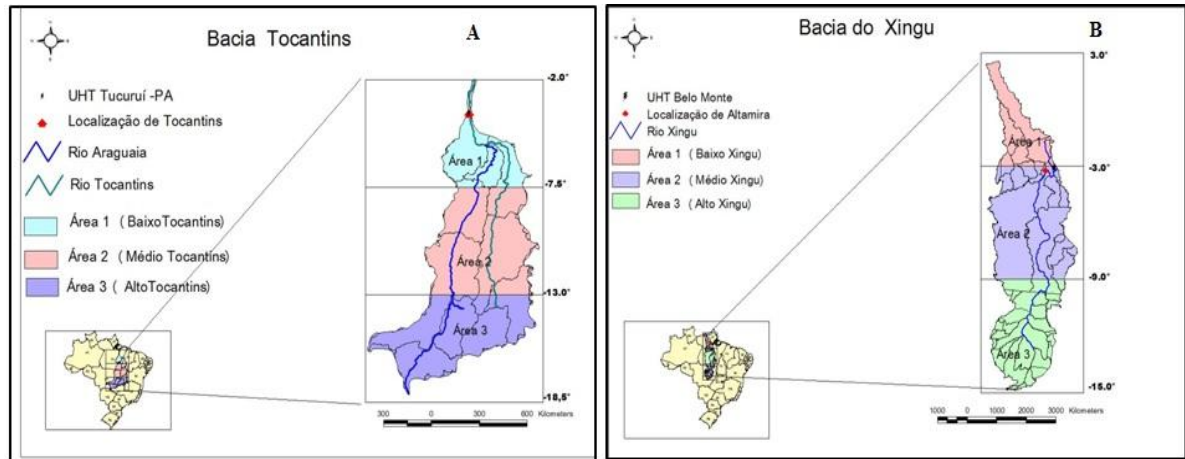
Para as áreas das bacias os procedimentos foram semelhantes a do primeiro estudo, depois de escolhidas as bacias a serem estudadas (Tocantins e Xingu) primeiramente foi inserido Shapes das bacias no Arc View. Para realizar os recortes dentro de cada bacia, foi preciso delimitar as áreas que seria estudadas, esse procedimento foi feito na opção Graphic Grid Maker que é uma extensão que permite delimitar latitudes e longitudes, que foi possível criar quadrados com a mesma distância e assim obtendo-se as áreas dentro das bacias que foram subdivididas em área 1, 2, e 3 como mostra a figura 30.

Cada bacia tinha suas próprias delimitações, em Tocantins foi criado retângulos de  $-2^{\circ}$  a  $-18^{\circ}$  de latitude e  $-45,5^{\circ}$  a  $-55,5^{\circ}$  de longitude. É as sub-áreas, que dentro desse limite ficou definida como sendo a área 1 ( $2^{\circ}\text{S}$  a  $7,5^{\circ}\text{S}$ ), área 2 ( $7,5^{\circ}\text{S}$  a  $13^{\circ}\text{S}$ ) e área 3 ( $13^{\circ}\text{S}$ ,  $18,5^{\circ}\text{S}$ ) (Figura 30 b).

Dentro da bacia do Xingu O mesmo procedimento foi realizado, sendo que seu quadrilátero ficou entre  $3^{\circ}$  e  $-15^{\circ}$  de latitude e de  $-50^{\circ}$  a  $-56^{\circ}$  de longitude. Assim como na primeira bacia teve a área subdividida em área 1 ( $3^{\circ}\text{N}$  a  $3^{\circ}\text{S}$ ), área 2 ( $3^{\circ}\text{S}$  a  $9^{\circ}\text{S}$ ) e área 3 ( $9^{\circ}\text{S}$  a  $15^{\circ}\text{S}$ ) (Figura 30 a).

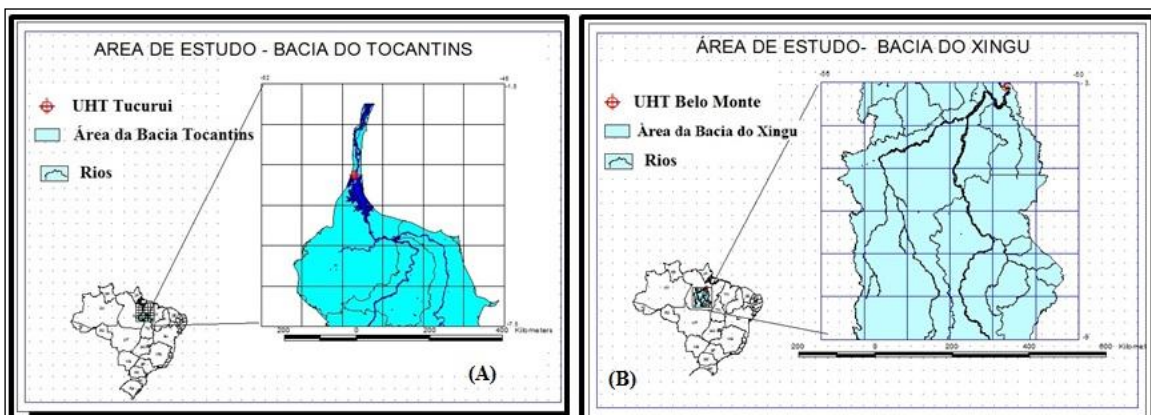


Figura 30- Bacia do Tocantins com as sub-áreas (A); Bacia do Xingu com as sub-áreas (B)



Em função de análises preliminares foram estabelecido que fosse levado em conta apenas as áreas à montante mais próxima das barragens de Tucuruí, no Tocantins, e onde esta sendo construída a barragem de Belo Monte no Xingu. Ou seja, as áreas 1 do Tocantins e a área 2 do Xingu (Figura 31). A escolha destas áreas se deu pelo fato de ser um estudo inédito que tentará prever chuva e enchentes através das informações dos raios.

Figura 31- Localização da área de estudo. (A) Bacia do Tocantins; (B) Bacia do Xingu.



### 3.3.2 Base de dados

Foram utilizados os mesmos bancos de dados de raios da STARNET no período de set/2008 a set /2010. Para as informações precipitação pluviométrica permaneceram as estações meteorológicas: Instituto Nacional de Meteorologia – (INMET), Agência Nacional de Águas (ANA) e foram incluídas as estações das Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte), e as estações da Rede Estadual de Previsão Climática Hidrometeorológica do Pará (RPCH) localizadas dentro da área de estudo porém saíram as estações de Caxiuanã.

Os dados de cota altimétrica das bacias foram obtidos pelas estações fluviométricas do banco de dados Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA).

Na bacia do Tocantins foi escolhida a cota de Tucuruí, localizada a 3,7578 S de latitude e 49,6533 W de longitude. Para a bacia do Xingu a cota escolhida foi a da barragem de Belo Monte localizada 3,1253 S de latitude e 51,7014 W de longitude.

### 3.3.3 Tratamento dos dados

#### 3.3.3.1 Dados de raios.

A manipulação dos dados de raios seguiu os primeiros passos do capítulo anterior, porém a área de estudo e outra com isso para quantificar o número de raios dentro das áreas das bacias foi necessário primeiramente usar a ferramenta *View – Geoprocessing–Clip*, realizar a delimitação e visualização dos raios somente dentro da área de estudo das bacias, na ferramenta Open theme table era possível obter a quantidade do número de raios identificados.

Após esse procedimento as informações dos dados de raios quantificados, os dados passavam a serem manipulados em planilhas do EXCEL, sendo possível obter as médias mensais, e organizar os dados de raios em períodos quinzenais.

#### 3.3.3.2 Dados de precipitação.

Cada bacia estudada continha um determinado número de estações meteorológicas dependendo da sua disponibilidade. Para a área estudada dentro da bacia do Tocantins foi

utilizado um total de dez estações e para a área da bacia do Xingu foram sete estações ( Tabelas 2 e 3). Com os dados de chuva obtidos, esses foram manipulados em planilhas do EXCEL aonde se calculava as médias mensais, separando os períodos secos do chuvoso, e também assim como os raios, as chuvas foram organizadas em quinzenas.

Tabela 2: Relação das estações meteorológicas e médias mensais de precipitação na bacia do Tocantins.

<b>Estações pluviométricas (Área 1) - Tocantins</b>	<b>jan</b>	<b>fev</b>	<b>mar</b>	<b>abr</b>	<b>mai</b>	<b>jun</b>	<b>jul</b>	<b>ago</b>	<b>set</b>	<b>out</b>	<b>nov</b>	<b>dez</b>	<b>Média anual</b>
<b>Ananás</b>	232,9	306,2	239,8	226,7	93,5	10,8	0,0	19,5	18,5	61,2	103,7	183,9	124,7
<b>Araguatins</b>	218,7	304,0	258,5	236,3	135,2	17,4	5,5	0,8	12,0	60,5	130,5	175,9	129,6
<b>Boa Vista do Araguaia</b>	167,5	313,3	228,9	229,9	96,2	11,2	1,6	5,2	36,5	128,4	114,5	170,7	125,3
<b>Eldorado</b>	344,7	409,9	314,6	452,6	241,4	19,0	11,8	22,0	39,0	114,7	131,8	188,4	190,8
<b>Fazenda Sta. Elisa</b>	211,6	195,2	176,2	207,9	191,8	20,8	5,4	11,2	23,5	84,3	53,3	163,2	112,0
<b>Fazenda Surubim</b>	176,8	365,4	254,4	332,2	159,0	21,9	10,1	9,2	34,9	121,1	74,6	247,4	150,6
<b>Km 60</b>	329,0	386,4	377,1	345,4	210,1	21,1	11,1	17,3	41,9	144,6	70,0	243,0	183,1
<b>Murilândia</b>	243,1	394,2	284,6	322,0	121,3	22,5	0,1	11,7	22,0	164,3	226,7	298,0	175,9
<b>Piraque</b>	203,8	298,9	366,0	315,0	141,2	16,2	10,5	17,3	11,6	132,2	119,5	205,0	153,1
<b>Tucuruí</b>	388,7	317,7	466,2	485,8	292,3	96,7	26,6	52,8	12,8	72,0	88,7	285,2	215,4
<b>Media mensal</b>	251,7	329,1	296,6	315,4	168,2	25,8	8,3	16,7	25,3	108,3	111,3	216,0	

Tabela 3: Relação das estações meteorológicas e médias mensais de precipitação na bacia do Xingu.

Estações pluviométricas (Área 2) - Xingu	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média anual
Altamira	308,5	285,5	306,7	449,6	428,7	245,5	58,5	4,8	24,15	80,15	38,25	278,2	209
Boa Vista (Paraná do Rio Amazonas)	140,9	207,3	250,2	311,8	245,2	150,6	97,2	51,4	14,8	49,5	46,8	115,5	140
Brasil Novo	303,4	376,9	428,8	433,9	474,9	173,5	91,2	50,4	28,3	121,8	91,7	331,3	242
Cajueiro	132,1	209,2	194,0	159,7	43,8	51,2	35,9	39,3	54,5	145,3	156,4	141,6	114
Monte Alegre do Xingu	103,9	294,2	202,4	338,5	101,8	91,9	18,1	52,5	23,9	32,0	37,4	165,2	122
Sítio São Pedro	215,1	204,9	298,6	354,6	201,2	81,2	27,4	23,2	74,0	88,4	149,4	225,7	162
Uruara	188,6	271,3	280,9	321,7	205,4	99,4	43,1	41,3	45,2	96,9	108,7	215,9	160
Média Mensal	198,9	264,2	280,2	338,5	243,0	127,6	53,0	37,5	37,9	87,7	89,8	210,5	

### 3.3.3.3 Dados de cota.

Como os dados de cota do rio primeiramente eram fornecidos em unidade de centímetro (cm) os dados foram transformados para unidade de metro(m), é foram trabalhados em planilhas do EXCEL sendo organizados em períodos diários. Devido somente ter uma cota de rio em cada bacia não foi calculada a média.

### 3.3.4 Construções dos Gráficos

Depois do tratamento dos dados de precipitação, raios e cotas, com esses dados foi construído gráficos de barra, linha e de regressão, porém os resultados para os gráficos de dispersão o  $R^2$  não apresentou resultados satisfatórios, por isso ainda foi necessário realizar outros procedimentos nos dados.

Primeiramente foi trabalhado os dados de raios e chuva que já se encontravam em períodos quinzenais, foi feito um filtro de médias móveis a partir do terceiro dia em cada variável, depois de passado os filtros, foi preciso realizar ajustes temporais no raio em relação à chuva.

Para realizar os ajustes era necessário fazer um deslocamento do máximo valor do raio com o máximo valor da chuva, com isso obtínhamos um valor de  $\Delta t$ , os ajustes temporais entre raio e chuva obteve aproximadamente um valor de  $\Delta t$  de 15 dias a 2 meses ou seja os máximos valores do raio foram ajustados temporalmente com 15 dias a 2 meses de antecipação com os máximos valores da chuva.

Para os dados de cota do rio e de raios também se precisou fazer o mesmo procedimento, porém o filtro de médias móveis se deu a partir do sétimo dia nas duas variáveis, e o ajuste temporal entre o máximo valor da cota com o máximo valor do raio obteve um  $\Delta t$  de 5 a 10 dias aproximadamente. A mesma metodologia foi adotada pro Santos (2010). Após os procedimentos supracitados foram confeccionados os gráficos de regressão.

#### 3.3.4.1 Gráficos de regressão e linhas de tendência

Para a construção dos gráficos de regressão entre raios e chuva foram utilizados todo o período de estudo dentro do EXCEL, e foram gerados quatro tipos de linhas de tendência (linear, polinomial, potencial e exponencial) para verificar qual a melhor curva se ajustava os dados.

A escolha das linhas de tendência seguiu um critério do valor de  $R^2$  (coeficiente de determinação), e da curva da linha de tendência observando as características de cada linha.

### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.4.1 Média mensal da precipitação e número total de raios detectados.

O mês de abril apresentou o maior índice pluviométrico nas duas áreas em estudo com 315 mm/mês no rio Tocantins e 339 mm/mês no rio Xingu. A área do rio Tocantins apresentou os menores volumes de chuva e estes foram observados para os meses de julho e agosto com 8 e 17 mm/mês respectivamente (Figura 32).

Através da figura podemos perceber a sazonalidade da precipitação ao longo do ano nas duas áreas, o que é uma resposta da atuação dos sistemas meteorológicos causadores de chuvas nas regiões de estudo.

Para a distribuição média mensal de raios foi encontrado um total de 3.423.462 de raios detectados de pela rede STARNET no período de estudo. Nas regiões estudadas essa

média foi de 1.165.741 para a bacia do Tocantins e 2.257.721 para a bacia do Xingu. São os meses com maiores índices de raios em Belo Monte (Xingu) setembro e novembro já para Tucuruí foi o mês de setembro que se destacou como o máximo de ocorrências de raios, o menor valor de ocorrência de raios em agosto nas duas áreas.

Figura 32-: Média mensal da precipitação pluviométrica na bacia do Tocantins e na bacia do Xingu no período de set/2008 a set/2010.

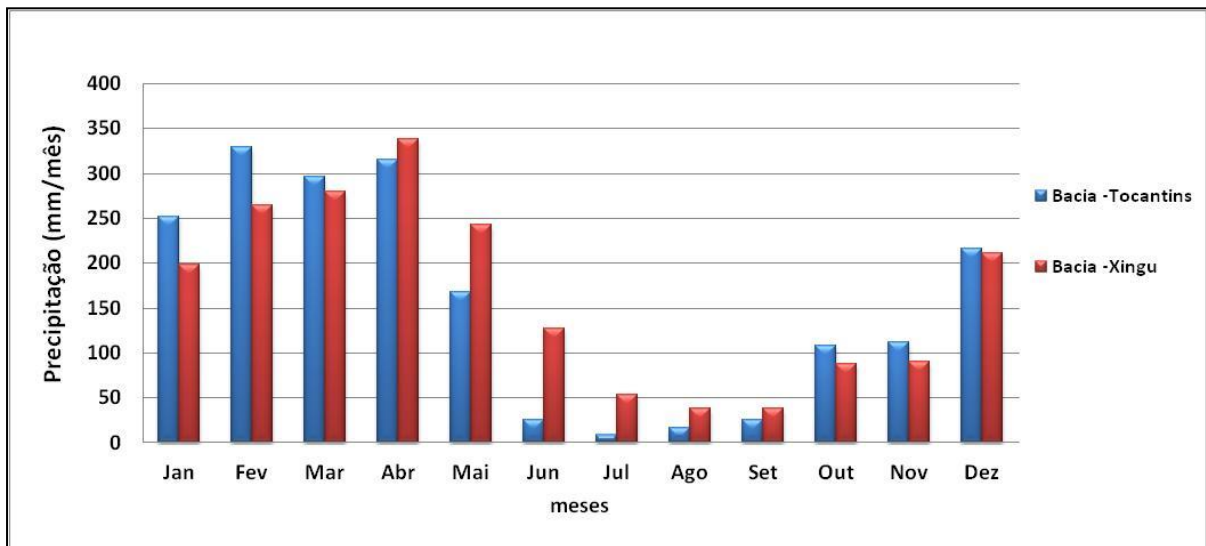
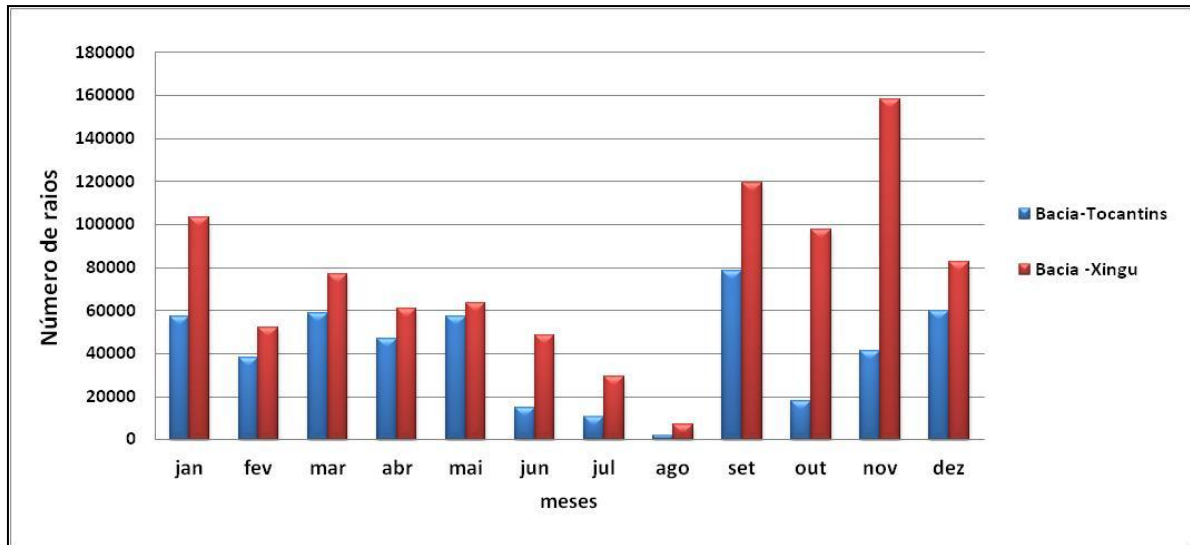


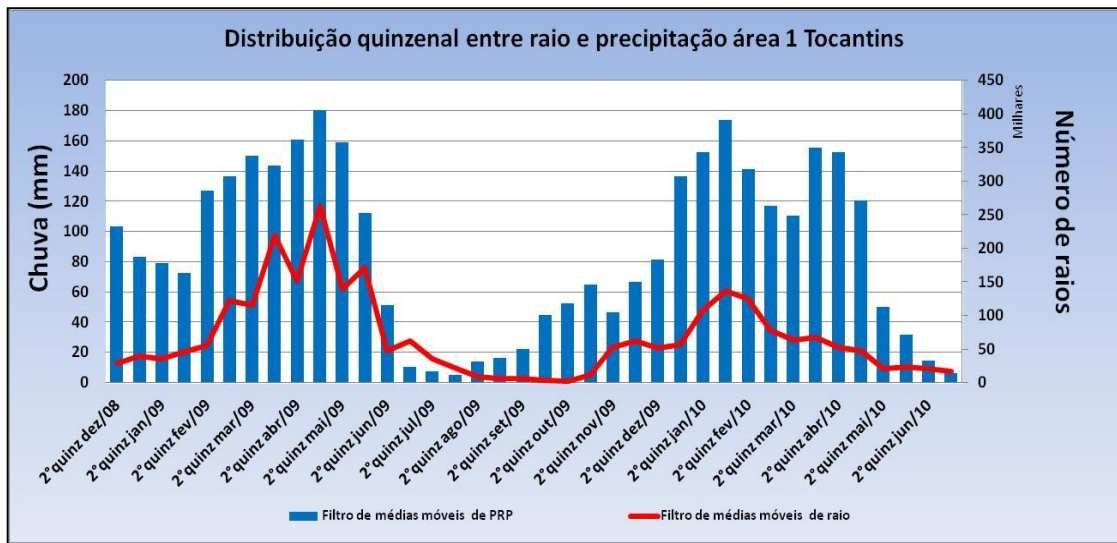
Figura 33- Media mensal de raios detectados na bacia do Tocantins e a bacia do Xingu, no período de set/2008 a set/2010.



#### 3.4.2 Relação entre raios e chuvas nas áreas das bacias

Os meses de fevereiro a maio de 2009 mostraram que os eventos de raios acompanharam os de chuva, tendo um número significativo de raios. Neste período foi observada a posição mais ao sul da ZCIT bem como a sua permanência nesta posição acompanhada de processos termodinâmicos o que resultou em muitas chuvas acompanhadas de raios (BOLETIM CLIMANALISE maio/2009). As chuvas e os raios permaneceram com esse comportamento também no período mais seco. Mas no ano de 2010 houve uma queda na curva de descargas atmosféricas, porém ainda assim as chuvas e os raios estiveram associados (Figura 35). A queda na quantidade de raios pode ser atribuída a falhas na detecção destes, pela rede STARNET, que apontou uma queda significativa de raios no ano de 2010.

Figura 34- Distribuição do filtro de media móvel quinzenal entre raio e chuva na área 1- bacia do Tocantins.

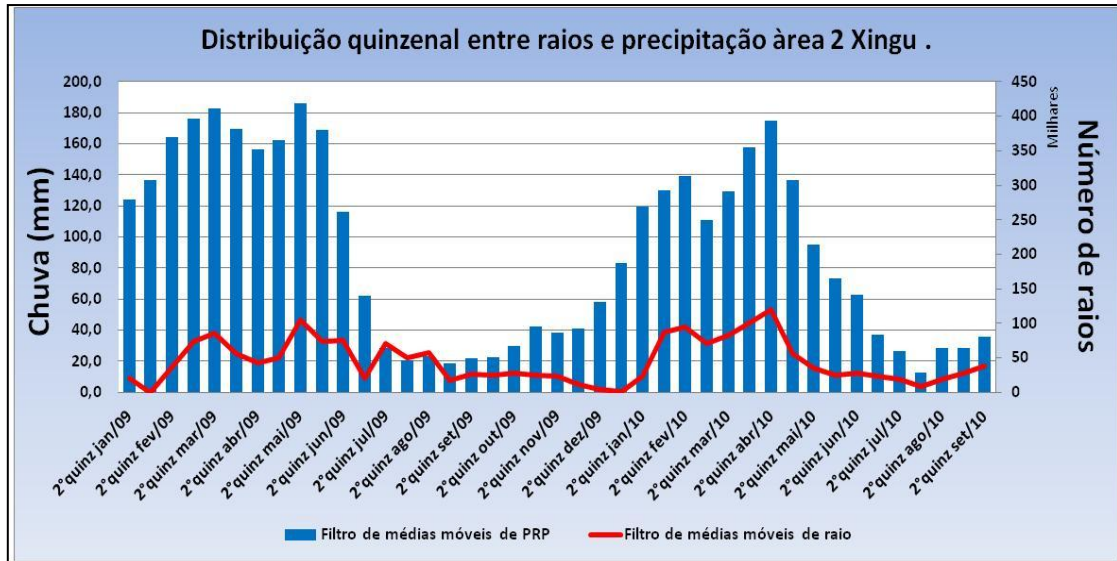


Na bacia do Xingu, onde situa-se Belo Monte, os altos valores de precipitação pluviométrica foram entre a primeira quinzena de fevereiro a segunda quinzena de junho de 2009. Onde os valores de chuvas são superiores a 160 mm, contudo, a quantidade de raios não foi totalmente proporcional para esse período. Os máximos de raios e chuvas só foram observados nos meses de março e maio de 2009. Na transição do período chuvoso pra o seco, chuva e raio apresentaram um comportamento inverso onde os eventos de descargas atmosféricas foram maiores que as chuvas. Em 2010 houve um aumento do número de raios, mas as duas variáveis se comportaram de forma direita, decaimento de raios e chuvas foi proporcional (Figura 36).

A Região Amazônica, durante o verão austral (DJF) possui uma marcha anual de precipitação bem definida e influenciada principalmente pelo deslocamento norte-sul da Zona de Convergência Inter Tropical - ZCIT, que representa o início da estação chuvosa (RAO E HADA, 1990). Entretanto, outros sistemas parecem ser mais determinantes como: os sistemas frontais, os complexos convectivos de mesoescala e o aparecimento das ZCAS influenciando em altos índices pluviométricos e quantidade de raios da região.



Figura 35- Distribuição do filtro de media móvel quinzenal entre raio e chuva na área 2 da bacia do Xingu.

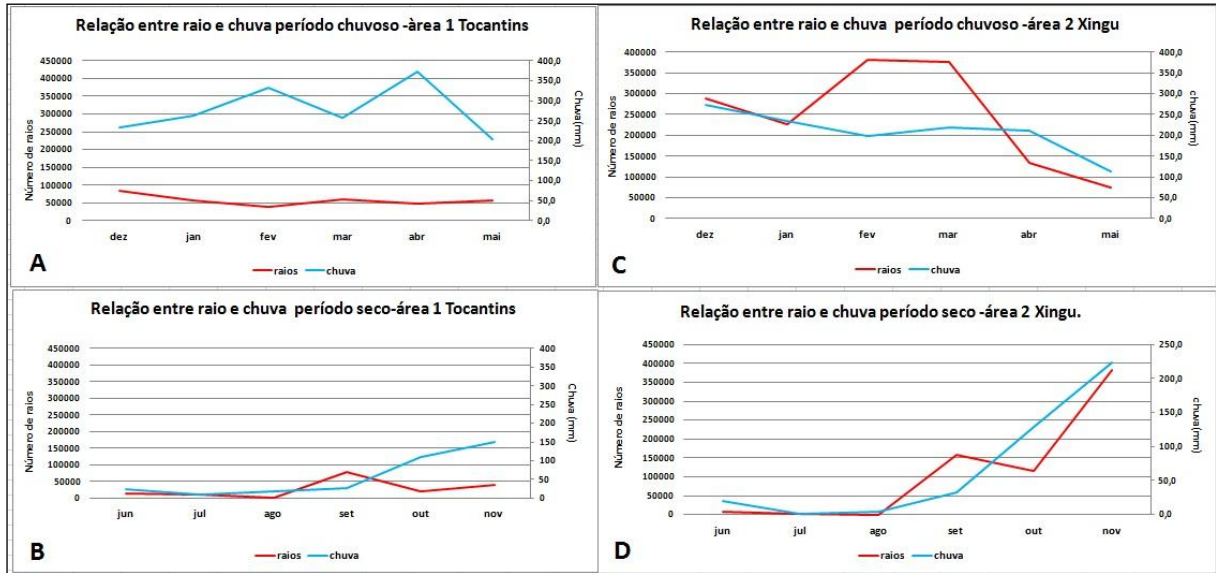


### 3.4.3 Distribuição trimestral entre raios e chuva nos períodos secos e chuvosos

A relação entre raios e chuva não é simples nem direta. Parece haver melhor correspondência nos períodos secos (Figuras 35 b, d). Interessante observar que as curvas de raios e chuvas seguem uma mesma tendência durante o período seco nas duas áreas, raios e chuva diminuem na mesma frequência, enquanto que no período chuvoso não se observa essa tendência.

As ocorrências de raios chegam ao máximo em dezembro, enquanto que o máximo de precipitação ocorre em março, havendo uma relação inversa entre raios e chuvas no período de dezembro a fevereiro (Figura 37 a, c). Os resultados encontrados nesse estudo corroboram com os resultados encontrados por Ribeiro (2010). Outro resultado interessante é o fato de que a quantidade de raios em Tucuruí foi muito menor do que em Belo Monte (Xingu).

Figura 36- Distribuição mensal do filtro de medias móvel entre raio e chuva durante período chuvoso e durante período seco- área 1 Bacia do Tocantins (A e B); área 2 Bacia do Xingu (C e D) durante o período set/2008 a set/2010.



### 3.4.4 Regressão entre raio e chuva.

Os estudos se restringiram somente as áreas 1 da barragem do Tocantins e a área 2 do Xingu, mas para efeito comparativo entre cada uma das áreas ilustramos os resultados obtidos para todas as áreas das bacias (Tabela 4).

Como dito anteriormente, as análises de regressão em um primeiro estudo sem ajuste não foram satisfatório, mas na tabela 4 visualizaremos as diferenças de valores entre os dados não ajustados e os ajustes.

As áreas 1 e 2 do Xingu são as que apresentam baixo coeficiente de determinação com  $R^2 = 0,0921$  o que corresponde a 9% na área 1, e  $R^2 = 0,0261$  o que representa 2% na área 2. Esses resultados foram obtidos a partir de regressões seguindo uma linha de tendência exponencial e potencial. Somente a área 3 da bacia do Xingu teve um bom coeficiente de determinação com um  $R^2 = 0,5289$  com quase 53% para uma linha de tendência linear. A bacia do Tocantins nas áreas 1, 2 e 3 apresentaram os seguintes valores  $R^2 = 0,3924$ ;  $R^2 =$

0,3216 e  $R^2 = 0,3744$ , respectivamente, para suas linhas de tendências potencial, exponencial e linear.

Tabela 4: Correlação entre precipitação e descargas atmosféricas dado não ajustados no período set/2008 a set/2010 – Bacia do Tocantins e na bacia do Xingu nas áreas 1,2e3 respectivamente.

<b>Resultados das regressões entre número de raios e precipitação dados não ajustados</b>					
		<b>Bacia Tocantins</b>		<b>Bacia do Xingu</b>	
<b>Áreas</b>	<b>Função</b>		<b>R<sup>2</sup></b>		<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Área 1</b>	Exponencial	$Y=2042e^{0,0064X}$	<b>0,390</b>	$Y=824,07e^{0,376x}$	<b>0,09</b>
<b>Área 2</b>	Potencial	$Y=1000,7X^{0,7585}$	<b>0,321</b>	$Y=13910X^{0,1937}$	<b>0,02</b>
<b>Área 3</b>	Linear	$Y=716,19X+3843,7$	<b>0,370</b>	$Y= 375,64X+6667$	<b>0,52</b>

Após os ajustes dos dados, os valores das regressões foram melhorados como podemos observar na Tabela 5 abaixo. Com isso os valores dos coeficientes de determinação mostraram melhores resultados para ambas as bacias (Tocantins e Xingu).

A tabela 5 mostra para cada área das duas bacias suas respectivas equações e seus coeficientes de regressões. Foi feito em cada área de estudo quatro tipos de linhas de tendência (linear, potencial, polinomial e exponencial) para visualizar e posteriormente escolher qual a melhor a se utilizar.

Tabela 5: Regressão entre precipitação e descargas atmosféricas para Bacia do Tocantins e bacia do Xingu - áreas 1, 2 e 3, respectivamente. Dados ajustados no período set/2008 a set/2010.

Resultados das regressões entre número de raios e precipitação dados ajustados					
Áreas	Bacia Tocantins			Bacia do Xingu	
	Função	R <sup>2</sup>	Função	R <sup>2</sup>	
Área 1	Linear	<b>Y= 807,32 X -3502,3</b>	<b>0,547</b>	Y=54,47X+571,95	0,318
	Potencial	Y=2909,3 X <sup>0,6478</sup>	0,340	Y=8653 X <sup>0,8782</sup>	0,326
	Polinomial	Y=7,1515 X <sup>2</sup> - 442,31+29063	0,626	Y=-0,1256X <sup>2</sup> +78,64X-2355	0,414
	Exponencial	y= 1142 e <sup>0,0147x</sup>	0,528	Y=1191,6 e <sup>0,01262</sup>	0,432
Área 2	Linear	y=951,72X+34521	0,212	<b>Y=359,98X+14523</b>	<b>0,491</b>
	Potencial	Y= 1023,1 X <sup>0,9799</sup>	0,580	Y=3799,5 X <sup>0,5205</sup>	0,183
	Polinomial	14,097X <sup>2</sup> +3014,4-16190	0,333	Y=2,4818X <sup>2</sup> -119,96+28741	0,524
	Exponencial	8283 e <sup>0,0218x</sup>	0,484	Y=16103 e <sup>0,0084</sup>	0,251
Área 3	Linear	921,83X+2458	0,514	Y=369,4X+07419,8	0,531
	Potencial	2818 X <sup>0,6657</sup>	0,522	Y=1066 X <sup>0,7843</sup>	0,597
	Polinomial	15,097X <sup>2</sup> +2013,3X-17190	0,353	Y= -2,6202X <sup>2</sup> +785,05X-33081	0,531
	Exponencial	8283 e <sup>0,0523x</sup>	0,452	3548,9 e <sup>0,0208</sup>	0,515

Para a bacia do Tocantins foi escolhida na área 1 a linha de tendência linear que teve um  $R^2 = 0,54$  o que corresponde a 54% de correlação entre as variáveis destacado na tabela 5 em amarelo. A preferência por essa linha foi devido ser uma reta de melhor ajuste usada com conjuntos de dados lineares simples, que mostra se os dados de raios e chuva estão aumentando ou diminuindo a uma taxa fixa, ou seja, os dados de chuva e de raios se enquadram nesse padrão de linha de tendência. A linha de tendência polinomial também apresentou uma correlação satisfatória, porém não viável de ser utilizada por ser sempre bicôncava entre as variáveis. Esse tipo de curva pode resultar em dois valores de uma variável por um único ponto. Já a potencial não foi escolhida porque esse tipo de curva é aconselhável para se realizar comparações entre as variáveis e a exponencial mostra aumentos ou quedas bruscas entre as variáveis. Foram também descartados coeficientes com baixos valores por não representar boas correlações.

Na bacia do Xingu para a área 2, a opção permaneceu pela linha de tendência linear, pelos os mesmos motivos explicitados anteriormente destacado em amarelo na Tabela 5. Para o Xingu o coeficiente de correlação foi de  $R^2 = 0,49$  o que corresponde a aproximadamente 50 % de correlação. Um fator que pode ter influenciado nos resultados pode ser o número de estações pluviométricas e a melhor qualidade dos dados na bacia do Tocantins. Embora para o

Xingu o número de estações tenha sido aproximadamente o mesmo, neste caso a qualidade dos dados foi baixa com falha nas informações de chuva.

Foi observado pelas regressões períodos que a quantidade de precipitação não correspondia com o número de raios, ou seja, em períodos que a chuva era considerada intensa não foi observado um aumento na quantidade de descargas atmosféricas, o mesmo valia para a situação contrária tornando o trabalho mais complexo.

A tabela 6 mostra somente o resultado das regressões que foram feitas somente nas áreas de estudo das duas bacias, sendo levada em consideração a dispersão dos dados de raios para estimar chuva.

Tabela 6-Regressão entre precipitação e raios para Bacia do Tocantins e bacia do Xingu . Dados ajustados no período set/2008 a set/2010.

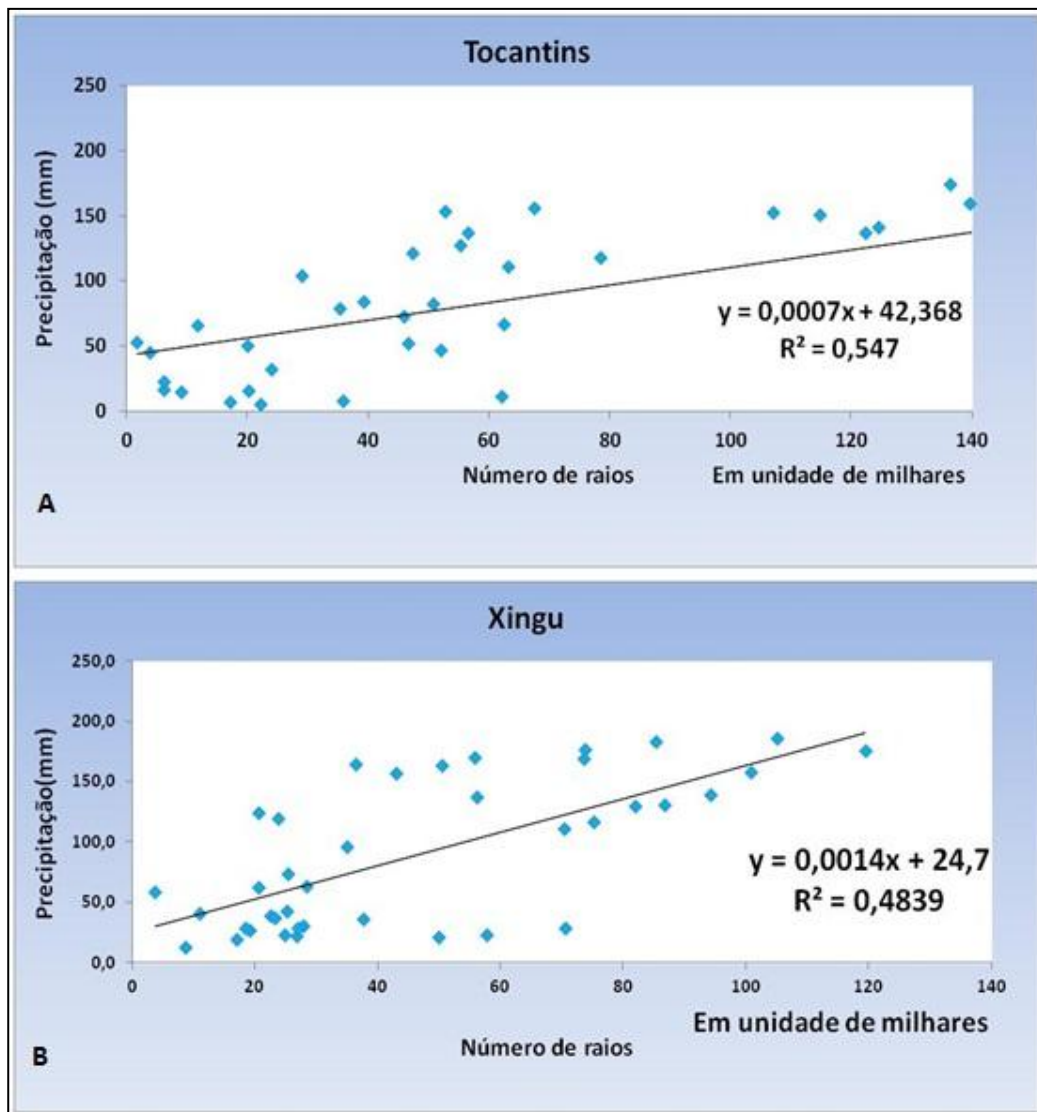
<b>Resultados das regressões entre número de raios e precipitação dados ajustados</b>					
<b>Bacia Tocantins - Tucuruí</b>			<b>Bacia do Xingu - Belo Monte</b>		
<b>Função</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Função</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Linear	<b>Y= 0,0007X+42,36</b>	<b>0,547</b>	Linear	<b>Y=359,98X+14523</b>	<b>0,483</b>
Potencial	Y=0,2109X <sup>0,5333</sup>	0,340	Potencial	Y=49,008X <sup>0,0353</sup>	0,183
Polinomial	Y=4E-09X <sup>2</sup> +0,0015X+18,173	0,626	Polinomial	Y=3E-0,8X <sup>2</sup> +0,0023X+123,08	0,514
Exponencial	y= 31,44e <sup>0,0105x</sup>	0,528	Exponencial	Y=37,417e <sup>0,5102</sup>	0,251

A regressão normalmente é feita com dado normalizada em um intervalo de tempo. Entre tanto se considerarmos nas figuras os raios em unidades de milhares e a precipitação em milímetros os dois eixos dos gráficos gerados conterão números de grandeza semelhantes por tanto a visualização da dispersão dos pontos em torno da curva de ajuste entre as variáveis, será satisfatória. Por isso se manteve os valores reais, o que permite a utilização da figura para uma dedução gráfica aproximada da relação entre as variáveis.

Através das análises dos gráficos de regressão observamos que em Tucuruí dispersão dos dados apresentou um valor de  $R^2 = 0,547$  (Figura 38 a), no Xingu esse valor foi de  $R^2 = 0,4839$  (Figura 38 b)

Os resultados obtidos mostram que há uma tendência boa o bastante para se realizar prognósticos de chuvas através das descargas elétricas. Dessa forma podemos tentar prever os períodos de grande quantidade de precipitação e conseqüentemente de cheias e estiagens dentro das bacias, o que favoreceria o manejo e planejamento das UHTs instaladas nessas áreas.

Figura 37-Linha de tendência quinzenal entre precipitação e descargas atmosféricas período set/2008 a set/2010: (A) bacia do Tocantins; (B) bacia do Xingu.



### 3.4.5 Relação entre cotas de rios e raios dentro das áreas das bacias

Esse tipo de estudo foi desenvolvido colateralmente nesse trabalho, já que a cota dos rios depende de fatores que controlam o escoamento da água precipitada para os canais dos rios, a sua vazão em vários trechos e a existência ou não de barragens reguladoras. Portanto, o que se buscou foram indícios de respostas das cotas dos rios às variações da incidência de raios.

A figura 38 mostra as defasagens encontradas na relação entre cotas de rios e o número de raios para ambas as bacias. Além do que não houve relação satisfatória entre a quantidade de raios e a cota de rios, sendo percebido que quando a cota do rio aumentou a quantidade de raios diminuiu.

Já a figura 39 mostra uma linha de tendência considerada insatisfatória entre a relação cota do rio e o número de raios. Onde para o Tocantins o coeficiente de correlação foi de  $R^2 = 0,006$ , o que mostra somente 6% de relação entre as variáveis (Figura 37 a), já para o Xingu este coeficiente foi de  $R^2 = 0,1836$ , ou seja, quase 19%, o que mesmo assim ainda é considerado insatisfatório.

Mediante tais resultados, a confiabilidade em prever enchentes ou estiagem através das ocorrências do número de raios dentro das bacias do Tocantins e Xingu é baixa.



Figura 38-Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota período de 08/12/2008 a 15/07/2010 (A) área 1- bacia do Tocantins; (B) área 2 -bacia do Xingu.

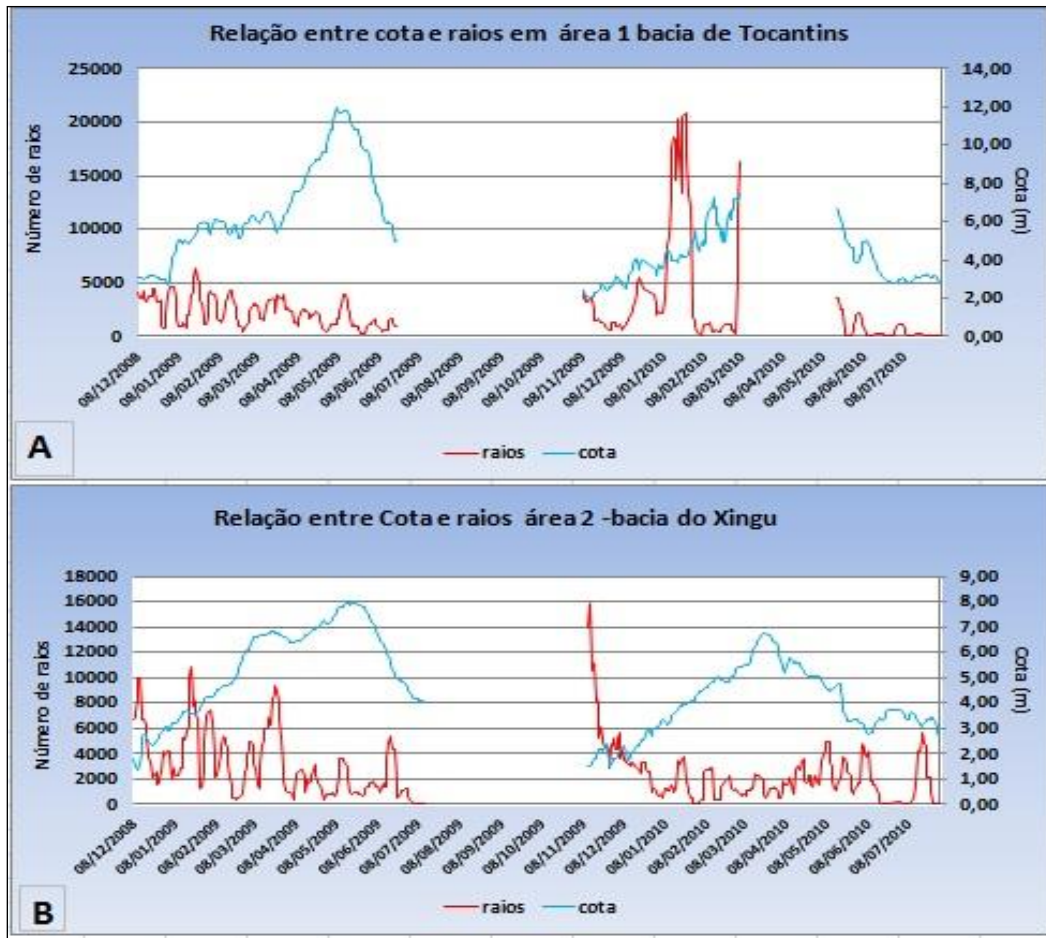
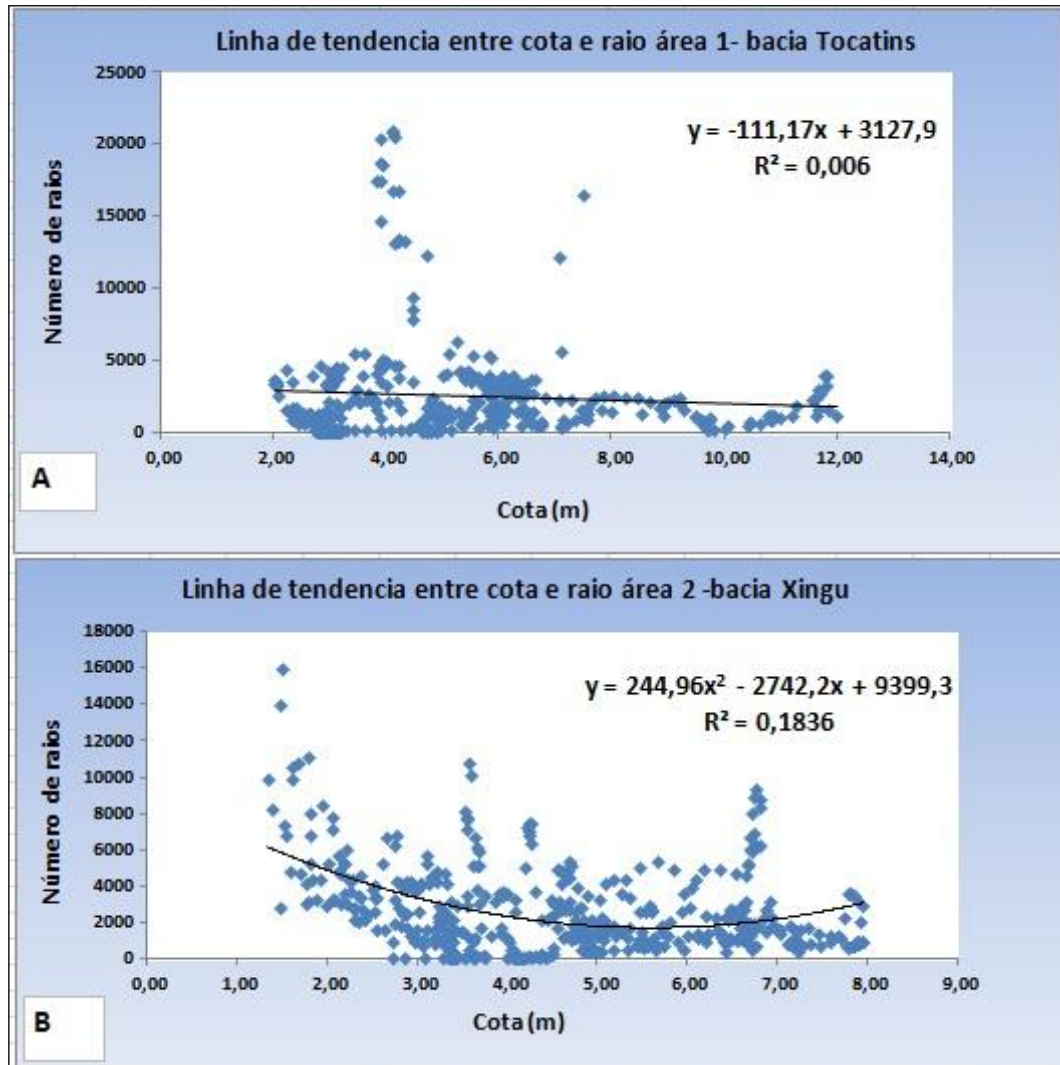


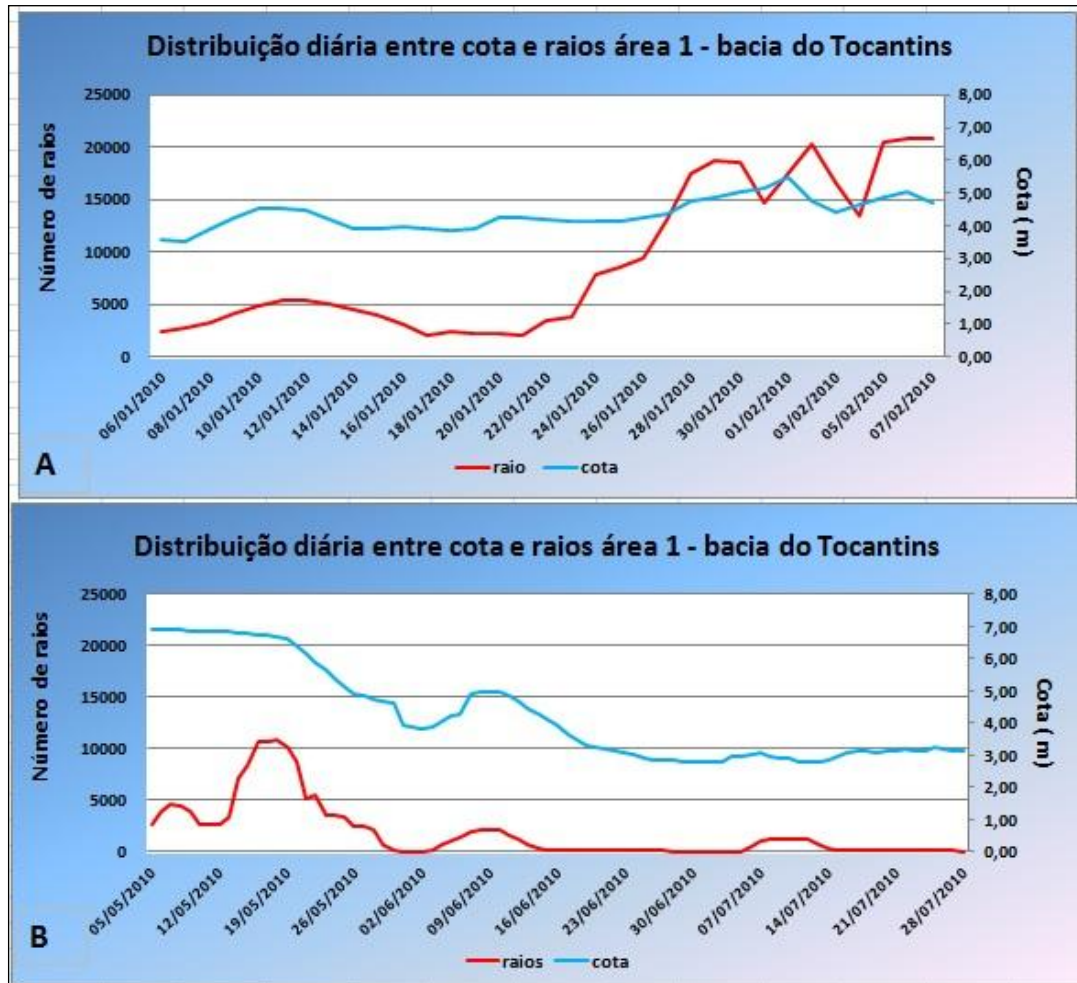
Figura 39- Linha de tendência entre cota e descarga atmosféricas.Caso de medias moveis de sete dias para o período de 08/12/2008 a 15/07/2010.(A)área 1- bacia do Tocantins; (B) Belo Monte bacia do Xingu.



No entanto quando reduzimos o período de estudo para poucos dias notamos que há pulsos positivos entre as duas variáveis (Figura 40). Nesta redução há acompanhamento da cota com as descargas elétricas dentro da bacia do Tocantins onde está localizada a UHT de Tucuruí. Levando em conta que mesmo sendo uma área de estudo consideravelmente pequena comparada com a área 2 do Xingu percebemos uma boa relação entre as variáveis.

Entre os dias 08 e 14 de janeiro de 2010 foi percebido que quando houve aumento da ocorrência de raios também ocorreu aumento na cota do rio. O mesmo padrão foi observado para os dias 18 a 20 de janeiro de 2010, porém nestes dias ocorreu pequenos decréscimo nas duas variáveis (Figura 40a).

Figura 40- Distribuição diária entre cota de rio e descargas atmosféricas. Caso de médias móveis de sete dias para (A) 06/01/2010 a 07/02/2010; (B) 05/05/2010 a 28/07/2010 em Tucuruí.



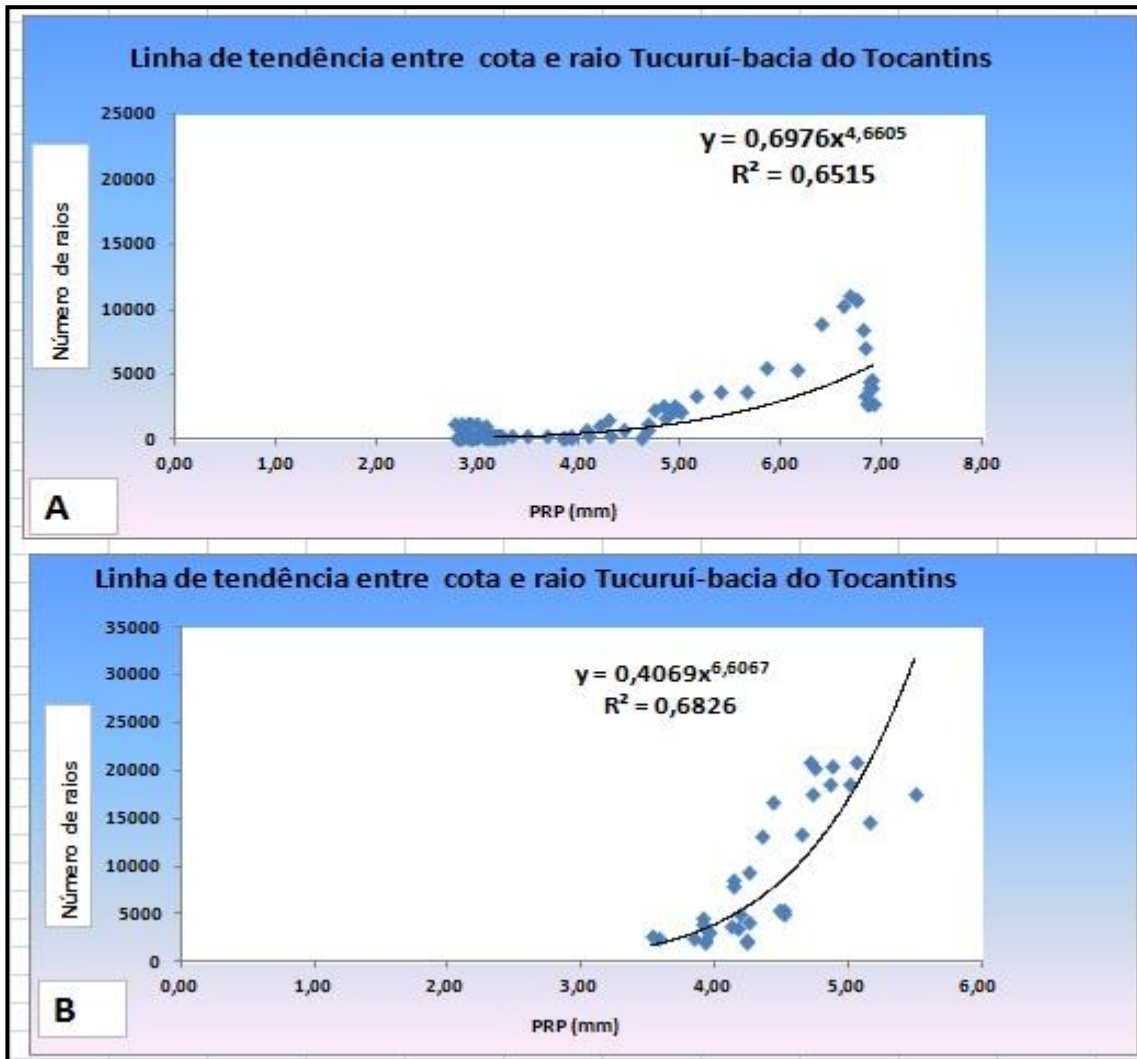
Levando em conta que esse é um período em que ocorrem muitas chuvas para região em função da presença da ZCIT, temos aumento de descarga atmosférica e maior acúmulo de água das chuvas o que resulta em aumento do nível do rio.

Assim como no período de tempo anterior, as duas curvas se acompanham como é visto no dia 02 de junho de 2010, logo em seguida ambas crescem juntas no dia 09 de junho de 2010, e depois mantêm um padrão constante até o final do período estudado. Parece que no período seco as curvas se correspondem bem melhor, mesmo sendo considerado um período de poucas chuvas, conseguimos perceber que os raios possuem uma resposta no nível do rio.

Segundo Grecco et al. (1990) aglomerados convectivos atuantes Amazônia, movem-se com uma velocidade média entre 10 e 40 km/h caracterizando um sistema de mesoescala. Maior parte da chuva produzida por estes sistemas está provavelmente associada às nuvens estratiformes que fazem parte de sua estrutura, provocando precipitação e contribuindo para aumento no nível do rio e também na quantidade de chuvas eletrificadas.

Os coeficientes de correlação encontrados mostram boa relação entre as duas variáveis (Figura 42). Os valores encontrados foram  $R^2 = 0,6515$  e  $R^2 = 0,6826$  o que corresponde a 65% e 68% de relação, sendo assim considerado bom para a realização de futuros prognósticos de enchentes por meio da ocorrência de raios, mesmo com a utilização de um período curto.

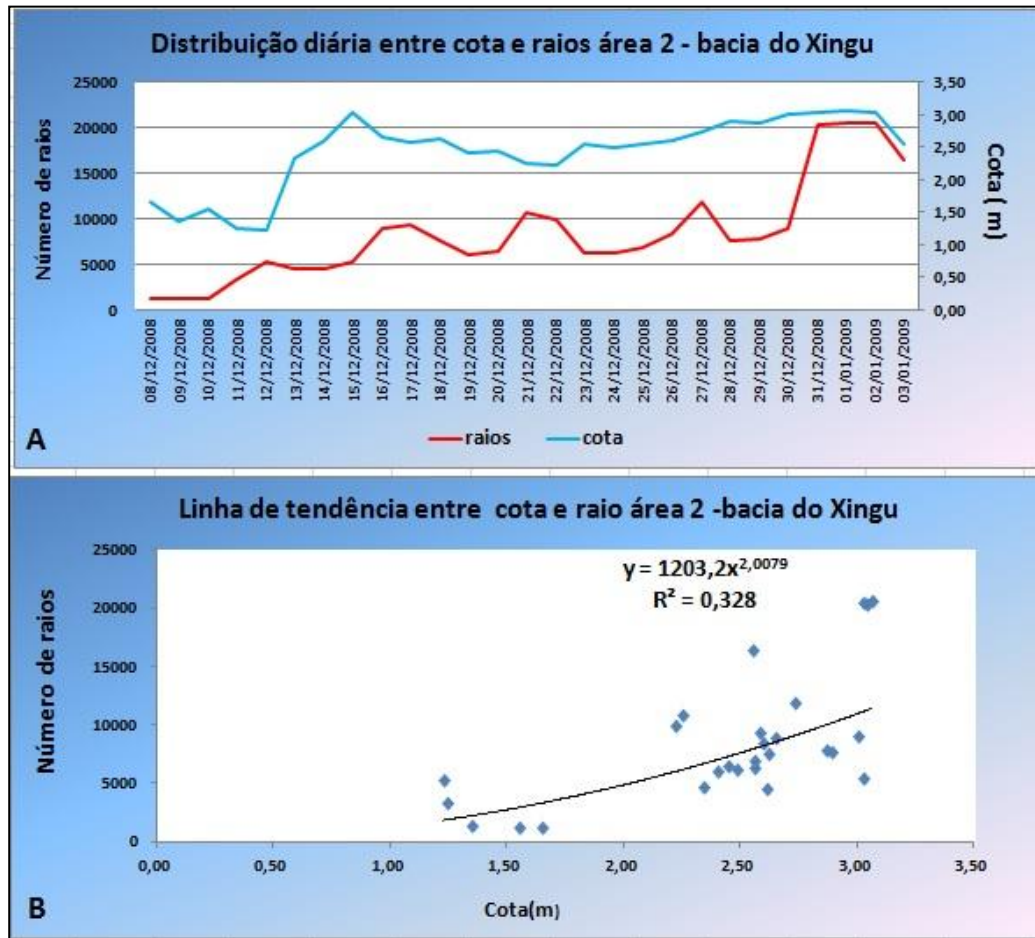
Figura 41-Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota do rio para o período: (A) 06/01/2010 a 07/02/2010 e (B) 05/05/2010 a 28/07/2010 na bacia do Tocantins (área 1).



Devido a falta de dados em alguns dias para a área 2 na bacia do Xingu, não foi possível processar dados dos mesmos períodos que na bacia do Tocantins. Então para o estudo dentro do Xingu foi escolhido o período de 14/11/2009 a 20/12/2009. Nestes dias foram observados pulsos razoavelmente positivos entre cota do rio e raios como podemos ver na figura 41 A.

Os resultados mostram que no dia 12/12/2008 os raios aumentaram, mas a cota de rio apresentou um pequeno decréscimo. No entanto, no dia 31/12/2008 um aumento foi percebido para o número de raios, sendo que a partir deste momento o nível de cota do rio acompanhou a frequência de ocorrência dos raios. Para esse período foi observado a atuação de ZCAS e a formação de áreas de instabilidade associadas ao calor e umidade no interior do continente, sendo estes os principais sistemas responsáveis pelas chuvas observadas e consequentemente pelos raios ocorridos (BOLETIM CLIMANALISE dez/2008) (Figura 41a).

Figura 42- Distribuição diária do filtro de médias móveis de raios e cota. (A) período de 14/11/2009 a 20/12/2009. Linha de tendência entre cota e descarga atmosféricas caso de medias moveis de sete dias (B): Belo Monte -bacia do Xingu.



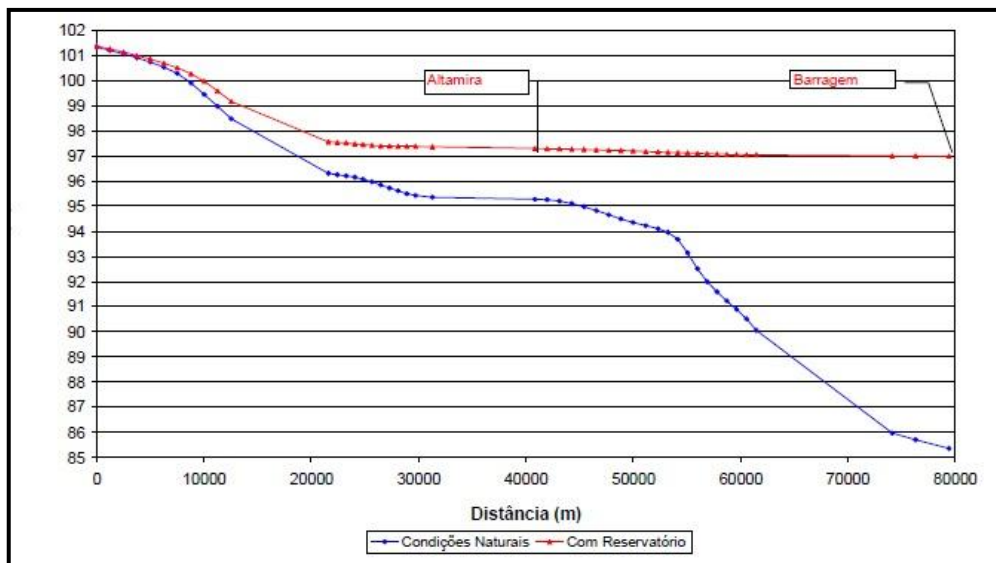
A relação entre as duas variáveis não se mostrou boa, pois o valor do  $R^2 = 0,328$  representou apenas 33% de correspondência entre as curvas. É claro que a este resultado deve ser levado em conta a não disponibilidades de alguns dados (Figura 42 b).

Mesmo encontrando respostas bem pequenas entre as variáveis, é possível dizer que os raios podem contribuir para se estimar o nível do rio. Os resultados mostraram que a relação entre cota e raios foram melhores para a bacia do Tocantins onde está a barragem de Tucuruí, enquanto para o Xingu, na região de Belo Monte, as relações não foram tão significativas.

Acredita-se que os resultados diferentes do Xingu em relação à Tucuruí seja a ausência de barragem que ainda se encontra em processo de construção, o que dificulta avaliar a variação da cota do rio em relação à ocorrência de raios.

Futuramente, após a construção de Belo Monte e do reservatório que terá 97 m de profundidade (cota) os resultados entre as variáveis se tornarão melhores do que os atuais. A figura a seguir mostra resultados de relatórios da ELETRONORTE mostrando o perfil da linha d'água para antes e depois da construção do reservatório (Figura 43).

Figura 43- Resultados dos Estudos de Remanso para o Reservatório do Xingu, Vazão de 7.851 m<sup>3</sup>/s (média de longo termo). Perfis das linhas d'água para as condições naturais e com reservatório.



Fonte: Eletronorte 1999



#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados das análises de três anos de dados de raios provenientes da rede STARNET para as três localidades Belém, Caxiuana e Santarém mostraram que as médias mensais de raios e chuvas têm um comportamento sazonal. Sendo influenciadas pelas oscilações de sistemas de grande escala como a ZCIT e ZCAS assim como pelo acoplamento de outros sistemas de meso e de escala local.

Para as análises das relações entre raios e chuvas, observamos que a climatologia de Belém, Caxiuana e Santarém apresentam singularidade. Verificou-se que a relação entre as descargas elétricas e a precipitação acumulada não se mostra de forma direta nas três localidades. Notamos que a frequência de raios não segue um padrão, mas parece que quando observamos os períodos de transição do chuvoso para o seco, raios e chuvas seguem um comportamento onde as variáveis se acompanham de forma mais direta.

Belém foi a que apresentou uma quantidade significativa de raios entre as três áreas de estudo. Onde Belém aparentemente esta localizada em uma área com a atuação de atividades elétricas atmosféricas bem acentuada. Já as localidades de Caxiuana e Santarém se posicionaram em áreas com poucos eventos de raios.

É importante resaltar que os anos de 2008, 2009 e 2010 a rede STARNET apresentou instabilidades em seus sensores, estudos recentes apontaram que os sensores de Manaus e de Brasília foram os que não detectaram eventos de raios, causando assim essa queda significativa de raios em relação a 2009. .

Através dos estudos de casos concluiu-se que sistemas meteorológicos que atuam na mesma faixa de latitude não seguem um padrão uniforme, pois aparentemente a cidade de Belém é afetada pela ZCIT e somente com alguns dias esses pulsos afetam a cidade de Santarém. Os horários dos máximos valores de raios foram diferentes nas duas cidades, em Belém esses máximos de raios ocorreram pelo período da tarde já em Santarém foi observado que a maior quantidade de eventos aconteceu pela madrugada.

Observamos que os raios anteciparam as chuvas em até uma hora, Esses resultados mostram que os raios podem prever as tempestades severas que causam grandes transtornos a população.

Analisando a média mensal da precipitação para as bacias estudadas foi evidenciada que a sazonalidade das chuvas ao longo do ano nas duas áreas, é uma resposta da atuação dos sistemas meteorológicos causadores de chuvas nas regiões de estudo.

As análises de correlação sem ajustes não geraram resultados satisfatórios, principalmente para a área do rio Xingu. Contudo, as análises dos filtros de médias móveis a partir do 3º dia mostraram resultados mais significativos em ambas às bacias.

Analisando as linhas de tendências mensais e quinzenais dentro das áreas 1 do Tocantins e na área 2 do Xingu, vimos que o Tocantins mostra um bom coeficiente de correlação em relação a área 2 do Xingu. Esses resultados mostram a viabilidade de se fazer prognósticos de chuvas através das descargas elétricas.

Para as análises da relação entre cota de rios e raios foi percebido que períodos longos não geram resultados satisfatórios, entretanto períodos mais curtos sim. Nestes foi possível ver que há um acompanhamento das duas variáveis principalmente na área 1 do Tocantins onde os pulsos dessa relação foram positivas. Na área 2 do Xingu, onde será construída Belo Monte, a relação entre cota e raios apresentaram pouquíssimos pontos positivos.

Para a maioria das análises, a área 1 do Tocantins, onde se encontra a UHT de Tucuruí, apresentou as melhores repostas.

Em relação às análises de ocorrência de raios e cotas de rios as repostas foram bem sutis entre as variáveis, mas ainda assim revelam que os raios podem contribuir para se fazer uma estimativa do nível do rio.

É possível que pelo fato do Tocantins já ter um represamento que é a barragem de Tucuruí, a análise da relação cota de rio e raios tenha sido favorecida em relação ao Xingu que ainda não apresenta represamento.

Finalmente, pode-se afirmar que com o uso de filtros temporais e ajustes de defasagens entre quantidade de raios e as médias de chuvas em áreas do leste da Amazônia pode contribuir para uma possível estimativa da precipitação ocorrida para uma região. Além de prognosticar em muitos casos a precipitação vindoura e contribuir com outros dados para modelos hidrológicos de bacias, a partir do monitoramento contínuo dos eventos de raios detectados ou com a utilização de outras redes de observação semelhantes.

Esse tipo de informação tem custo relativamente baixo e pode suprir deficiências das redes de observações pluviométricas ou hidrológicas em bacias hidrográficas e/ou áreas de características fisiográficas distintas e de grande interesse sócio-econômico na Amazônia.

## 5 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Para generalização e aprofundamento dos resultados obtidos nesse trabalho sugere-se e ao mesmo tempo esperamos realizar no futuro próximo:

Incluir um período mais longo de dados das variáveis relacionadas de modo que os ajustes tenham maior confiabilidade estatística.

Utilizar a mesma metodologia, porém com dados de informação de raios da Rede STARNET com melhor desempenho possível, e aumentar o um número de estações meteorológicas ativas. A fim de melhorar e obter observações que possam futuramente servir de respostas para novas pesquisas e aplicações.

Avaliar a evolução temporal e espacial dos raios nas áreas de bacias hidrográficas estudadas, utilizando novos estudos, inserindo maior detalhamento espacial e outras variáveis (escoamento e vazão dos rios) com o objetivo de auxiliar um modelo que possa produzir prognósticos com informações de cheias e secas em áreas de bacias hidrográficas na Amazônia.

Acompanhar um sistema meteorológico para entender melhor a relação entre raios e chuva.

Estudar detalhadamente a relação entre precipitação pluviométrica e raios também em uma escala de tempo menor.

Aperfeiçoar o estudo de deslocamento de tempestades severas, sendo este um parâmetro promissor a ser considerado para um futuro sistema de alerta de chuvas intensas.

Divulgar os resultados desta pesquisa em mídia, para que gestores públicos tomem conhecimento da importância do estudo de raios para meio ambiente e proteção de vidas e interesses econômicos regionais.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. ; PEREIRA, C. S. ; SOUZA, J. R. S. ; MONTEIRO, J. H. ; ROCHA, B. R. P. **Evolução espacial e temporal de uma tempestade sobre Belém.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- SBSE,, 2010, Belém, PA. **Anais.** Belém: SBSE, 2010. 1 CD-ROM

ALMEIDA, A. C. ; ROCHA, B. R. P. ; SOUZA, J. R. S. ; MONTEIRO, J. H. ; SÁ, J. A. . **Cloud-to-Ground Lightning Observations Over The Eastern Amazon Amazon Region: Subsidies For The Protection Of Electric Systems.** In: ICLP-2010 International Conference on Lightning Protection, 2010, Cagliari, Italia. *annals of ICLP-2010*, 2010

ALMEIDA, A.C.; ROCHA, B. R. P. ; MONTEIRO , J.H.A. ; SOUZA, J. R. S. ; VIEIRA, G.R.; SOUZA, E.B. ; CUNHA, H.T.S. ; SOUZA, W.A.P. Lightning characteristics associated to severe rainfall events, around Belém PA Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, Foz do Iguaçu- SP [**Anais...**]. Foz do Iguaçu- SP: Institute of Electrotechnics and Energy of the University of São Paulo, v. 1. p. 57-60.

ALMEIDA, S. S.; LISBOA, P. L. B., SILVA, A.S.L. Diversidade florística de uma comunidade arbórea na Estação Científica Ferreira Penna, em Caxiuanã – PA. **Bol. Museu Pará. Emilio Goeldi**, Serie, Bot., Belém, v.9, n.1, p. 99-120. 1993.

ANAGNOSTOU, E.N.; CHRONIS.T. **The worth of long-range lightning observations on overland satellite rainfall estimation.** [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Book Chapter)

ANAGNOSTOU, E.N.; LALAS, D.P. The National Observatory of Athens Long-Range Lightning Detection System (*Zeus*) in Europe. Unpublished manuscript. 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA).Dados de precipitação. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/2007>>. Acessado em 15/03/2011.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). Atlas de energia elétrica .2 ed Brasília 2005 .Disponível em:< [http://www3aneel.gov.br/atlas/atlas\\_2dedicao/download.htm](http://www3aneel.gov.br/atlas/atlas_2dedicao/download.htm)> Acesso em : 03 de Nov de 2011.

BATTAN, L.J; THEISS. J.B. Measurements of vertical velocities in convective clouds by means of pulsed-doppler radar. **J.Atmosph. Sci.**, v.2, p.193-298. 1970.

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.**, v. 110, D03105. 2005. doi:10.1029/2004JD004371,

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A (ELETROBRÁS). Plano decenal 1999-2008. ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, Brazil. 1998.

CLIMANÁLISE, abr/2009. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>. Acessado em 24/10/2011.

CLIMANÁLISE, mai/2009. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>. Acessado em 24/10/2011.

CLIMANÁLISE, jun/2009. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>. Acessado em 24/10/2011

CLIMANÁLISE, dez/2008. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise>>. Acessado em 24/10/2011

COLGATE, S.A. Enhanced drop coalescence by electric fields in equilibrium with turbulence. **J. Geophys. Res.**, v.72, p 479-487. 1967.

COHEN, J.C.P., SILVA DIAS, M.A.F., NOBRE, A.C. Environmental conditions Associated with Amazonian Squall Lines: a case study; American Meteorological Society, **Mon. Wea. Rev.**, v.123, n.11, p. 3163-3174, 1995.

COHEN, J.C.P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. 1989. 174f. Dissertação (mestrado em meteorologia) - INPE, São José dos Campos, 1989. (INPE-4865-TD)

CHEN, T.C.; YOON, J.H.; CROIX, K. ST.; TAKLE, E. Suppressing impacts of the Amazonian deforestation by the global circulation change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, p. 2210–2216, 2001.

CHAGNON, F.J.F.; BRAS, R.L. Contemporary climate change in the Amazon. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. L13703, 2005.L/376. 2005

CUTRIM, E.; MARTIN, D.W.; RABIN, R. Enhancement of cumulus clouds over deforested lands in Amazonia. **Bulletin of American Meteorological Society.**, v.76, n.10, p.1801-1805. 1995.

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

DURIEUX, L.; MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H. The impact of deforestation on cloud cover over the Amazon arc of deforestation. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 132-140, 2003.

ESPINOZA VILLAR, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; COCHONNEAU, G.; NAZIANO, F.; LAVADO, W.; OLIVEIRA, E. de; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1574–1594. 2009b.

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. Precipitations distribution over central and western Tropical South America. **Climanálise. Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 5, n. 6, p. 36-45, jun. 1990.

FREITAS, M.A.V.(org.) **Estado das águas no Brasil**. 2001. Brasília : Agencia Nacional de Águas, 2003.

FERREIRA, LV.; ALMEIDA, S.S.; AMARAL, D.D. ;PAROLIN, P. Riqueza e composição de espécies da floresta de igapó e várzea da Estação Científica Ferreira Penna: subsídios para o plano de Manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã. **Pesquisas, Botânica**, n. 56, p. 103-116. 2005.

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

FITZJARRALD, D.R. et al. Spatial and temporal rainfall variability near the Amazon-Tapajos's confluence **Journal of Geophysical Research**, v. 113, G00B11, doi:10.1029/2007JG000596, 2008

GEOBRASIL. Disponível em: <<http://www.geobrasil.net/geobrasil.htm>>. Acessado em 18/03/2011



GRECO, S.; SWAP, R.; GARSTANG, M.; ULANSKI, S.; SHIPHAM, M.; HARRIS, R. C.; TALBOT, R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P. Rainfall and surface kinematics conditions over central Amazonia during ABLE 2B, J. **Geophys. Res.**, v.95, n.17, p.001–17,014. 1990.

GRENET G. Essai d'explication de la charge électrique des nuages d'orages. *Annales Geophysicae*, v.3, p.306-307, 1947

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

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

GRECO, S.; SWAP, R.; GARSTANG, M.; ULANSKI, S.; SHIPHAM, M.; HARRIS, R. C.; TALBOT, R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P. Rainfall and surface kinematics conditions over central Amazonia during ABLE 2B, J. **Geophys. Res.**, v.95, n.17, p.001–17,014. 1990.

GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (ELAT).  
<<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acessado em 04/04/2011.

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

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.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET)

<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acessado em 04/06/2011.

INSTITUTO SOCIO AMBIENTAL (ISA):

<http://www.socioambiental.org/esp/bm/loc.asp>>. Acesso em 18/03/2011.

KINDERMANN, G. Descarga atmosférica. Porto Alegre-RS: Sagra Ed., 1992. 132p.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in the Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v. 108, n. 04, p. 488 – 498. 1980.

LEAN, J. et al. The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (eds.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1996. . 611 p.

LEE, A.C.L..An experimental study of the remote location lightning flashes using a VLF arrival time difference technique, **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.112, p.112, 203 – 229. 1986.

LEE, A.C.L. The Limiting accuracy of long wavelength lightning flash location, **American Meteorological Society**, n.6, p. 43 – 49. 1989.

LEITE, D.M. ; LEITE, C.M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. São Paulo : Oficina de Mydia Ed. Ltda., 1997. 294p.

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.**, n. 133, p. 2583–2607. 2005.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W.D. **The Electrical nature of storms**, New York, Oxford University Press, 1998.

MARENGO, J.A. Long term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920's. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 3236-3244. 2009.

MATTOS, E.V., Machado, L.A.T. Cloud-to-ground lightning and mesoscale convective systems. **Atmos. Res.** v. 99, p. 377–390. 2011.

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

MORALES, C.A.; NEVES, J.R.; ANSELMO, E. Sferics timing and ranging network – STARNET: evaluation over South America. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY**, 14., 2011, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings**. Rio de Janeiro, Brazil, 2011. PDF.

MORALES, C.; WEINMAN, J.; ANAGNOSTOU, E.N. Continuous long-range Thunderstorm monitoring by a VLF Receiver Network Part I: Location Error Analysis. Unpublished Manuscript. 2002.

MORALES, C.; ANAGNOSTOU, E.N. Extending the capabilities of High-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. **Journal of Hydrometeorology**, v.4, n.2, p.141-159. 2003.

MOURA, M. A. L. et al. Evidência observacional das brisas do lago de Balbina (Amazonas) e seus efeitos sobre a concentração do ozônio. **Acta Amazônica**, v.34, n. 4, p. 605-611, oct./dec. 2004

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

NECHET, D. et al. Variação diurna de eventos de trovoadas em Santarém-Pa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais Florianópolis: SBMET, 2006**

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

NEGRI, A.J.; ADLER, R.F.; XU, L.; SURRATT, J. The impact of Amazonian Deforestation on Dry Season Rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 1306-1319, 2004.

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

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

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 continent 1. Weather information and quasi-de stratospheric electric field data**. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. D16, p. 18195-18204, Nov.1992. (Gewehr, 1996).

PINTO JR, O. **Brasil: o país dos 100 milhões de raios**. Revista superinteressante, edição 083, agosto de 1994

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.

POMPEU,M.M . **Lightning and CAPE Relations, During Stormy Weather Cases, in Amazonia, Brazil.** of XIV International Conference on Atmospheric Electricity-ICAE 2011. Rio de Janeiro, Brazil.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sulm(ZCAS) Sobre a América do Sul.** 1994. 123f. Dissertação (Mestrado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 1994.

RAO, V.B., HADA, K., 1990: **Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Sourthern Oscillations.** Theor. Appl.Climatol. 42, 81-91

REDE DE METEOROLOGIA DO COMANDO DA AERONÁUTICA (REDEMET).Disponível em:<<http://www.redemet.aer.mil.br/consulta>>. Acesso em 24/08/2011.

RIBEIRO, W.M.N. **Distribuição de raios, precipitação e casos de tempestades severas na amazônia oriental** Dissertação(Mestrado em Ciências Ambientais) , Instituto de Geociências , Universidade do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA,2010.

RIBEIRO, W.M.N, SOUZA, J.R.S., LOPES, M.N.G., LOPES, J.L.M., TEIXEIRA, V.A., PACA, 2011a. V.H.M. Lightning and Precipitation Produced by Severe Weather Systems, over Belem, Brazil. Proceedings of XIV International Conference on Atmospheric Electricity- ICAE 2011. Rio de Janeiro, Brazil.

RIBEIRO, W.M.N, SOUZA, J.R.S., ALMEIDA, A.C., SANTOS, F.A.A., ROCHA, B.R.P, 2011b. Lightning and Precipitation Distributions over Different Surface Types, in Eastern

Amazonia. Proceedings of XIV International Conference on Atmospheric Electricity-ICAE 2011. Rio de Janeiro, Brazil

RIBEIRO, W.M.N. Incidência de Raios Próxima à uma Linha de Transmissão da CELPA. **In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém-PA, 2010.**

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

RIBEIRO, W.M.N. Efeitos de descargas elétricas na rede externa nos índices operativos de sistema telefônico de Belém no período de 95-97. **In: XIV Seminário de Redes. Brasília, 1998. 310-321.**

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.

ROCHA, E. J. P. **Balço de Umidade e Influências de Condições de Contorno Superficiais Sobre a Precipitação da Amazônia.** 2001. 210p. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São Paulo, 2001.

SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. *Water Resource Research*, v. 15, n.5, p. 1250 – 1258. 1979;

SALATI, E.; VOSE P. B. Amazon basin: a system in equilibrium. *Science*, v.225, p.129-38. 1984.

SERRA, A. **Trovoada e Névoa seca**. In: Boletim Geográfico. Vol. 35, N°225, pp. 142 – 163, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

SANTOS, A.P.P. **Raios e precipitação na amazônia oriental: efeitos no sistema elétrico** Trabalho de conclusão de curso Meteorologia, Instituto de Geociências , Universidade do Pará.2009

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

SIOUFI, Mouana. Santarém, exemplo de beleza do Tapajós. Governo do Pará: Pará, out., 2005. Disponível em: <<http://www.pa.gov.br/conhecaopara/santarem.asp>>. Acesso em 29 de out.2005.

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

SOUZA, E.B., “**Variabilidade Pluviométrica Intrasazonal sobre a Amazônia Oriental e Nordeste Brasileiro durante o outono austral: mecanismos atmosféricos de alta e baixa frequência**”, Tese de Doutorado em Meteorologia. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo. 2003

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. Intraseasonal and Submonthly Variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the Autumn Rainy Season. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 81, p. 177-191, 2005.

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

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

SOUZA, P.; CAVALCANTI, I.F.A. Atmospheric centers of action associated with the Atlantic ITCZ position. **Int. J. Climatology**, DOI: 10.1002/joc.1823, 2009.

TEIXEIRA V. A.; MOTA G. V.; VITORINO M. I. Influência das queimadas sobre o regime de precipitação em sub-regiões da Amazônia. Apresentação em pôster. **Conferência Científica Internacional: Amazônia em Perspectiva Ciência Integrada para um Futuro** –LBA, GEOMA, PPbio. Manaus –AM, 17-20 de novembro de 2008.

TEIXEIRA V. A.; MOTA G. V.; SOUZA, J. R. S.; RIBEIRO W. M. N.; SANTOS A. P. P.; SARAIVA J. B.; ROCHA E. J. P., **Distribution and Characteristics of Lightning Produced by Mesoscale Convective Systems Within SIPAM'S LDN Coverage Area**. X International Symposium on Lightning Protection. 9th-13th November, 2009 – Curitiba, Brazil.

TEIXEIRA, V.A; MOTA, G.V.; SOUZA, J.R.S.; RIBEIRO, W. M. N.; **Lightning Density Distribution over Eastern Amazonia, from 10-years Data of Observations by TRMM – LIS**. In : XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil.



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

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

VONNEGUT, B., 1980: Cloud-to-stratosphere lightning. *Weather*, 35, 59–60

XAVIER, A.F.S.; XAVIER, T.de MA.B. S.; ALVES, B.da S. Evidências de Variações Climáticas no Atlântico Intertropical no período 1964-1999, XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro. Anais. CDROM, 2000.

WALLACE,J.M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science – an introductory survey*.New York: Academic Press, 2006, p. 504, v. 92., International Geophysics Series, 2006.60, 61, 62

WANG,J.;CHAGNON,F.J.F.; WILLIAMS, E.R.; BETTS, A.K.; RENNO, N.O.;MACHADO, L.A.T.; BISHT, G.; KNOX, R.; BRAS, R.L. Impact of deforestation inthe Amazon basin on cloud climatology. **Proceedingd of the Naional Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, p. 3670–3674, 2009.

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).

**ANEXO**

**ANEXO A - REPORTAGENS DAS FORTES CHUVAS OCORRIDAS NAS CIDADES DE BELÉM E SANTARÉM.**

Chuva forte em Belém.

O caos se instalou na tarde do dia 27 em Belém. Um temporal de duas horas provocou um estrago na capital paraense. Por causa dos diversos pontos de alagamento, as ruas ficaram engarrafadas. Muitos carros ficaram parcialmente cobertos pela água.

Figura 1 Imagens fotográficas das chuvas e suas consequências na cidade de Belém.



Fonte : Jornal O Liberal.

O oeste paraense já passa pela maior enchente de sua história. O rio Tapajós alcançou a marca dos 8 metros e 96 centímetros, um índice nunca registrado. A cheia obrigou 24 municípios a decretarem estado de emergência. Outros cinco estão em situação de alerta. Mais de 130 mil pessoas já foram afetadas pela enchente.

Em Santarém, os prejuízos foram avaliados em mais de R\$ 10 milhões apenas nos chamados pontos críticos, locais mais castigados pelas chuvas e pela enchente. O centro comercial da cidade está debaixo d'água depois da forte chuva que caiu neste final de semana. A Receita Federal paralisou suas atividades em virtude da cheia do rio Tapajós que ameaça seu prédio. A travessia da Avenida Tapajós, primeira rua do município, que cruza a cidade de ponta a ponta está sendo feita por canoas. Alguns canoeiros cobram até R\$ 2 por pessoa para fazer o transporte. 'Cerca de 70 áreas de comércio foram atingidas. O que podemos fazer agora é isolar esses locais', diz o capitão Ney Tito, comandante do Corpo de Bombeiros de Santarém. Um trecho de mais de 250 metros do cais de arrimo foi interditado, após uma vistoria técnica integrada por membros do Corpo de Bombeiros, Defesa Civil, Capitania dos Portos e Secretaria de Infraestrutura de Santarém (Seminf). Como o município de Santarém não possui terminal fluvial, além da força da enchente do rio Tapajós, o cais de arrimo tem de suportar a ancoragem de embarcações e uma gigantesca movimentação de cargas.

Figura 2 Imagens fotográficas da chuva e suas consequências em Santarém.



Fonte :Portal de Óbidos