



MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI

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

ALEX DE ASSIS SANTOS DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE GRANDE
ESCALA SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL, COM APLICAÇÃO NO SETOR ELÉTRICO

BELÉM-PA
2010

ALEX DE ASSIS SANTOS DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE GRANDE
ESCALA SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL, COM APLICAÇÃO NO SETOR ELÉTRICO

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
2010

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

S237i Santos, Alex de Assis Santos dos
Influência de sistemas meteorológicos de grande escala sobre a
distribuição de raios na Amazônia Oriental, com aplicação no setor
elétrico / Alex de Assis Santos dos Santos; José Ricardo Santos de
Souza – 2010

102 f. : il.

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

1. Raios. 2. Linhas de transmissão. 3. ZCIT. 4. ZCAS. 5.
Amazônia. I. Souza, José Ricardo Santos de, *orient.* II. Universidade
Federal do Pará. III. Título.

CDD 20. ed.: 551.5632811

ALEX DE ASSIS SANTOS DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE GRANDE
ESCALA SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE RAIOS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL, COM APLICAÇÃO NO SETOR ELÉTRICO

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

Data de Aprovação: ____ / ____ / _____

Conceito:

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. José Henrique Cattanio - Membro
Doutor em Agronomia
Universidade Federal do Pará - UFPA

Prof. Dr. Héilton Ribeiro Tavares - Membro
Doutor em Estatística
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

À minha amada e belíssima esposa,
Francenir Campos de Souza dos Santos, pois o
seu amor e sua companhia me alimentaram e me
deram inspiração para manter elevados ideais.
Nos momentos mais difíceis por ter me ajudado a
não desistir. Pelas palavras e atitudes de incentivo
a continuarmos lutando e vencendo as
dificuldades que juntos superamos pela a graça e
misericórdia de Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus Altíssimo, santo e eterno, criador e sustentador do universo. A ti, ó SENHOR, elevo a minha alma em ação de graças.

Aos inesquecíveis professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências por sua amizade e pela excelência acadêmica.

Ao meu Orientador Dr. José Ricardo Santos de Souza, brilhante cientista, pela contribuição de sua boa inteligência ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao notável pesquisador Dr. Everaldo Barreiros de Souza pela contribuição intelectual e por mostrar, em todo o tempo, boa vontade em contribuir com este estudo.

Aos membros da minha banca pelas correções e contribuições.

A Dra. Maria Aurora Santos da Mota pela excelente coordenação do PPGCA.

A Sra. Gladys Pereira Pimentel, secretária da Pós-graduação.

A meus pais Francisco de Assis dos Santos e Maria Helena Santos dos Santos.

A minhas tias Delma Maria dos Santos e Edna Maria dos Santos*, Maria Cecília Santos e Maria da Graça Santos Mendes*, e aos tios José Sebastião da Silva e Antonio Sérgio dos Santos por todas as formas de ajuda e carinho, pelo amor e cooperação incondicional.

A minhas avós Francelina Esther dos Santos e Joana Tavares dos Santos*.

Ao sogro Francisco das Chagas Ferreira de Souza e Senir Sabino Campos de Souza.

Ao Dr. Manuel Ayres e a inesquecível Isa do Amaral Correa Ayres*.

Aos meus irmãos Heverton Nonato dos Santos, Milene do Socorro Santos Palheta, Monica de Nazareth Santos Ramos e Francisco de Assis Santos Jr.

Aos meus cunhados Alceu Paulo Ramos Neto, Charles Palheta, Renato Campos de Souza, Roberto Campos de Souza, Rubens Campos de Souza* e Liliane Souza.

A meus filhos Gabriela Esther, José Neto, Johana Franceline e Alex Johann.

Aos meus primos Jean Oritas Santos, Mary Helen do Socorro Santos, Mary Anne Santos e Wilson José Souza Mendes Jr*, pelo carinho que sempre tiveram por mim.

A meus colegas Flávio Altieri, Glauber da Silva, Luis Lessa, Wanda Ribeiro, Ana Paula Santos e Marcela Pompeu, pelo apoio intelectual e outras contribuições no desenvolvimento deste estudo.

A Celpa Rede Energia pelo apoio financeiro à realização do projeto que ensejou este estudo científico.

*: In memoriam

“... as densas nuvens se desfizeram em granizo e brasas chamejantes. Trovejou, então o SENHOR, nos céus; o Altíssimo levantou a voz, houve granizo e brasas de fogo.”

Salmos 18:12-13

RESUMO

Foi feito um estudo da associação entre a densidade de ocorrência de raios com condições meteorológicas no leste da região Amazônica entre os anos de 2006 a 2008. A região estudada foi limitada por uma grade geográfica entre as latitudes 0° a -10° e longitudes -53° a -43°. Foram desenvolvidos métodos computacionais de processamento estatístico e geração de mapas de ocorrências de raios para diferentes intervalos de tempo. Esses métodos foram aplicados para determinar os pontos de altas ocorrências de raios ao longo de linhas de transmissão de energia elétrica, a fim de oferecer subsídios para a proteção e operação dos sistemas elétricos da região. Foram utilizados dados da rede de detecção de raios do SIPAM para redimensionar a detecção do sistema de alcance intercontinental STARNET, e subsequentemente, foram obtidos mapas de densidade de raios mais uniformes e realistas. Esses mapas foram interpretados em períodos semanais e sazonais, considerando as observações simultâneas de chuva, vento, radiação de onda longa e a presença de sistemas meteorológicos de grande escala. Zona de Convergência Intertropical e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCIT, ZCAS) definidos pela convergência de ventos e anomalias negativas de Radiação de Ondas Longas (ROL). Os resultados mostraram boa correspondência entre as áreas de convecção e a intensa ocorrência de raios. Nas regiões de mais alta atividade elétrica atmosférica, foi observada ocorrência de convergência dos ventos e anomalias negativas de ROL, para situações de presença de ZCAS e ZCIT sobre a região. A atividade de raios também coincidiu, com algumas exceções, com áreas de maior precipitação em períodos semanais. Foi observado também que, durante um trimestre seco, os segmentos de linhas de transmissão de Mojú-Tailândia e Jacundá-Marabá apresentaram maior incidência de raios. O pico da densidade de raios chegou a 18 raios/km²/trimestre em alguns locais. Durante o trimestre chuvoso, a densidade geral de raios foi 86% maior e apresentou distribuição espacial mais uniforme quando comparada com um trimestre seco. Este estudo mostrou não somente como as características meteorológicas influenciaram na distribuição e quantidade raios, mas também que a elevada atividade de descargas elétricas na região deve ser uma preocupação importante para os sistemas de distribuição de energia elétrica e outras atividades humanas na Amazônia Oriental.

Palavras-chave: raios. linhas de transmissão. ZCIT. ZCAS. Amazônia.

ABSTRACT

A study was made of the relationship between lightning occurrence density distribution and their associated meteorological conditions over an area in eastern Amazon region. In order to do that, special programs were developed to statistically process lightning data, as well as, to generate lightning occurrence density maps on a geographical grid, for different time intervals. Using these methods an application analysis was performed to determine “spots” of high lightning frequency of occurrences along electric power transmission lines, in order to offer subsidies for the protection and operation of these electric systems in the region. Lightning data from the Amazonian Protection System (SIPAM) lightning detection network were used to upgrade the detection efficiency of the intercontinental STARNET system, and obtain more uniform and realistic lightning density maps over the limits of 0° to -10° of latitude and -53° to -43° of longitude. These maps were interpreted at weekly and seasonal periods, considering the simultaneous observations of rainfall, wind, long wave radiation (LWR) and the presence of large scale, the Intertropical Convergence Zone and South Atlantic Convergence Zone (ITCZ, SACZ) meteorological systems, acting over the area of study. The results showed good correlation among the areas of intense convection, determined by the convergence of winds and negative LWR anomalies and high lightning activity both for ITCZ and SACZ configuration over the area. Lightning activity also coincided, with a few exceptions, with the areas of higher weekly precipitation. It was observed also that during a dry trimester the transmission lines segment of Mojú-Tailândia and Jacundá-Marabá presented significantly higher incidence of lightning over them. During a rainy quarter the lightning density of occurrences was, overall, 86% higher and more evenly distributed than during the equivalent drier period, over the area considered. Density maxima of lightning occurrences reached values of 18 events/km²/trimester, at some spot areas. This study showed not only the meteorological characteristics of some lightning producing systems but also the elevated regional lightning activity, which should be an important concern to the electric power distribution systems and other human activities in eastern Amazonia.

Key-words: lightning, transmission lines, SACZ, ITCZ, Amazon Region.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Localização dos sensores de sinais na banda de VLF da rede STARNET	35
Figura 2	Distribuição espacial dos sensores VAISALA LPATS IV da RDR/SIPAM.	38
Figura 3	Mapa Ceráunico de dezembro de 2008 emitido pelo Sistema SIAM\S18 com base em dados da RDR\SIPAM. O retângulo (tracejado) representa a região que foi identificada como de maior eficiência da RDR/SIPAM.	41
Figura 4	Máxima performance operacional da RDR/SIPAM, com 12 sensores operando normalmente. A cor vermelha indica a região com cobertura de 7 ou mais sensores. As bordas (cor azul) são cobertas por apenas 1 (um) sensor. O retângulo (azul pontilhado) representa uma região de máxima eficiência da RDR/SIPAM	42
Figura 5	Em 822 dias, entre 1/out/2006 a 31/dez/2008, houve 102 dias (12.4%) nos quais as duas redes estiveram funcionando simultaneamente em boas condições operacionais.	44
Figura 6	Diagrama Venn, ilustra os 56 dias, ou seja, 6.8%, do período entre 1/out/2006 a 31/dez/2008 (822 dias) as duas redes apresentaram contagem de pelo menos 1 (um) raio na região de máxima eficiência da RDR/SIPAM.	45
Figura 7	Apenas 39 dias, ou seja, 4.7%, do período entre 1/out/2006 a 31/dez/2008 (822 dias) foram considerados ótimos representantes da correspondência entre as duas redes.	47
Figura 8	Valores estimados com base na Equação S18, ($Y' = 28.4 * X^{0.7}$), onde X é o número de raios da rede STARNET e Y' é a estimativa do número de raios corrigido pelo nível de melhor eficiência da RDR/SIPAM.	49
Figura 9	Dimensões da Área Retangular utilizada para estimar a incidência de raios sobre a linha de transmissão.	55
Figura 10	Localização das estações pluviométricas sobre o estado do Pará usadas para gerar a climatologia da precipitação da Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH).	56
Figura 11	Ventos em 1000 hPa ($m s^{-1}$) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.	58
Figura 12	Ventos em 850 hPa ($m s^{-1}$) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.	59
Figura 13	Ventos em 200 hPa ($m s^{-1}$) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.	60
Figura 14	Radiação de Ondas Longas - ROL ($W m^{-2}$) diferença em relação a média climatológica durante a semana de 9 a 15 de dezembro de 2007.	61
Figura 15	Anomalia de chuva (mm) na semana de 9 a 15 de dezembro de 2007.	61
Figura 16	Ventos em 850 hPa ($m s^{-1}$) no período de 24 a 30 de novembro de 2007.	62

Figura 17	Ventos em 200 hPa ($m s^{-1}$) no período de 24 a 30 de novembro de 2007.	63
Figura 18	Radiação de Ondas Longas - ROL ($W m^{-2}$) diferença em relação a média climatológica durante a semana de 24 a 30 de novembro de 2007.	64
Figura 19	Anomalia de chuvas durante a semana de 24 a 30 de novembro de 2007.	
Figura 20	(a) Incidência de raios/ km^2 estimada pelo SIAM/S18, na semana de 9 a 15 de dezembro de 2007, na qual está evidente a influência da Zona de Convergência Intertropical sobre a atividade ceráunica.	65
	(b) Incidência de raios/ km^2 estimada pelo SIAM/S18, na semana de 24 a 30 novembro, na qual está evidente a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul sobre a atividade ceráunica.	65
Figura 21	Os quatro segmentos da linha de transmissão. Esses segmentos, foram escolhidos para fins de aplicar a Equação S18 e estimar a incidência de raios sobre pontos localizados sobre o segmento. Em detalhe: (A) Castanhal-Paragomias; (B) Mojú-Tailândia; (C) Tucuruí-Novo Repartimento; (D) Jacundá-Marabá	70
Figura 22	Dimensões da Área Retangular utilizada para estimar a incidência de raios sobre a linha de transmissão.	73
Figura 23	Ocorrência de raios em um trimestre seco (a) e chuvoso (b).	74
Figura 24	No período seco (set a nov/2007), média e desvio padrão do número de raios/semana incidentes sobre as Áreas Retangulares ($0,10^\circ$ latitude x $0,20^\circ$ longitude).	77
Figura 25	No período chuvoso (jan a mar/2008), média e desvio padrão do número de raios/semana sobre as Áreas Retangulares ($0,10^\circ$ latitude x $0,20^\circ$ longitude) traspassadas pelos quatro segmentos da linha de transmissão (A, B, C e D).	77
Figura 26	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento A, em meses do período mais seco no leste da Amazônia.	78
Figura 27	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento A, em meses do período mais chuvoso no leste da Amazônia.	78
Figura 28	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento B, em meses do período mais seco no leste da Amazônia.	79
Figura 29	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento B, em meses do período mais chuvoso no leste da Amazônia.	79
Figura 30	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento C, em meses do período mais seco no leste da Amazônia.	80
Figura 31	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento C,	80

em meses do período mais chuvoso no leste da Amazônia.

Figura 32	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento D, em meses do período mais seco no leste da Amazônia.	80
Figura 33	Média e Máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento D, em meses do período mais chuvoso no leste da Amazônia.	81
Figura 34	Média e Erro Padrão da quantidade de raios/semana sobre Áreas Retangulares traspassadas por Segmento da linha de transmissão. Valores estimados pelo SIAM\S18, no período de 01/set/2007 a 31/Nov, 2007.	84
Figura 35	Média e Erro Padrão da quantidade de raios/semana sobre Áreas Retangulares traspassadas por Segmento da linha de transmissão. Valores estimados pelo SIAM\S18, no período de 01/jan/2008 a 31/mar/2008.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estatística descritiva das quantidades de raios detectados pelas redes RDR/SIPAM e Sistema STARNET, nos 56 dias quando as duas redes, indicaram presença de pelo menos 1 (um) raio na região de maior eficiência da RDR/SIPAM, (n= 56 dias).	45
Tabela 2	Estimação da quantidade de raios da RDR/SIPAM conforme a quantidade de raios da rede STARNET, em uma amostra de 39 dias em condições ideais de correspondência entre as duas redes.	48
Tabela 3	Resumo da atividade cerâmica nas semanas sob influência dos sistemas meteorológicos de grande escala ZCIT e ZCAS.	66
Tabela 4	Localização geográfica de 8 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Paragominas/Castanhal. Localização Paragominas: -3.01028 / -47.3431 /101 m. Localização Castanhal: -1.3008 /-47.9475 / 65 m.	71
Tabela 5	Localização geográfica de 5 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Tucuruí/Novo Repartimento. Localização Tucuruí: -3.8227/ - 49.6750 / 148 m. Localização Novo Repartimento: - 4,2432 / - 49, 9369/ 117 m.	71
Tabela 6	Localização geográfica de 11 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Marabá/Jacundá. Localização Marabá: -3.01028 / -47.3431 /101 m. Localização Mojú: -1.3008 /-47.9475 / 65 m.	72
Tabela 7	Localização geográfica de 11 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Mojú-Tailândia. Localização Marabá: -3.01028 / -47.3431 /101 m. Localização Mojú: -1.3008 /-47.9475 / 65 m.	72
Tabela 8	Medidas de tendência central e de variação do número de raios/semana incidentes sobre as Áreas Retangulares (0,10° latitude x 0,20° longitude) traspassadas pelos quatro segmentos da linha de transmissão (A, B, C e D), conforme o período: seco e chuvoso.	76
Tabela 9	Resumo da comparação entre a incidência de raios/semana em cada Segmento da linha de transmissão da CELPA em dois períodos: Seco e Chuvoso.	82
Tabela 10	Resumo da comparação entre a incidência de raios/semana em segmentos da linha de transmissão da CELPA em dois períodos: Período Seco (Set, Out, Nov/2007) e Período Chuvoso (Jan, Fev, Mar/2008).	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	– Alta da Bolívia
CELDN	– Central European Lightning Detection Network
CELPA	– CELPA REDE ENERGIA S/A.
CMAP	– Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation
CPC	– Climate Prediction Center
CPRM	– Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	– Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
E	– Leste
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMS	– Estação Meteorológica de Superfície
EUCLID	– European Cooperation for Lightning Detection
GPCP	– Global Precipitation Climatology Project
HN	– Hemisfério Norte
HS	– Hemisfério Sul
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
MCG	– Modelos de Circulação Geral
N	– Norte
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
NE	– Nordeste
NEB	– Nordeste Brasileiro
RDR/SIPAM	– Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia - SIPAM
RINDAT	– Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
ROL	– Radiação de Onda Longa
SAFIR	– Surveillance et Alerte Foudre par Interférometrie Radioélectrique
STARNET	– Sferics Timing And Ranging NETwork
SIDDEM	– Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas da ELETROSUL
UKMO	– United Kingdom Meteorological Office
WWLLN	– World Wide Lightning Location Network
ZCIT	– Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	– Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVO	20
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3.	REFERENCIAL TÉORICO	21
3.1.	DANOS CAUSADOS POR RAIOS	21
3.2.	ELETRIFICAÇÃO DE NUVENS.....	22
3.3.	SISTEMAS DE DETECÇÃO DE RAIOS	26
3.4.	CLIMATOLOGIAS DE RAIOS	27
3.5.	RAIOS NA AMAZÔNIA.....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1.	AS TRÊS PREMISSAS PARA ELABORAR O MODELO	30
4.1.1.	A primeira premissa: a região de máxima eficiência	30
4.1.2.	A segunda premissa: a região de valores mais confiáveis	30
4.1.3.	A terceira premissa: a estabilidade da STARNET	31
4.2.	DADOS DA REDE STARNET.....	31
4.2.1.	Formato dos dados do Sistema STARNET	32
4.3.	DADOS DA RDR/SIPAM.....	33
4.3.1.	Estrutura dos dados da RDR/SIPAM	35
4.4.	ELABORAÇÃO DO MODELO DE CORREÇÃO DO STARNET	37
4.4.1.	Etapa 1: A região de maior eficiência da RDR/SIPAM	37
4.4.2.	Etapa 2: As duas redes operacionais entre 2006 a 2008	39
4.4.3.	Etapa 3: Duas redes com variabilidades aproximadas.	41
4.4.4.	Etapa 4: Dedução das equações de ajuste	44

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1.	ESTUDO DE CASO 1	
	RAIOS E SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE LARGA ESCALA	46
5.1.1.	Caracterização da ZCIT e ZCAS	46
5.1.2.	Abrangência do estudo	49
5.1.3.	Especificação dos dados utilizados no estudo	49
5.1.4.	ZCIT, ZCAS e raios no leste da Amazônia	52
5.1.5.	Influência da ZCIT e ZCAS sobre a ocorrência de raios	63
5.2.	ESTUDO DE CASO 2	
	INCIDÊNCIA DE RAIOS SOBRE SEGMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MESES DOS PERÍODOS SECO E CHUVOSO NO LESTE DA AMAZÔNIA	64
5.2.1.	Períodos seco e chuvoso na Amazônia	64
5.2.2.	Abrangência do estudo	65
5.2.3.	Delimitações da região de estudo	65
5.2.4.	Distribuição da raios nos períodos seco e chuvoso	68
5.2.5.	Estações e segmentos mais propensos a incidência de raios	81
6.	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXOS	94
	ANEXO A - Localização geográfica dos segmentos de linha de transmissão	95
	ANEXO B – Manual do software SIAM/S18	97

1 INTRODUÇÃO

Raio é uma propagação de elétrons através da atmosfera, que transfere carga elétrica geralmente de uma nuvem, através de um canal ionizado cuja extensão pode ser medida em quilômetros. A frente do pulso de corrente pode viajar a velocidades de 60000 km/s, e atingir temperaturas internas ao feixe de elétrons do canal próximas a 30000 °K. O canal ionizado pode ser positivo ou negativo, é um componente essencial do raio, quando atinge níveis de altitude próximos do solo, então ocorre o pulso de corrente de retorno e realiza-se o fechamento do circuito que produz o raio (RAKOV, 1999; MUNOZ, 2003).

A interpretação das causas e a previsão da incidência de descargas atmosféricas são ainda fronteiras da ciência no início do século XXI. O estudo deste problema requer uma abordagem multidisciplinar. Os raios têm sido alvo de conjecturas e hipóteses que consideraram a relação de causalidade entre as descargas atmosféricas e eventos como interrupção de transmissão elétrica em sistemas de alta potência e quedas de aeronaves (ARAÚJO et al, 1990).

Os pioneiros das pesquisas com raios foram dois cientistas franceses (Thomas-François Dalibard e De Lors) e um norte-americano (Benjamin Franklin) o qual demonstrou que um relâmpago era causado por uma descarga de eletricidade. A origem mais comum de raios são as descargas elétricas em tempestades, isto é, de nuvens cumulo nimbos. A maioria dos raios ocorre dentro de uma nuvem (CC) de tempestade e são chamados descargas intra nuvem. O raio nuvem-solo (CG) tem sido estudado mais amplamente do que as outras formas de relâmpagos, devido ao seu interesse prático (risco aos humanos, danos em sistemas elétricos e telecomunicações e incêndios florestais, e outros). Canais de raios abaixo do nível das nuvens podem ser facilmente fotografados e estudados com instrumentos ópticos (WAHLIN, 1986; NWS, 2007).

A necessidade de estudos sobre a atividade cerâmica pode ser evidenciada em diversos aspectos entre os quais destacam-se: contribuição para previsão de tempo e clima, planejamento de ações de revisão e conserto de linhas de transmissão, planejamento e monitoramento de tráfego aéreo, proteção de edificações, proteção de sistemas de telecomunicações, estudos de impactos ambientais, sistemas de alerta de incêndios com gênese relacionada a relâmpagos (DIENDORFER, 1994; BREUNIG et al, 2005).

Um fato de grande importância no problema da eletricidade atmosférica é a questão de como tem origem a eletrificação (e polarização) das nuvens. Os estudos de Schonland (1950), Hagenguth (1951) e Chalmers (1957) comprovam que os ventos solares promovem o acúmulo de carga elétrica na Ionosfera, conseqüentemente desenvolvendo um papel importante na eletrificação no topo das nuvens. A essa diferença de potencial entre a Ionosfera e a superfície do planeta convencionou-se chamar de

capacitor Terra-Ionosfera, o qual tem efeito importante da atividade cerâmica em escala mundial. As transferências de carga elétrica negativa da atmosfera para a terra ocorrem disseminadas, ao redor do globo terrestre, em ocorrências simultâneas que chegam a 100 por segundo, sendo estas necessárias para manter o equilíbrio eletrostático entre a Terra e a Ionosfera. Visto que a diferença de potencial desse capacitor esférico atinge a ordem de várias centenas de milhares de volts (CHALMERS, 1957; SCHONLAND, 1950; HAGENGUTH, 1951).

Ao redor do mundo diversas iniciativas têm sido bem sucedidas no objetivo de detectar descargas elétricas: Na Europa a rede EUCLID a qual é equipada com 77 sensores, nos EUA e Canadá a rede NALDN, na Alemanha a rede SAFIR, na Europa central a rede CELDN e na Ásia a rede UKMO ATD. Especificamente no Brasil as redes: Brasil Dat (antiga RINDAT), WWLLN, SIDDEM, RDR/SIPAM e o sistema de detecção de longo alcance denominada rede STARNET (SILVEIRA, 2006)

Os estudos sobre descargas atmosféricas dentro dos limites da região amazônica ganharam um novo recurso tecnológico, no ano 2005, com a implantação da Rede de Detecção de Raios (RDR/SIPAM). A partir dos dados emitidos pelo RDR/SIPAM tornou-se possível o monitoramento da atividade cerâmica e o desenvolvimento de modelos que possibilitam a previsão da incidência de raios na região amazônica e a geração de produtos específicos para os diferentes setores da sociedade. Ressalta-se que há outras fontes de dados sobre atividade cerâmica na Amazônia, com destaque para o Sistema de Detecção de Longo Alcance – Rede STARNET, inicializada em 2001, possui sensores localizados na Europa, América e África, a qual com cobertura de menor resolução, cobre a região amazônica com razoável precisão e uniformidade (CHONIS, 2003).

No ano 2007 foi iniciado um projeto de monitoramento de relâmpagos na Amazônia, com participação do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), e da Universidade Federal do Pará (UFPA), com financiamento da CELPA Rede Energia. Este projeto teve o objetivo de definir as características das ocorrências de raios na Amazônia Oriental para possibilitar o desenvolvimento de um modelo de previsão de raios que gere informações úteis ao setor elétrico e outros já mencionados. A atividade cerâmica é calculada para pontos de uma grade a partir da combinação de dados do Sistema STARNET e da Rede de Detecção de Raios – RDR/SIPAM.

A incidência de raios na região amazônica tem causado perdas humanas, materiais e eventualmente queimadas, as quais causam danos ao meio-ambiente. O estudo das descargas atmosféricas no leste da Amazônia e seus efeitos sócio-ambientais têm tido maior notoriedade a partir da divulgação de resultados contidos em artigos, dissertações e monografias produzidos pela equipe da Universidade Federal do Pará e colaboradores. (ALMEIDA et al, 2007; ROCHA, 2007; RIBEIRO et al, 2008; PEREIRA et al, 2008; ALMEIDA et al, 2008a; SOUZA et al, 2008; LESSA et al, 2008; ALMEIDA et al, 2008b).

Implantada no Norte do Brasil, no ano 2005, a Rede de Detecção de Raios (RDR/SIPAM) possibilitou a realização de projetos de monitoramento da atividade cerâmica e o desenvolvimento de produtos específicos para os diferentes setores da sociedade. Na RDR/SIPAM as informações são coletadas instantaneamente por até 12 (doze) sensores de raios gerando uma base de dados que contém detalhes sobre tipo e localização dos raios, correntes e polaridades das descargas. Entretanto, esse conjunto de dados ainda necessita de correções pontuais, porque quando algum sensor está inativo ocorrem falhas de cobertura, as quais reduzem a capacidade de detecção de raios de toda a rede.

A rede experimental de detecção de descargas atmosférica a longa distância – STARNET foi concebida em um projeto da NASA e uma empresa chamada Resolution Display Inc (RDI). Durante o período enfocado neste estudo a rede STARNET operava com 13 (treze) sensores de VLF localizados na Europa, África, Caribe e América do Sul. Desde o lançamento da STARNET a rede realiza contínuo monitoramento de atividade de descargas atmosféricas sobre as Américas e Caribe, Oceano Atlântico e parte do continente Africano, entretanto, em diferentes resoluções espaciais (ex: 5-20 km dentro da área de cobertura e > 50 km fora da área de cobertura dos sensores) e com um alta resolução temporal (1 mili-segundo). A região Amazônica está localizada dentro da área de cobertura da rede STARNET, logo, a rede apresenta boa uniformidade de eficiência de detecção na região de estudo. Portanto, os dados emitidos pela rede STARNET expressam satisfatoriamente a variação atividade cerâmica nessa região (MORALES et al, 2007).

Com todas as possíveis aplicações acima citadas, os estudos de eletricidade atmosférica têm adquirido maior relevância nas últimas décadas, tanto no Brasil como no mundo. No estado do Pará as pesquisas nesta área estão mais avançadas no Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambientais (PPGCA/UFPA) e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).

Em termos meteorológicos as informação sobre descarga atmosférica é uma variável que poderá ser incluída nas previsões de tempo, especialmente para identificar áreas de alto índice cerâmico e prever fenômenos críticos associados a tempestades severas. Outros setores que se beneficiarão são: o de telecomunicação, aviação, defesa civil, militar, agricultura, transportes superficiais, entre outros.

A partir de informações coletadas em referenciais teóricos (HIDAYAT ET AL, 1999; SCOTT, 1988; LEES, 1991; POPOLANSKY, 1972; SHINDO; YOKOYAMA, 1998; DIENDORFER, SCHULZ; RAKOV, 1988; ZAJAC; RUTLEDGE, 2001) e observações prévias realizadas a partir dos dados da RDR/SIPAM e da rede STARNET este estudo verificou a associação entre a atividade cerâmica da região e a presença de sistemas meteorológicos de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Outro aspecto abordado neste estudo foi a distribuição espacial e temporal da atividade cerâmica em meses de período seco e chuvoso.

Conforme relatado em estudos climatológicos é plausível a hipótese de que a incidência de raios aumenta nas regiões sob influência da ZCIT e da ZCAS

Este estudo realizou uma estimacão da atividade cerúnica no leste da Amazônia. Os dados foram provenientes dos sistemas de detecção de raios RDR/SIPAM e do Sistema STARNET. Como resultado, foi obtido uma equação de estimacão que possibilitou redimensionar a distribuicão espacial da ocorrência de raios na região de estudo.

Para realizar este trabalho valeu-se de diferentes metodologias para: a) Elaborar o software SIAM/S18 o qual implementa o modelo de correção da densidade espacial de dados da STARNET; b) Desenvolver mapas de relações entre atividade de raios e outras variáveis meteorológicas; c) Avaliar a frequência de incidência de raios nuvem-solo sobre segmentos de linhas de transmissão de energia elétrica.

Em virtude dessa abordagem metodológica decidiu-se apresentar as metodologias específicas, os resultados e conclusões correspondentes a cada um desses sub-temas em capítulos separados. Espera-se que esse formato de apresentação facilite o destaque dos temas que deverão ser encaminhados em artigos decorrentes dessa dissertacão.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a distribuição de descargas atmosféricas no leste da Amazônia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um software capaz de emitir mapas de densidade de raios, para a região limitada pelas coordenadas latitude 0° a -10° e longitude -53° e -43° , para quaisquer intervalos de datas entre outubro de 2006 a março de 2009, tendo como base de dados os registros de raios fornecidos pelas redes STARNET e RDR/SIPAM.

- Estudar a variabilidade da distribuição de descargas atmosféricas, em semanas, sob influência dos sistemas meteorológicos de grande escala: Zona de Convergência Intertropical e Zona de Convergência do Atlântico Sul, na região de estudo, limitada pelas coordenadas Latitude 0° a 10° Sul e Longitude 53° a 43° Oeste, a partir de dados fornecidos pela RDR/SIPAM e pela rede STARNET.

- Estudar no período seco e no período chuvoso a variação da incidência temporal e espacial de raios em quatro segmentos da linha de transmissão da Celpa Rede Energia: (a) Castanhal-Paragominas; (b) Mojú-Tailândia; (c) Tucuruí-Novo Repartimento; (d) Jacundá-Marabá, a partir de dados fornecidos pela RDR/SIPAM e pela rede STARNET.

3 REFERENCIAL TÉORICO

Um estudo completo dos raios e suas interações requer contribuições de diversas ciências: Físicas (entender como a energia elétrica é convertida em energia térmica no canal de raio, principalmente), Química (entender a dissociação de gases realizada pelo raio no ar), Matemática (modelar como a temperatura e a pressão do canal de raio variam no tempo), Meteorologia (entender a estrutura de carga, a iniciação de raio e a associação com os sistemas meteorológicos), Engenharia (proteção dos sistemas elétricos), e Medicina (entender os danos causados por raios a seres vivos).

Os raios são um fenômeno natural, ao redor do qual, todas as ciências podem dar as mãos e podem fazer contribuições comuns; muito embora do amplo conhecimento sobre o tema que é disperso ao redor do mundo, e do fato que as descobertas sobre as características elétricas dos raios datam de mais de 250 anos atrás, ainda há poucas pesquisas sobre este tema tão intrigante (SRINIVASAN; GU, 2006).

3.1 DANOS CAUSADOS POR RAIOS

Muitas atividades são afetadas por descarga, porém estruturas altas ou expostas são particularmente mais vulneráveis a serem atingidas por raios e requerem medidas protetoras especiais para reduzir o risco de dano. É reconhecido, há muito tempo, que na geração de eletricidade e sobre as linhas de transmissão, está o maior risco como consequência da altura e exposição de suas estruturas de torres. A proteção de linhas de transmissão e equipamentos já é utilizada há muitos anos, mas estão sendo buscadas melhorias continuamente, dirigidas por usuários que desejam a mais alta segurança e qualidade no fornecimento de energia elétrica. O raio não é considerado uma principal fonte de risco na geração de energia termelétrica ou nuclear, com exceção de perda súbita de carga que é o resultado de dano de raio às linhas de transmissão. Porém, em situações onde a energia é gerada por turbinas de vento, colocadas em locais expostos, os riscos são relativamente altos comparados às estruturas circunvizinhas. Apesar de não ser atualmente possível implementar uma proteção total contra raios, ainda prevalece a opinião que mesmo que haja tecnologia para tal, haveria considerações econômicas que impediriam tal aplicação universal (SCOTT, 1988; LEES, 1991; BSI, 1992; POPOLANSKY, 1972).

Devido à introdução sistemática de computadores e dispositivos eletrônicos sensíveis em várias atividades da sociedade, a proteção de tais dispositivos contra voltagens induzidas por raio é um problema de interesse atual; em geral, estes dispositivos elétricos são eletricamente alimentados por fontes geradoras de baixa voltagem.

Os dois mecanismos principais pelos quais os raios interferem nesses circuitos elétricos são os seguintes: (a) um pico de voltagem transmitida à instalação, através da rede, pela fonte de alimentação; (b) um pico de voltagem induzida diretamente no circuito, através de um raio que atingiu um local próximo. Em ambos os casos, o comportamento dinâmico da resistência do aterramento da rede elétrica pode fazer um papel muito importante na interação entre circuitos elétricos e campos eletromagnéticos gerados por descargas elétricas provenientes de nuvens (GALVAN et al, 1999).

Uma grande porcentagem de incêndios de florestas e danos em linhas de alta tensão é causada por flashes positivos, ou seja o pulso de retorno no canal ionizado. Esses danos às linhas de transmissão são causados por raios CG cujo canal ionizado é carregado positivamente. O pulso de retorno resultante, leva uma carga negativa e transfere carga positiva da nuvem para o chão. A combinação do canal ionizado com o pulso de retorno é chamada de flash positivo. Flashes positivos constituem menos que 10 por cento de todos os raios CG, e frequentemente acontecem na periferia de um temporal. Porém, o pico dos pulsos de retorno deles é frequentemente muito maior que o pico dos pulsos de retorno negativo; por isso, eles são mais letais e podem causar maior dano que os flashes negativos (RIBEIRO, 1998).

Para Cummins (2002), os efeitos dos raios sobre os sistemas de potência elétrica podem ser divididos em dois grupos. A primeira classe: são os efeitos resistivos (devido a corrente do raio) e os indutivos, devido a taxa de variação da corrente do raio. A segunda classe: são os danos causados aos equipamentos conectados à rede elétrica.

3.2 ELETRIFICAÇÃO DE NUVENS

A eletrificação da atmosfera é um processo normal e ocorre em qualquer condição de tempo, com ou sem presença de tempestades. É importante notar que só uma porção pequena do globo está coberta por tempestades em qualquer determinado momento; em todo o momento, há uma diferença de potencial entre 200 mil a 500 mil volts entre a ionosfera e a superfície da terra, com a terra sendo o pólo negativo. Isto produz um campo elétrico de cerca de 150 v/m próximo à superfície e uma corrente contínua de aproximadamente 1000 ampères que flui da atmosfera ao solo. Um dos fatores que contribuem para a eletrificação das nuvens é o capacitor terra-ionosfera. A superfície da terra é altamente condutiva e a atmosfera libera eletricidade no ar devido a formação de íons positivos e negativos pela radiação solar e radioatividade dos solos. A manutenção da corrente elétrica entre a terra e a atmosfera é resultante do transporte de carga elétrica, feita pelo conjunto de milhares de tempestades, principalmente nas regiões tropicais. Estas tempestades alimentam uma troca de corrente entre o solo e a ionosfera. As trocas de cargas elétricas entre a terra e a ionosfera denominam-se "circuito elétrico global," e são explicadas pelo fato da superfície da terra e da ionosfera

comportarem-se como placas concêntricas de um capacitor esférico planetário. As nuvens, geralmente cumulo nimbo, atuam como uma camada intermediária entre a terra e a ionosfera (CHEVALIER, 2007).

Esta é uma idealização que considera a superfície da terra e a ionosfera como superfícies quase equipotenciais, separadas pela atmosfera, que é um meio levemente condutor, existindo um equilíbrio elétrico entre a região de geração de cargas e a região de céu claro. As cargas são geradas por nuvens eletrificadas que compensam a corrente vertical de condução nas regiões de céu claro, mantendo a diferença de potencial. O potencial elétrico aumenta aproximadamente 100 volts por metro do solo em direção a ionosfera, e a condutividade atmosférica é mais baixa no nível do mar, porque os íons tendem ser capturados por partículas de aerossol maiores que são mais comuns próximo da superfície. Supõe-se que as descargas elétricas atmosféricas recarregam a carga negativa da terra, e que a carga da terra se dissiparia em menos que sete horas se não ocorressem transferências de elétrons entre as nuvens e o solo. Os raios são causados pela formação de cargas na atmosfera, fazendo gerar os campos elétricos que causam a formação de um canal elétrico no ar (NASA, 1999).

Devido a complexidade da estrutura elétrica das nuvens, o processo de eletrização das mesmas não é bem conhecido. Acredita-se que a geração e a separação de cargas dentro da nuvem de tempestade tenham origem em processos microfísicos e microfísicos que ocorrem simultaneamente dentro da nuvem. Entretanto, a atmosfera funciona como um isolante muito bom. Assim uma enorme carga tem que ser construída antes que o raio possa ocorrer. Quando o limiar da resistência elétrica oferecida pela atmosfera é alcançado, a força do campo elétrico supera propriedades resistivas da atmosfera, e o resultado é o raio. Como o campo elétrico no interior da nuvem é mais forte, como resultado, a maioria dos raios (~75-80%) acontecem dentro da própria nuvem (PINTO JR. & PINTO, 2000).

Nossa compreensão dos processos de eletrificação de nuvens (cumulo nimbo) aumentou rapidamente nos anos mais recentes com o desenvolvimento de técnicas de medições “in situ” e sensoriamento remoto (radar e satélite) os quais têm possibilitado o desenvolvimento de modelos numéricos mais precisos e conceitualmente mais consistentes. Embora haja alguma discordância sobre a dependência exata dos mecanismos de carga em relação a vários parâmetros, como temperatura e quantidade de água em estado líquido, é geralmente aceito que o mecanismo primário de separação de cargas (nas nuvens) envolve colisões de partículas de cristais de gelo principalmente na presença de gotículas de água super resfriadas. (TAKAHASHI & MIYAWAKI, 2002; SAUNDERS et al, 1991; ALTARATZ et al, 2004, TAKAHASHI, 1978)

O mecanismo de separação de carga dentro de um cumulo nimbo é devido à circulação de água e partículas de gelo que transferem a carga da base de nuvem para as áreas superiores e causam uma diferença enorme em potencial entre o topo e a base da nuvem. Isto pode resultar em uma

diferença de potencial de até 100 megavolts entre a atmosfera e a terra (FLEAGLE & BUSINGER, 1980). Embora atualmente tenhamos numerosas publicações de simulações numéricas à cerca do desenvolvimento de tempestades (ZIEGLER et al, 1986, 1991; HELSON & FARLEY, 1987; HELSON et al, 2001; NORVILLE et al, 1991; ZIEGLER & MACGORMAN, 1994; SCAVUZZO et al, 1995, 1998), há escassos trabalhos que lidam com o desenvolvimento da carga elétrica em nuvens de chuva intensa. Um dos pioneiros neste tipo de estudo foi Takahashi (1983, 1984) que analisou temporais de inverno no Japão.

Semelhantemente a eletricidade estática nos temporais, as condições de turbulência no interior das nuvens fazem as cargas se separarem. Em uma tempestade elétrica, as nuvens de tempestades são carregadas como condensadores gigantes na atmosfera; como resultado, as cargas nas nuvens, se separam de tal modo que as cargas negativas concentram nas bases das nuvens. As cargas negativas localizadas no nível do solo são empurradas para baixo, conseqüentemente deixando as cargas positivas na superfície. Este forte campo elétrico faz o ar ao redor da nuvem se tornar ionizado; devido à ionização do ar, um feixe pode começar a propagar abaixo para a terra. Isto ocorre porque os íons negativos são muito milhares de vezes menores que os íons positivos, eles se movem rapidamente e cobrem a maioria da distância que cria um pulso invisível chamado de canal ionizado.

Dentro da região de influência do campo elétrico, o canal é iniciado por um pulso inicial (o canal ionizado ou líder) que normalmente não iguala o desequilíbrio de cargas. O desequilíbrio elétrico resultante da corrente elétrica que flui pelo canal ionizado, os ions localizados neste canal induzem a formação de um "pulso de retorno" o qual flui até que o desequilíbrio de carga seja reduzido. O canal ionizado propaga-se em várias séries de passos pouco luminosos medindo aproximadamente 50 metros de comprimento e com duração de $1\mu s$. Poderia ser comparável a uma "avalanche de elétrons". Entre cada passo há uma pausa de cerca de $50\mu s$ durante, a qual, o canal ionizado realiza uma varredura (busca) ao redor, a fim de localizar um ponto para onde direcionar o próximo passo. Se nenhum ponto é localizado, dá outro passo, e repete o processo até que "acha" um objetivo. Cada passo do canal ionizado demora na ordem de $50\mu s$; entretanto, para alcançar seu comprimento completo, este número varia dependendo da tortuosidade de seu caminho (JOHNSON, 2007).

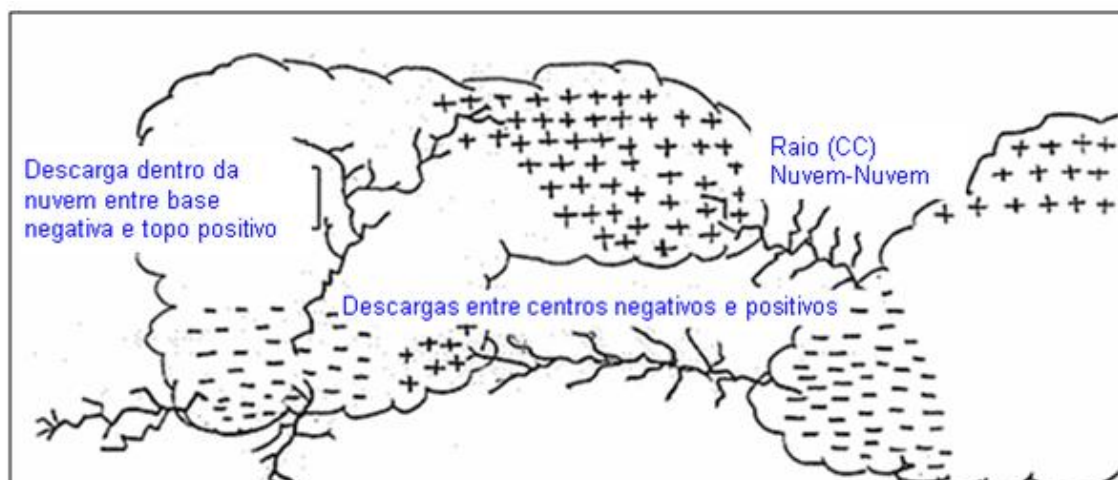


Figura 1: O topo das nuvens, geralmente tem carga positiva. Um raio negativo transporta carga negativa da nuvem para o solo. A descarga de uma área positivamente carregada para o solo produz um raio positivo.

Fonte: Adaptado de Hugh J. Christian (A lightning Primer, NASA)

Um raio geralmente tem aproximadamente 3 a 4 pulsos de corrente, de aproximadamente 40 μ s cada um, mas até 26 pulsos sucessivos no mesmo canal já foram observados. A corrente máxima de um pulso de corrente de raio pode superar 200.000 Ampères. A descarga dura aproximadamente 50 μ s e a potência de pico é aproximadamente 1012 Watts (IRIBARNE & CHO, 1986).

Normalmente há muitos canais ionizados entre as nuvens e a terra porque a atmosfera é um isolante muito bom, pois uma tremenda carga deve ser acumulada antes da descarga elétrica (raio) poder acontecer. Quando o canal ionizado se aproxima do solo, ocorre o aumento do campo elétrico dos objetos próximos do solo. Naquele momento uma ou mais cargas positivas deslocam-se do solo em direção ao canal ionizado (para cima) e o processo tem como resultado um caminho condutivo entre a nuvem e o solo. O canal ionizado é descarregado por uma onda ionizada que se propaga no solo.

Um raio é composto de uma seqüência de sucessivos eventos de pulsos. Cada pulso está geralmente separado por um intervalo de 2 a 100 ms. Algumas vezes os pulsos têm um intervalo de tempo suficiente para ser visível aos olhos humanos, e neste o raio tem a aparência chamejante. A

duração habitual de um flash completo varia de 70 ms a 250 ms e normalmente está composto de cerca de quatro pulsos separados por intervalos de poucos milissegundos.

3.3 SISTEMAS DE DETECÇÃO DE RAIOS

Os sistemas de detecção de raios, em geral, são formados por uma rede de sensores capazes de detectar indiretamente o campo eletromagnético gerado pelo fluxo de corrente de retorno do canal de descarga. Atualmente, há três técnicas para determinar a posição de uma descarga atmosférica: (1) Técnica de determinação da direção da fonte do sinal (DF); (2) Técnica da diferença do tempo de chegada do sinal (TOA ou TDA); e (3) Técnica interferométrica (VISACRO, 2005).

Na técnica de Indicação de Direção, o ponto de incidência da descarga é determinado pelo emprego de um dispositivo constituído por duas bobinas espirais cruzadas ortogonalmente, que são atravessadas pelo fluxo de campo magnético. O dispositivo determina o ângulo de chegada do sinal do campo eletromagnético que está se propagando, e com uma rede desses sensores é possível determinar a localização do ponto de emissão do campo, através da interseção de retas correspondentes às direções de chegada dos sinais em cada estação (VISACRO, 2005).

A Técnica Interferométrica baseia-se na medida das diferenças de fase da onda eletromagnética recebidas por um conjunto de antenas. Cada antena do conjunto mede a onda em uma diferente fase, e essas diferenças de fase estão diretamente relacionadas com a direção de chegada da onda (VISACRO, 2005).

Portanto, a interferência atmosférica faz com que qualquer aparelho receptor de rádio AM seja um dispositivo para detectar raios; posto que qualquer aceleração de carga elétrica emite radiação eletromagnética, e sabendo-se que os vários processos envolvidos na propagação de um raio induzem muito grandes acelerações de carga, o canal do raio atua como um enorme transmissor, enviando radiação com frequência central da ordem de 10 kHz. As descargas atmosféricas podem ser detectadas a distâncias de mais de 3500 km da fonte. Através da exploração dessa característica, tornou-se possível localizar raios nuvem-solo, usando equipamentos de localização direcional de ondas de rádio, e localizar áreas de tempestades ativas em regiões remotas (AMS, 2009).

Uma das principais características dos sensores para detecção de raios é a pluralidade, ou seja, a possibilidade de detectar raios Nuvem-Solo (CG) e Nuvem-Nuvem (CC) em diferentes localizações geográficas e transmitir informação ao processador central da rede. Após a captação dos “sferics” a representação analógica dos pulsos é convertida em sinais digitais. Os dados são transmitidos a um analisador central onde são usados para correlacionar, determinar a localização, a magnitude e a trajetória dos pulsos de raios detectados.

Na Técnica da diferença do tempo de chegada (TOA) as antenas capazes de captar a ocorrência de um raio são projetadas para detectar o sinal do campo eletromagnético de uma descarga de raio e produzir a representação derivada do sinal do campo magnético. A derivada do sinal tem o benefício de reduzir a amplitude da disparidade entre sinais de campos CG e CC. Um filtro é usado para aumentar a razão sinal/ruído, passando as porções de baixa frequência do sinal diferenciado e descartando o ruído de alta frequência sem integrá-los aos componentes principais do sinal.

A amplificação não-linear adicionalmente reduz a amplitude de disparidade entre os sinais CG e CC, provendo maior amplificação dos sinais de mais baixa amplitude, os sinais amplificados e convertidos em uma representação digital. Esta conversão permite que o sinal seja processado e armazenado digitalmente. A representação digital é então integrada por um processador digital para que resulte em um sinal representativo do campo elétrico ou eletromagnético. O sinal de campo digital diferenciado e o sinal representativo do próprio campo são usados pelo processador digital para classificar o evento de raio como um CG (nuvem-solo) ou CC (nuvem-nuvem). A conversão de analógico para digital acoplada ou armazenamento digital da informação, garante a continuidade da detecção e avaliação das descargas de raios, por isso, com pequeno tempo de inatividade. Os dados recebidos pelo analisador central são correlacionados com dados provenientes de outros sensores para determinar a magnitude, localização e o tempo de ocorrência da descarga do raio (MURPHY et al, 2004)

3.4 CLIMATOLOGIA DE RAIOS

Na Indonésia, Hidayat et al (1999) relatou que a densidade de flash anual mais alta foi 16 flashes por $\text{km}^2 \text{ano}^{-1}$. A atividade acontece principalmente pela tarde; e o raio mediano nesta área apresenta descarga de 26 kA. Este estudo também mostrou que as descargas no mar trazem correntes maiores que as descargas na terra.

Na Inglaterra, Scott (1988), Lees (1991) e Popolansky (1972), relataram que o nível médio mais alto é em torno de 2,5 raios por $\text{km}^2 \text{ano}^{-1}$. A corrente média de pulso 25 kA e a corrente mediana é 33 kA. Há regiões, no litoral, onde a descarga média é maior que 50 kA e pode atingir 100 kA. Nas correntes próximas da média, a probabilidade de um pulso ser de polaridade positiva é aproximadamente 0,25. Para um pulso de solo de 100 kA a probabilidade é aproximadamente 0,5. Os raios que ocorrem em regiões centrais têm uma probabilidade de 20% a 30% de ser de polaridade positiva. Pelo inverno há um maior número de pulsos positivos registrados.

No Japão, Shindo & Yokoyama (1998) encontraram uma relação entre o número de dias de tempestades e o número de pulsos, entretanto essa relação muda conforme a estação, sendo portanto, difícil expressar esta relação em uma simples fórmula.

Na Austrália Diendorfer, Schulz, e Rakov (1988) indicaram que os pulsos maiores são precedidos por intervalos mais longos. A duração média de um flash é 175 ms, é semelhante à duração de flash típica encontrada na literatura. Os parâmetros dos raios mostraram uma grande dispersão em diferentes dias de temporal.

No estudo de Zajac e Rutledge (2001) foi relatado que nas regiões litorais do sudeste dos Estados Unidos concentravam-se os máximos de densidades de flashes e dias de raio. Observaram que durante o verão foi produzida maior fração de raios negativos em relação a raios positivo, e o ciclo diário de raios positivos se retardava com relação ao o início do ciclo diário de raios negativos em até duas horas. A atividade de raio negativa foi produzida depois do verão e durante a noite, por sistemas de convectivos mais maduros e organizados em linhas ou agrupamentos.

Na China, Chen *et al*, (2004) chegaram às seguintes conclusões: (a) foi achada correlação entre o numero anual de dias de raio e o número de dias de tempestade; (b) foi desenvolvida uma equação de regressão que estimava o número de desligamentos de linhas de transmissão a partir da densidade de raios; (c) os raios apresentaram entre 20 kA a 80 kA .

No Canadá, Kochtubajda, Burrows e Power (2007) estudaram raios com alta intensidade de corrente. Os resultados do estudo mostraram os raios de alta corrente tiveram as seguintes características: (a) 52% deles são de polaridade positiva; (b) a maioria dos raios nos meses de inverno foi detectada ao longo da costa do Pacífico e na região temperada no leste do Canadá; (c) no geral, a maior parte dos raios ocorre no verão; (d) quanto a multiplicidade os raios positivos são de um simples pulso e os raios negativos são tipicamente de múltiplos pulsos, exceto no Ártico; (f) os raios com multiplicidade ≥ 10 são associados com flashes negativos em todas as estações exceto no inverno; (g) a distribuição diária mostrou que a maioria dos raios ocorreu entre o cair da tarde e o início da noite; (h) os raios negativos mais fortes (-598 kA) ocorreram na primavera, porém, no verão houve ocorrência de +596 kA.

3.5 RAIOS NA AMAZÔNIA

O estudo dos raios no Brasil, um país de grande extensão territorial e localizado em região tropical, teve início na década de 1970 (Araújo et al, 1990). Na região Amazônica, os estudos pioneiros de Serra (1977) e Nechet (1994) mostraram que esta região tem atividade cerâmica (quantidade de dias de trovoadas por ano) acima da média mundial. Um marco importante para o estudo dos raios na Amazônia foi a implantação do sistema LLP (Lightning Location and Protection) TSS 430, através de uma parceria entre a UFPA e o INPE. Esta iniciativa possibilitou determinação

de características de campos elétricos e magnéticos e distribuições temporais (SOUZA et al, 1997; ROCHA et al, 1997).

O estudo de Almeida et al. (2007) realizado na região da cidade de Belém-PA, no período de janeiro a março de 2007, constatou a associação entre características de raios e chuvas com precipitação maior que 40 mm. Este trabalho utilizou dados emitidos pela rede RDR/SIPAM. Entre os resultados mais expressivos observou-se que o máximo (pico) das ocorrências de raios e de intensidade de chuva ocorreu em intervalos que variaram entre 20 a 70 minutos antes da ocorrência de uma tempestade severa.

Em outro estudo Rocha et al. (2007) selecionou quatro localizações no leste da Amazônia (São Luiz, Belém, Paragominas e Tucuruí). A escolha dessas localizações teve o intuito de representar localizações na interface oceano-continente, uma área urbana, uma região de agricultura e uma região de floresta próxima a um lago artificial. Os resultados mostraram que a incidência de raios decresceu substancialmente na seqüência: Paragominas, Belém, Tucuruí e São Luiz. Também foi constatada a associação da incidência de raios com o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical. Muitos outros estudos se seguiram sob o patrocínio de projeto CELPA/ANEEL, entre os quais se insere esta Dissertação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da distribuição de raios no leste da Amazônia foi realizado a partir da elaboração de mapas de densidade de ocorrências. Esses mapas expressam a densidade de raios na região de estudo, a qual foi delimitada como uma região retangular de dimensões (10° latitude x 10° longitude), delimitada pela coordenadas: 0° a 10° S e 53° a 43° W, é equivalente a uma superfície de aproximadamente 1,10 milhões de km^2 .

Os mapas apresentados nesse trabalho são a expressão visual de uma matriz (100 linhas x 100 colunas). Cada elemento da matriz (linha x coluna) corresponde a um ponto (x,y) do mapa, onde x representa a longitude e y representa a latitude. Os valores de x variam de -53,0 a -43,0 e representam as longitudes da região de estudo. Os valores de y variam de -10 a 0 (zero) e representam as latitudes da região de estudo. Internamente, na matriz, cada Ponto (x,y) contém a representação numérica da quantidade de raios na respectiva posição do mapa. A quantidade de raios em um Ponto (x,y) resultante de uma equação. Essa equação serviu de fundamento para o desenvolvimento de um software o qual gera os mapas da distribuição de descargas atmosféricas na região de estudo.

4.1 AS TRÊS PREMISSAS PARA ELABORAR O MODELO

Para elaborar o modelo de estimação da atividade cerâmica na região foram adotadas três premissas, as quais foram elaboradas a partir de levantamento bibliográfico e do registro da ocorrência de raios pela RDR/SIPAM e pela rede STARNET.

4.1.1 A primeira premissa: a região de máxima eficiência

Admite-se que dentro da área de cobertura da RDR/SIPAM existe uma região onde a rede opera com máxima eficiência.

4.1.2 A segunda premissa: a região de valores mais confiáveis

Admite-se que dentro da região de máxima eficiência a quantidade de raios detectados pela RDR/SIPAM atinge os valores mais confiáveis. Para fora dessa região os níveis de detecção decaem sistematicamente.

4.1.3 A terceira premissa: a estabilidade da STARNET

Admite-se que o a rede STARNET apresenta maior confiabilidade no que se refere a variabilidade espacial da incidência de raios na região Amazônica. Essa rede apresenta igual sensibilidade à atividade cerâmica em toda a região onde se desenvolveu esta pesquisa.

4.2 DADOS DA REDE STARNET

O Sistema STARNET realiza detecção e localização de raios. Os dados de raios são obtidos a partir de sensores que captam os "sferics" localizados em treze estações terrestres espalhadas nos continentes Europeu, America Central, Africano e no Brasil. A atividade cerâmica que ocorre em uma grande parte do globo é continuamente monitorada em diferentes níveis de precisão espacial, por exemplo, 10/20 km no interior da rede e >50 km na periferia da parte externa da rede. A rede possui alta resolução temporal (1 msec). O tempo é determinado pela diferença do horário de chegada (ATD) entre as séries temporais a partir de pares dos receptores.

Os "sferics", são os ruídos eletromagnéticos emitidos por um relâmpago, em frequência muito baixa (VLF), espectro entre 7 e 15 kHz. Na banda VLF do espectro de radiofrequências os "sferics" são ondas que se propagam por milhares de quilômetros entre a superfície terrestre e a ionosfera.

Cada receptor registra o campo elétrico vertical como uma série temporal que representa a onda (sferic), e inclui um registro de tempo sincronizado pelo relógio do Sistema de Posicionamento Global (GPS). A diferença de tempo de chegada (ATD) entre as séries temporais a partir de pares de receptores é extraída por correlação de tempo. Cada par de receptores produz uma elipse da localização de pontos sobre a superfície da terra para o localização relâmpago. Essa elipse é formada com base na diferença do tempo de chegada. Os receptores estão situados em: Birmingham (Reino Unido), Roskilde (Dinamarca), Iasi (Roménia), Larnaka (Chipre) e Évora (Portugal), Addis Abeba (Etiópia), Dar es Salaam (Tanzânia), Bethelém (África do Sul), Osun State (Nigéria), Dakar (Senegal), em Guadalupe, Fortaleza (Brasil) e São Paulo (Brasil), conforme mostra na Figura 2.



Figura 2: Localização dos sensores de VLF da rede STARNET e a região de estudo (retângulo azul).

Fonte: Morales et al. (2007).

4.2.1 Formato dos dados do Sistema STARNET

Os arquivos emitidos pelo Sistema STARNET são padronizados em formato ASCII, onde os campos de dados são separados por espaços, e cada arquivo fornece dados de um período de 15 minutos. Abaixo está o modelo de dados do Sistema STARNET. Cada coluna no arquivo de dados ZEUS é definida como abaixo.

Coluna 1: ano

Coluna 2: mês

Coluna 3: dia

Coluna 4: hora (GMT)

Coluna 5: minuto

Coluna 6: segundo

Coluna 7: milissegundo

- Coluna 8: latitude
- Coluna 9: longitude
- Coluna 10: maior elipse de erro da solução do ATD (em metros)
- Coluna 11: ATD erro em micro-segundos
- Coluna 12: Controle de qualidade (0,1,2)
- Coluna 13: Número de Rx (receptores) empregados na solução (4,5,6,7)
- Coluna 14: Número de pares de ATD empregados na solução (6-21)
- Coluna 15: Receptor do Reino Unido (não usado)
- Coluna 16: Receptor da Dinamarca (não usado)
- Coluna 17: Receptor da Romênia (não usado)
- Coluna 18: Receptor da Grécia (não usado)
- Coluna 19: Receptor da Itália (desabilitado)
- Coluna 20: Receptor de Portugal
- Coluna 21: Receptor da Etiópia
- Coluna 22: Receptor da Tanzânia
- Coluna 23: Receptor da África do Sul
- Coluna 24: Receptor da Nigéria
- Coluna 25: Receptor do Senegal (desabilitado)
- Coluna 26: Receptor de Guadalupe (Ilha francesa no Caribe)
- Coluna 27: Receptor de Fortaleza-Brasil
- Coluna 28: Receptor de São Paulo-Brasil

4.3 DADOS DA RDR/SIPAM

A RDR/SIPAM é uma rede de detecção de raios cujo nodo central localiza-se na sede do projeto SIPAM em Belém-PA. Inicialmente, a rede funcionou com 12 (doze) sensores de raio e um processador central. O RDR/SIPAM registra o tempo, local, polaridade, corrente de pico do primeiro pulso de retorno, multiplicidade (número de pulsos de retorno por relâmpago) de flashes dos tipos CG e CC que ocorrerem sobre a região norte do Brasil, ver Figura 2.

O RDR/SIPAM sofreu uma atualização desde que ficou operacional em 2004. A mais recente atualização foi executada em outubro de 2006 para aumentar a eficiência de detecção de flashes fracos (tão baixo quanto 5 kA) e diminuir erros de localização. A atualização da RDR/SIPAM melhorou desempenho de rede, e a eficiência de detecção aumentou de 65% a 80% para 80 a 90%. A eficiência de detecção da rede é maior que 80% dentro da região central da rede, para as bordas do sistema a eficiência de diminui rapidamente.

A Rede de Detecção de Raios do SIPAM (RDR) é composta por 12 sensores LPATS IV manufaturados pela Empresa VAÍSALA, instalados no Leste da Amazônia cobrindo parte dos estados do Pará, Maranhão e Tocantins. Os dados das diferenças de tempos de chegada (ATD) dos sinais nos detectores, são retransmitidos para a estação integradora, com processador de rede CP 8000, situada em Belém. Através do software CP 8000, planilhas com informações detalhadas de cada evento são geradas para análise.

Tabela 1: Localização dos sensores da RDR/SIPAM

Localidade	UF	Latitude	Longitude
Barra do Corda	MA	05° 30' 29" S	045° 14' 41" W
Imperatriz	MA	05° 31' 50" S	047° 27' 30" W
Carolina	MA	07° 20' 01" S	047° 26' 02" W
Bom Jardim	MA	03° 32' 33" S	045° 35' 40" W
São Luis	MA	02° 30' 7" S	044° 16' 58" W
S. F. do Araguaia	MT	11° 37' 54" S	050° 41' 18" W
Redenção	PA	08° 01' 50" S	049° 58' 50" W
Belém	PA	01° 24' 43" S	048° 27' 39" W
Tucuruí	PA	03° 50' 2" S	049° 40' 39" W
Breves	PA	01° 41' 36" S	050° 28' 40" W
Paragominas	PA	03° 0' 25" S	047° 20' 24" W
Parauapebas	PA	06° 4' 19" S	049° 54' 15" W
Natividade	TO	11° 42' 00" S	047° 45' 00" W

Fonte: SIPAM

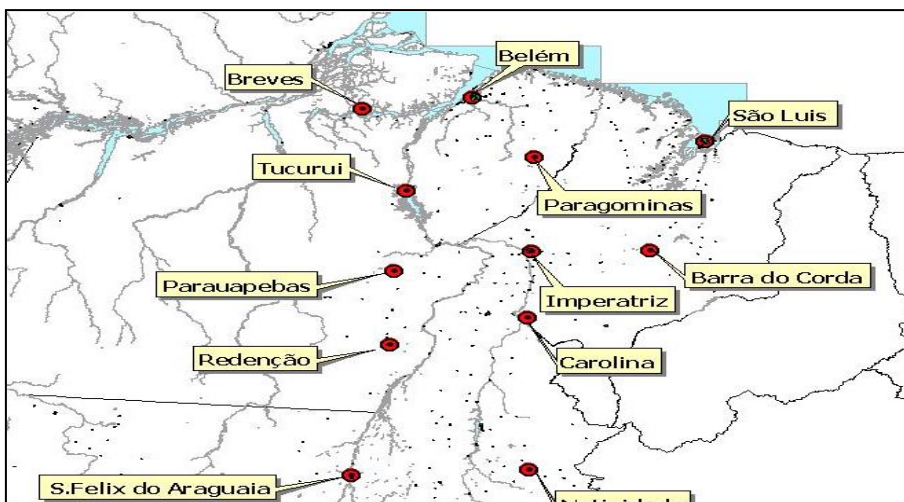


Figura 3: Distribuição espacial dos sensores LPATS IV – VAISALA, da rede RDR/SIPAM.

Fonte: Rocha et al. (2007)

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

O INPE, Furnas e Eletronorte, órgãos parceiros do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM), contribuem para a manutenção e operacionalização dos sensores em campo, auxiliando no processamento dos sinais que alimentam pesquisas da área de meteorologia.

4.3.1 Estrutura dos dados da RDR/SIPAM

Os arquivos emitidos pela RDR/SIPAM são padronizados em formato ASCII, onde os campos de dados são separados por espaços, e cada arquivo fornece dados de um tempo de 24 horas. Abaixo está o modelo de dados da RDR/SIPAM. Cada coluna no arquivo de dados da RDR/SIPAM é definida como abaixo.

Coluna 1: Data

Coluna 2:	Hora
Coluna 3:	Longitude
Coluna 4:	latitude
Coluna 5:	Em branco
Coluna 6:	Azimute
Coluna 7:	Em branco
Coluna 8:	Intensidade de corrente
Coluna 9:	Em branco
Coluna 10:	Qui-quadrado
Coluna 11:	Tam semi-eixo menor
Coluna 12:	Graus de liberdade
Coluna 13:	Semi-eixo maior (Km)
Coluna 14:	Distância do ponto dental do raio
Coluna 15:	Distância normalizada do sinal
Coluna 16:	Tempo de subida (mseg)
Coluna 17:	Taxa máxima de subida
Coluna 18:	Peak-to-zero
Coluna 19:	Erro do ângulo de orientação
Coluna 20:	Qui-Quadrado do pulso
Coluna 21:	semi-eixo maior (km)
Coluna 22:	Número de sensores
Coluna 23:	Tipo de raio

4.4 ELABORAÇÃO DO MODELO DE CORREÇÃO DO SISTEMA STARNET COM BASE NA RDR/SIPAM

A equação que estima a quantidade de raios incidentes na Região de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ foi denominada Equação S18. Essa equação foi obtida a partir de um modelo de regressão quadrática. A elaboração da equação foi realizada em três etapas.

Etapa 1. Determinar a região de maior eficiência da RDR/SIPAM;

Etapa 2. No intervalo de datas entre os anos de 2006 a 2008, identificar os dias quando as duas redes estiveram operando em condições normais;

Etapa 3. Dentro da região de maior confiabilidade da RDR/SIPAM e dentro do conjunto dos dias nos quais as duas redes operaram em condições normais, determinar quais os dias nos quais as duas redes apresentaram atividade cerâmica com variabilidades aproximadamente iguais (ou mais aproximadas). Os quantitativos de raios observados pelas duas redes nessa região, nesses dias, foram usados para formar um modelo de regressão que originou a Equação S18.

4.4.1 Etapa 1: A região de maior eficiência da RDR/SIPAM

A partir dos dados emitidos pelo RDR/SIPAM foram elaborados mapas cerâmicos, pelo sistema SIAM/S18 (Figura 3), os quais mostram a distribuição da incidência de descargas atmosféricas, na região em estudo, no mês de dezembro de 2008. A Figura 3 mostra que há uma região, no centro da figura, onde a Rede RDR/SIPAM aponta maior atividade cerâmica. Na região entre as latitudes -4° a -6° e as longitudes -50° a -47° . Este estudo admitiu que essa distribuição da atividade cerâmica poderia ser conseqüente da topologia da rede, ou seja, a área de alcance dos sensores estaria possibilitando a maior sensibilidade da rede naquela região.

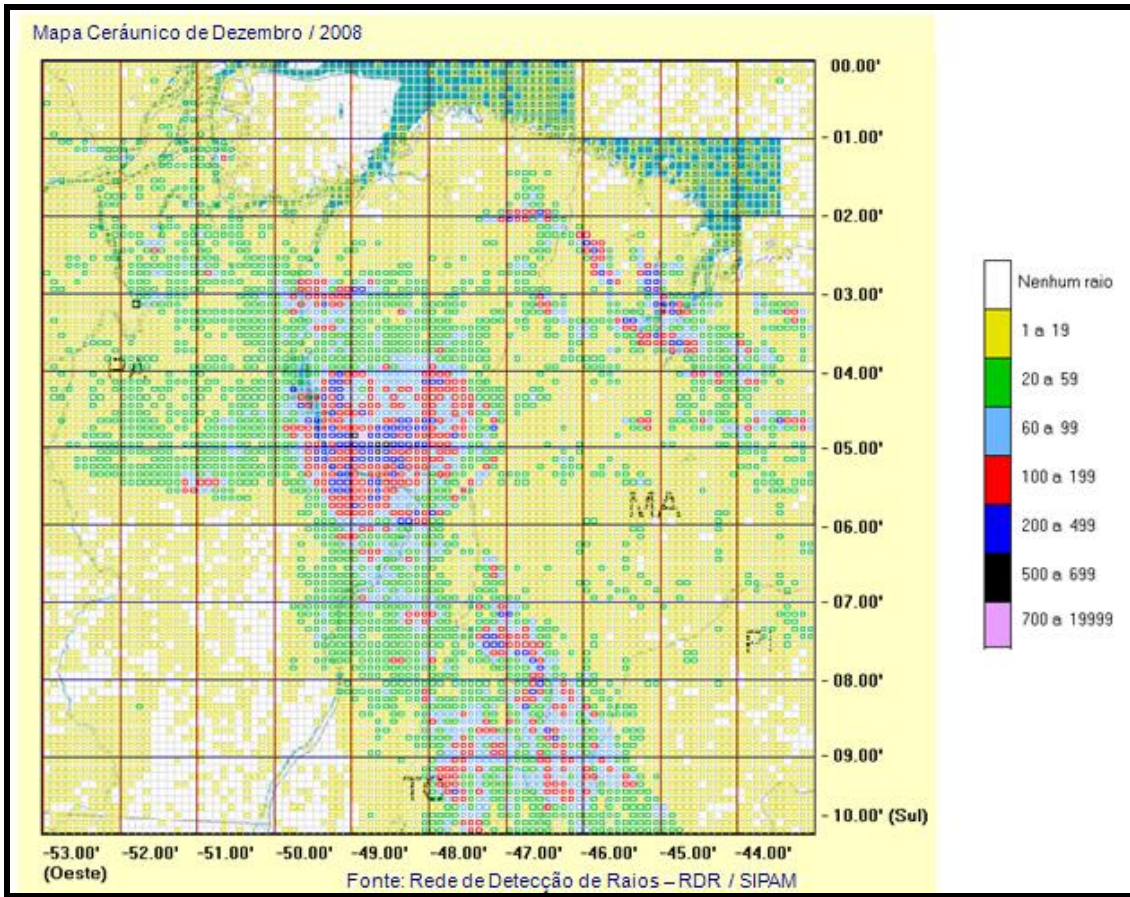


Figura 4: Mapa de densidade de raios, referente a dezembro de 2008, emitido pelo Sistema SIAM\S18 com base em dados da RDR\SIPAM.

A região de maior eficiência da RDR/SIPAM foi identificada a partir do trabalho de Souza et al. (2008), o qual através de um modelo desenvolvido no software Matlab demonstrou a sensibilidade relativa, a partir de dados coletados durante 1 (um) ano de funcionamento da RDR/SIPAM, no qual o status de funcionamento do sistema variou de 5 a 12 sensores ativos.

A partir da constatação que havia uma região maior de detecção de atividade cerâmica, mostrada nos mapas cerâmicos, e que essa mesma região coincidia com aquela coberta por 4 ou mais sensores, então foi escolhida como referencial para este estudo, a região retangular -3° a -6° (latitude) e -49° a -47° (longitude), como pode ser observado o retângulo pontilhado azul na Figura 4.

Para delimitar a área que apresentasse em melhores condições a correspondência entre os sistemas RDR/SIPAM e Sistema STARNET o critério escolhido foi identificar a região que apresentasse cobertura por pelo menos sete sensores da RDR/SIPAM, portanto foi escolhida a região com área de 440 mil km^2 delimitada pelas Latitudes -3° e -5° e as Longitudes -49° e -47° . Essa região tida como área de máxima eficiência do sistema RDR/SIPAM foi previamente escolhida, tendo as

condições ideais para aquisição dos dados que serviriam de base para montagem da equação de correspondência entre os dois sistemas de detecção de raios.

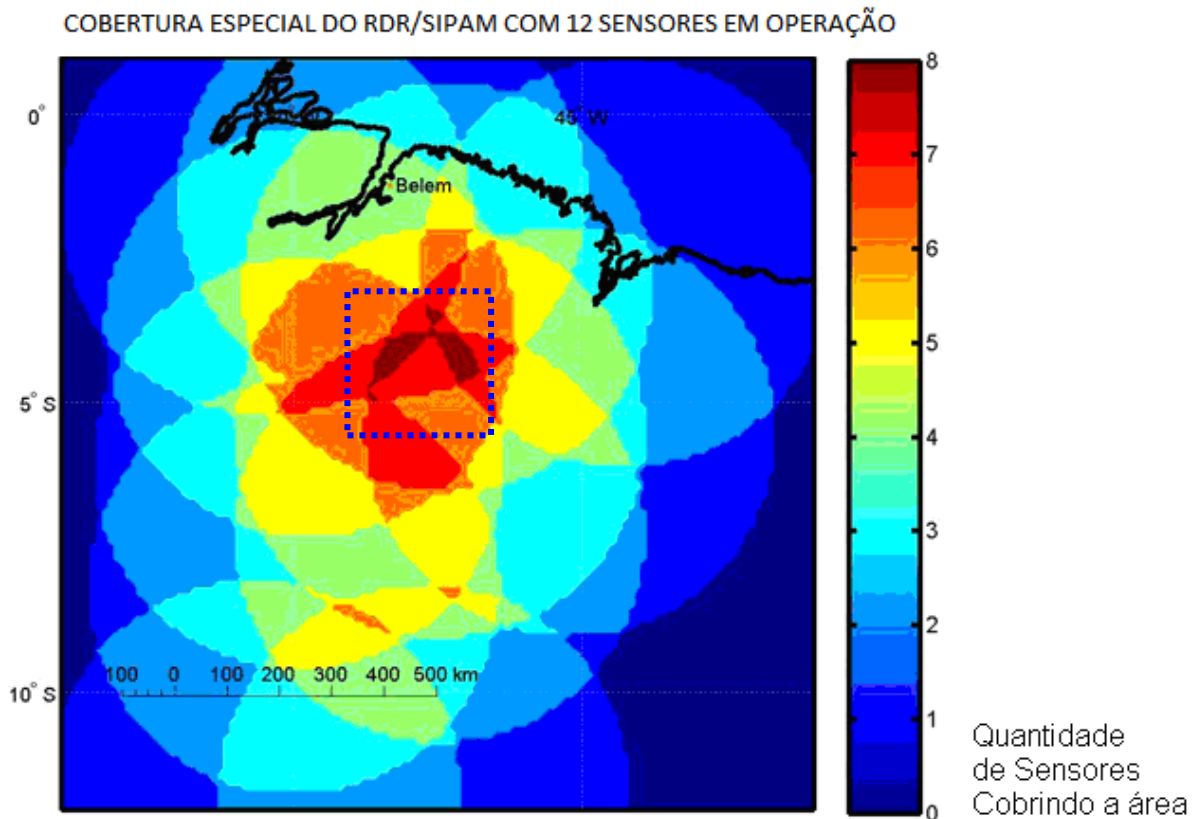


Figura 5: Máximo desempenho operacional da RDR/SIPAM, com 12 sensores operando normalmente. A cor vermelha indica a região com cobertura de 7 ou mais sensores. As bordas (cor azul) perdem confiabilidade de localização de eventos. O retângulo (azul pontilhado) representa uma região de máxima eficiência da RDR/SIPAM

Fonte: Souza et al. (2008),

Visto que a região de máxima eficiência estava determinada, foram realizadas várias contagens, as quais indicavam que nesta pequena região a RDR/SIPAM seria mais sensível a atividade cerâmica que a rede STARNET, portanto, a quantidade de raios apontados pela RDR/SIPAM, em pleno funcionamento, seria o valor mais aproximado do real nível de atividade cerâmica da região. Esta dedução tornaria possível realizar a correção do quantitativo de raios a rede STARNET tomando como base os dados da RDR/SIPAM. O próximo passo foi, dentro dessa região de máxima eficiência, determinar quais os dias nos quais as duas redes estiveram operando em condições favoráveis, para que fosse possível formar pares (x,y). Neste par a abscissa (x) seria a quantidade de raios detectados pelo Sistema STARNET e a ordenada (y) seria a quantidade de raios detectados pela RDR/SIPAM.

4.4.2 Etapa 2: As duas redes operacionais entre 2006 a 2008

No intervalo de tempo entre 1/out/2006 e 31/dez/2008, foram decorridos 822 dias, dentro desse período a RDR/SIPAM apresentou-se operacional em 603 dias (73,3%). Com o objetivo de realizar a comparação entre os dados das duas redes, foi realizada busca por dados da rede STARNET nas mesmas datas, nas quais já havia dados disponíveis da RDR/SIPAM. Entretanto, não seria suficiente somente haver dados da rede STARNET no mesmo dia, seria necessário que o arquivo disponibilizado pela rede STARNET mostrasse, suficientemente, que o Sistema STARNET operou satisfatoriamente durante todo o dia.

Os dados provenientes da rede STARNET foram obtidos a partir de arquivos disponibilizados no site www.zeus.usp.br. Os arquivos diários são disponibilizados em formato compactado. Após a descompactação dos arquivos diários foi realizada verificação da consistência interna desses arquivos diários. A verificação da consistência interna é realizada a partir da seguinte regra: a rede STARNET gera um novo arquivo a cada 15 minutos, portanto em um dia normal devem ser gerados 96 arquivos. Logo, todos os dias que não apresentaram 96 arquivos foram excluídos por ser considerado que nestes dias a rede STARNET não funcionou em condições operacionais plenamente comparáveis com a RDR/SIPAM na região de máxima eficiência. Por conseguinte, foram considerados somente os 147 (17,8%) melhores dias, nos quais a rede STARNET apresentou todos os arquivos referentes a 24 horas/dia de operação.

No final, constatou-se que dentre os 147 melhores dias de funcionamento da STARNET houve 102 dias (12,4% do período e 822 dias) nos quais as duas redes operaram simultaneamente, em idênticas condições de funcionamento. Somente os arquivos de dados dessas datas foram inseridos no banco de dados que serviu de *input* (entrada de dados) para construir o modelo de correção da rede STARNET com base nos dados da região de maior eficiência da RDR/SIPAM.

U = {822 dias}, de 1/out 2006 a 31/dez/2008.

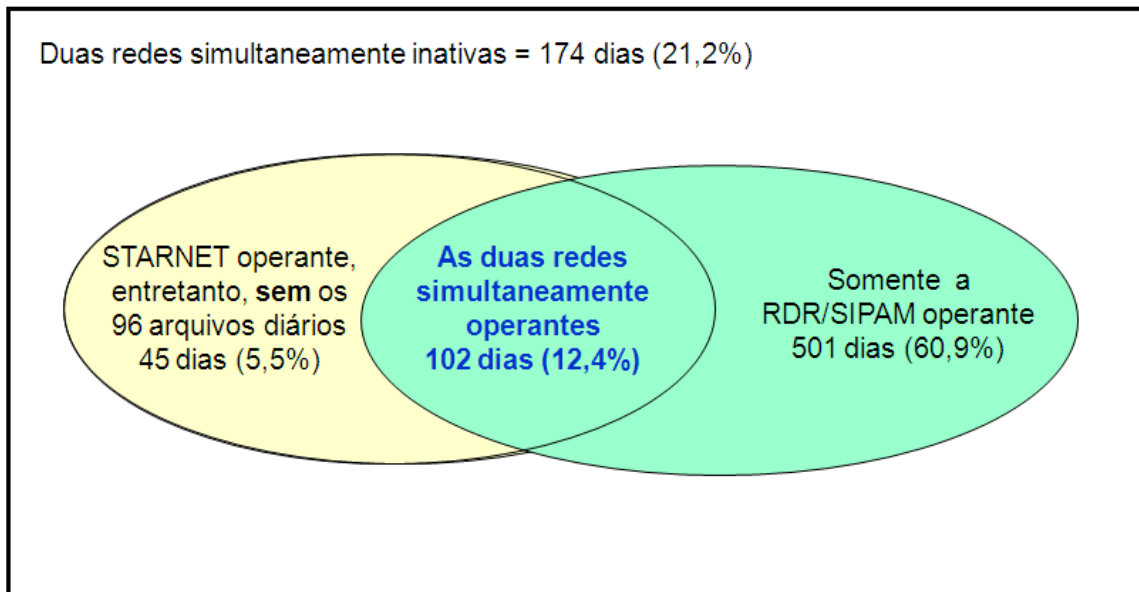


Figura 6: Em 822 dias, entre 1/out/2006 a 31/dez/2008, houve 102 dias (12.4%) nos quais as duas redes estiveram em condições operacionais satisfatórias. Em cada um desses 102 dias, os arquivos de dados emitidos pelas duas redes estavam consistentes, portanto indicando que não houve significativas interrupções no funcionamento das duas redes, no respectivo dia, considerando-se a somente região de abrangência da máxima eficiência da RDR/SIPAM.

4.4.3 Etapa 3: Duas redes com variabilidades aproximadas.

Para realizar a comparação das variabilidades entre as duas redes, os dados foram pareados conforme o dia. Foi montada uma planilha com duas colunas, as quais representavam a quantidade de raios naquele dia, na região de máxima eficiência da RDR/SIPAM. A primeira coluna indicava a data, a segunda coluna continha a quantidade de raios apontados pela RDR/SIPAM, e a segunda coluna apresentava também a quantidade de raios indicados pela rede STARNET.

A Figura 7 mostra que dentro do conjunto formado pelos 102 dias nos quais as redes estiveram simultaneamente operacionais, houve 46 dias que foram excluídos do estudo; nesses dias, pelo menos uma das redes não detectou raios (zero raios) na região de máxima eficiência da RDR/SIPAM, logo, os dados referentes a esses dias foram excluídos da planilha. Portanto, restaram 56 dias (6.8%) nos quais as duas redes apresentaram presença de raios na região de máxima eficiência da RDR/SIPAM.

U = {822 dias}, de 1/out 2006 a 31/dez/2008.

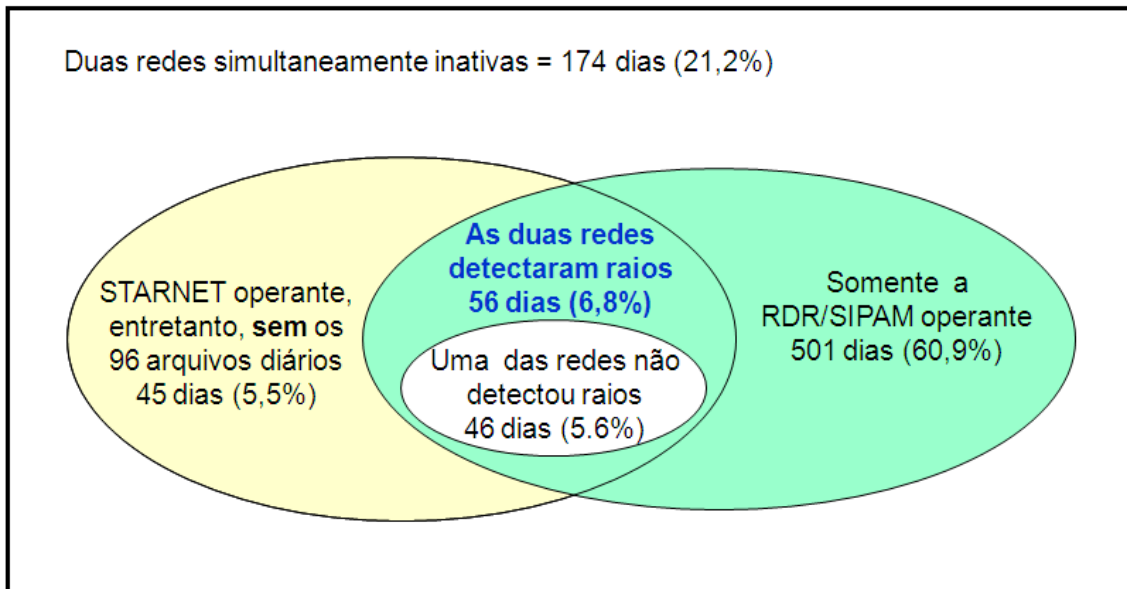


Figura 7: Diagrama Venn, ilustra que apenas 56 dias, ou seja, 6,8%, do período entre 1/out/2006 a 31/dez/2008 (822 dias) as duas redes apresentaram contagem de pelo menos 1 (um) raio na região de máxima eficiência da RDR/SIPAM.

Para avaliar quando as duas redes apresentavam alta concordância de resultados, foi especificado que a concordância seria relativa, medida em termos de desvios interquartílicos em torno da mediana. Este método foi adotado visto que, nos 56 dias, as duas distribuições (RDR/SIPAM e rede STARNET) não apresentaram distribuição compatível com a curva de Gauss.

Tabela 2: Estatística descritiva das quantidades de raios detectados pelas redes RDR/SIPAM e rede STARNET, nos 56 dias quando as duas redes, indicaram presença de pelo menos 1 (um) raio na região de maior eficiência da RDR/SIPAM, (n=56 dias).

	RDR/SIPAM	Sistema STARNET
Mínimo	5	1
Máximo	20279	468
Mediana	303	14
Primeiro Quartil	60	2
Terceiro Quartil	1342	75

Média Aritmética	1648	65
Desvio Padrão	3676	112
Erro Padrão	491	15
Coefficiente de Variação	223%	172%
p-valor (normalidade)	<0.001	<0.001

Fonte: Protocolo da pesquisa.

O passo seguinte foi elaborar uma fórmula de padronização dos resultados. O procedimento de padronização, clássico, consiste em aplicar a fórmula abaixo:

$$Z = (\text{Observado} - \text{Média paramétrica}) / \text{Desvio Padrão Paramétrico}$$

Visto que a distribuição da variável aleatória Quantidade de Raios Detectados não foi compatível com a distribuição normal. Esta avaliação foi realizada separadamente para as duas redes de detecção de raios. Foi aplicado o teste de D'Agostino-Pearson (AYRES et al, 2007, p.67) o qual resultou em p-valor <0,001* para as duas redes. Em decorrência da variável aleatória não apresentar distribuição normal, foi adotada uma forma diferenciada de padronização dos dados, logo, a fórmula de obtenção do valor padronizado sofreu as seguintes alterações: a Média Paramétrica foi substituída pela Mediana e o Desvio Padrão Paramétrico foi substituído pelo Desvio Interquartilico

$$\text{Padronizado} = (\text{Observado} - \text{Mediana}) / (\text{Desvio Interquartilico})$$

Portanto, nesta abordagem, a padronização não é expressa em Escores Z, mas sim, em valores múltiplos do Desvio Interquartilico.

Fica implícito: os dias nos quais as duas redes apresentarem menores diferenças entre os valores padronizados, esses são os dias nos quais as redes tiveram a mesma variação (variação relativa), portanto, ainda que difiram em valores absolutos, elas (as redes) concordaram no que se refere a variabilidade da atividade cerâmica.

Para o critério de seleção dos dias de maior concordância entre as redes foi previamente determinado que somente entrariam no modelo de regressão os dias que apresentassem níveis ótimos de concordância, ou seja, as que apresentarem menor diferença entre os valores padronizados das duas redes. O valor de corte foi estabelecido arbitrariamente em 0.90, ou seja, foi obedecida a regra abaixo:

Diferença Padronizada = Padronizado RDR/SIPAM – Padronizado STARNET

Se **Diferença Padronizada** > 0,45, então **DIA REJEITADO**

Se **Diferença Padronizada** ≤ 0,45, então **DIA ACEITO NO MODELO**

Após a aplicação do critério seleção dos dias de maior concordância entre as redes restaram apenas 39 dias os quais apresentaram níveis ótimos de correspondência, conforme todos os critérios já expostos neste estudo.

U = {822 dias}, de 1/out 2006 a 31/dez/2008.

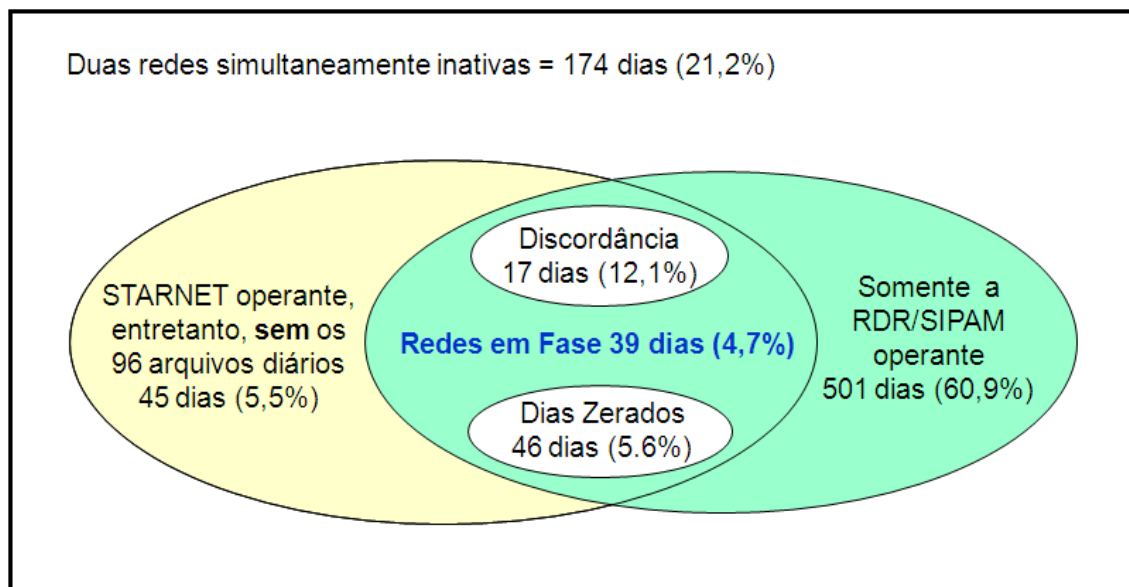


Figura 8: Considerando-se o número de raios detectados na região de maior eficiência da DRD/SIPAM, as duas redes apresentaram maior similaridade de variação em 39 dias, ou seja, 4.7%, do período entre 1/out/2006 a 31/dez/2008 (822 dias) foram considerados ótimos representantes da correspondência entre as duas redes.

4.4.4 Etapa 4: Elaborar as equações

Para determinar as equações de regressão, os pares ordenados (x,y) foram submetidos ao programa de ajuste de curvas do software BioEstat versão 5 (AYRES et al, 2007); os dados fornecidos ao software foram duas colunas, onde a primeira coluna da rede STARNET representa a variável independente (x), e a segunda coluna da RDR/SIPAM representa a variável dependente (y).

A Tabela 3 mostra o resultado do ajustamento de curvas, o qual abriu possibilidade de quatro tipos de modelos: (a) regressão linear; (b) regressão exponencial; (c) regressão logarítmica; (d) regressão geométrica. Todos os modelos apresentaram regressões estatisticamente significantes (p-valor < 0.0001*). Entretanto, o modelo de regressão geométrica ($Y' = a * X^b$) foi considerado o melhor, devido a dois motivos: o primeiro foi que o modelo geométrico apresentou o máximo ajuste aos dados, visto que o coeficiente de Regressão ($R^2 = 77.2\%$) foi o mais alto entre os modelos avaliados, o segundo motivo foi porque o intercepto do modelo geométrico (24,8) foi considerado o melhor pois reduz o valor estimado pelo modelo quando a detecção da STARNET na área considerada tende a zero.

Tabela 3: Estimação da quantidade de raios da RDR/SIPAM conforme a quantidade de raios da rede STARNET, em uma amostra de 39 dias em condições ideais de correspondência entre as duas redes.

	Regressão			
	Linear	Exponencial	Logarítmica	Regressão Geométrica
Tamanho amostral	39	39	39	39
Intercepto (a)	204,4	92,2	-230,5	28,4
Coef. regressão (b)	7,6	0,011	399,3	0,7
Coeficiente R2	76,6%	52,7%	63,6%	77,2%
Média (X) Sistema STARNET	84,9	84,9	15,1	15,1
Média (Y) RDR/SIPAM	854,1	234,1	854,0	234,1
Equação	$Y' = a + bX$	$Y' = a * e^{(bX)}$	$Y' = a + b * \ln(X)$	$Y' = a * X^b$
p-valor (do modelo)	p < 0,0001	p < 0,0001	p < 0,0001	p < 0,0001

Fonte: protocolo da pesquisa.

A Equação denominada S18, é apresentada abaixo:

$$Y' = 28,4 * STARNET^{0,7}$$

Esta equação é baseada em uma regressão geométrica. O coeficiente Y' é o estimador da incidência de raios na região e o p-valor $< 0,0001$ indica que o modelo de regressão é estatisticamente significativo .

Os dados da RDR\SIPAM, na região de maior eficiência, foram utilizados apenas para o ajuste do modelo de regressão geométrica. Cientes do fato que a rede STARNET apresenta a mesma condição operacional em toda a região de estudo, logo, conclui-se que é possível estimar atividade cerâmica para toda a Região $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (Latitude de 0° a -10° e Longitude -53° a -43°) com base apenas na equação de regressão geométrica denominada Equação S18. Portanto, para elaboração dos mapas de densidade de raios a única entrada requerida (input do sistema) ficou sendo a quantidade de raios detectados pela rede STARNET.

A Figura 9 abaixo mostra duas curvas que ilustram a quantidade de raios na região de maior eficiência da RDR/SIPAM. A primeira curva (azul) representa a quantidade de raios detectados pela RDR/SIPAM nesta região. A segunda linha (vermelha) representa a quantidade de raios estimada pela Equação S18.

Para a região de 1,10 milhões de km^2 O erro do modelo varia de 702 (mínimo) a -2225 (máximo). O erro médio do modelo é $-113,8 \pm 493$ raios. Essas medidas de erro equivalem ao erro médio de $-1,06$ raios/ km^2 e o erro quadrático médio foi 746,67.

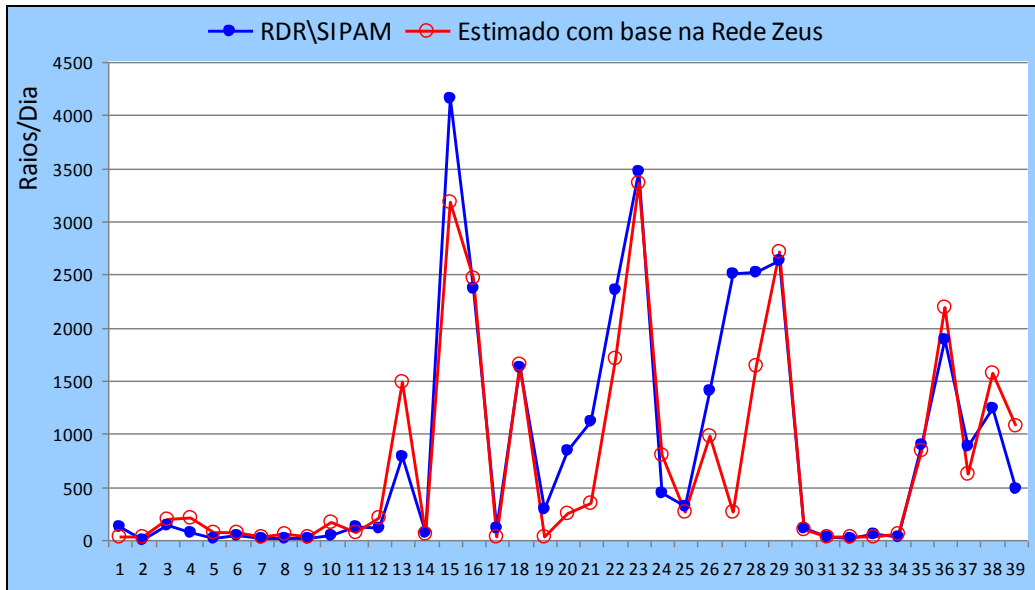


Figura 9: Valores estimados com base na Equação S18, ($Y'=28.4 * X^{0.7}$), onde X é o número de raios da rede STARNET e Y' é a estimativa do número de raios corrigido pela máxima eficiência da RDR/SIPAM..

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTUDO DE CASO 1

RAIOS E SISTEMAS METEOROLÓGICOS REGIONAIS DE LARGA ESCALA

5.1.2 Caracterização da ZCIT e da ZCAS

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma banda de nuvens convectivas que se estende em uma faixa ao longo da região equatorial, formada pela confluência dos ventos alísios de nordeste com os ventos alísios de sudeste. A convergência desses ventos faz com que o ar quente e úmido da baixa atmosfera ascenda levando a umidade dos oceanos para níveis mais altos da atmosfera, favorecendo assim, a formação de nebulosidade. Portanto, é o sistema que exerce maior influência sobre a geração de precipitação sobre a região equatorial dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, e em especial no Norte e no Nordeste do Brasil (SOUZA & NOBRE, 1998)

A ZCIT migra sazonalmente, em anos considerados normais, de sua posição mais ao norte (em torno de 14°N), durante agosto – setembro, para sua posição mais ao sul (em torno de 2° S a 5° S), durante março – abril. Tem papel importante na determinação da estação chuvosa do norte da região Nordeste. Em anos chuvosos, a ZCIT pode atingir até 5° S, perto da costa nordestina e proporcionar elevados totais de precipitação, conforme observado durante a estação chuvosa de 2008, mencionada mais adiante (SOUZA e CAVALCANTI, 2009).

A ZCIT pode ser definida por um conjunto de variáveis meteorológicas. Essas variáveis são: a Zona de Confluência dos Alísios (ZCA), a região do cavado equatorial, as áreas de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e de máxima convergência da massa, e a banda de máxima cobertura de nuvens convectivas. Diversos estudos têm mostrado que a confluência dos ventos e a convergência de massa em baixos níveis, associadas à ZCIT, em especial na região do Atlântico Tropical, favorecem o transporte de umidade e o aumento da convecção sobre o norte da América do Sul. É importante mencionar que aspectos meteorológicos de grande escala podem acentuar ou inibir o desempenho de sistemas principais como a ZCIT, uma vez que sua configuração é inerente à circulação geral da atmosfera. (MELO et al, 2002).

Quando ocorre o deslocamento da ZCIT ao sul de sua climatologia durante o verão e o outono no HS, proporciona um ano mais chuvoso que o normal na região que se estende do Nordeste do Brasil até a Amazônia. Por outro lado, um ano seco está ligado ao fato de a ZCIT deslocar-se para posições ao norte de sua climatologia nesse mesmo período. O monitoramento da ZCIT mostrou que seu posicionamento pode atingir até 5° ou 6° de latitude sul.

A climatologia da atividade convectiva sobre os trópicos e subtropicais da América do Sul revela um ciclo anual de precipitação que inicia no oeste da bacia Amazônica, no início de agosto, e marcha nos meses subsequentes em direção ao sudeste do Brasil. Acompanhando o ciclo anual da chuva, observa-se uma das características mais marcantes do clima tropical da América do Sul durante o verão: a presença de uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o oceano Atlântico Subtropical. Essa característica, que se associa a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera, convencionou-se chamar de Zona de Convergência do Atlântico Sul (KODAMA, 1992).

Ao descrever este fenômeno dentro do contexto geográfico Abreu (1998), afirmou que ela é formada pela associação entre a Frente Polar Atlântica (FPA) e a convecção tropical, principalmente proveniente da região amazônica. A orientação noroeste – sudeste da ZCAS é determinada pela contribuição da FPA, que sobre o continente, apresenta esta mesma direção preferencial.

O posicionamento preferencial da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) estende-se desde a Amazônia até a região Sudeste. O padrão normal de configuração das precipitações favorece o transporte de umidade da Amazônia para o Sudeste, sugerindo a existência de uma esteira transportadora de umidade, com atuação bastante ativa nos corredores de transporte de umidade que alimentam a interação entre os sistemas extratropicais e a convecção do Brasil Central. A ocorrência de chuvas convectivas intensas, ora atuando isoladamente, ora em combinação com os sistemas extratropicais provoca índices elevados de precipitação (QUADRO, 1994)

Através de imagens de satélites é possível demonstrar que a atividade convectiva da ZCAS pode estender-se da Amazônia até oceano Atlântico Subtropical, enquanto em outras situações a ZCAS estende-se apenas até a região Sudeste do Brasil. Também observam-se algumas situações em que a atividade convectiva intensa associada à ZCAS persiste ativa por alguns dias, em outros casos não persiste. A transiência da ZCAS pode ser indiretamente inferida pelo desvio padrão da Radiação de Onda Longa (ROL) emergente durante dezembro – janeiro – fevereiro (MARTON, 2000).

Carvalho, Jones e Liebmann (2004) propuseram uma metodologia para caracterizar objetivamente as propriedades estruturais da ZCAS, então examinaram as variações da intensidade da ZCAS e sua localização geográfica, com particular ênfase para sua extensão sobre o oceano em oposição às situações em que a convecção se mantém ativa apenas sobre o continente. Nesse estudo foram observados dados diários de ROL em 21 verões (dezembro a fevereiro, 1979-2000). Esses autores mostraram que a atividade convectiva intensa sobre o oceano ocorre em associação com a propagação de trens de ondas de latitudes médias ligados a distúrbios intra-sazonais tropicais. Quando a convecção é intensa sobre o continente, mas desacoplada de atividade convectiva sobre o oceano, não se observa uma relação clara com a propagação de trens de ondas em latitudes médias do

Hemisfério Sul, sugerindo que outros fatores, locais ou remotos, ao ocorrer nos trópicos, possam contribuir para essa variabilidade.

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.

A variabilidade de ZCAS em escalas mais longas do que inter-anual é pouco conhecida. Robertson e Mechoso (2000) investigaram aspectos inter-anuais e decenais da ZCAS. Eles identificaram uma circulação anômala de altos níveis a leste do Andes que acompanha a intensificação da ZCAS.

A topografia exerce um papel fundamental em modular em certas feições a circulação atmosférica na América do Sul durante a época do verão. Em geral, a ZCAS localiza-se na sua posição mais a leste em dezembro, principalmente em associação com a alta precipitação sobre o Brasil, o escoamento de nordeste sobre a parte leste da Bolívia e a baixa precipitação sobre o Altiplano. No mês de janeiro, a ZCAS posiciona-se mais a oeste, devido ao aumento da precipitação no Altiplano, que é fortemente modulada pelo escoamento de ar úmido em baixos níveis na região leste do Andes. De acordo com Nogués-Paegle et al. (2002), a topografia exerce um papel crítico em determinar o máximo de precipitação na parte leste da região central dos Andes e na parte oeste da região sul dos Andes. Além disso, a presença de topografia tende a reforçar a ZCAS, intensifica e reposiciona o máximo de precipitação na Amazônia. Vários estudos recentes verificaram a importância da circulação induzida pela presença dos Andes sobre o Sistema de Monções da América do Sul (SMAS). Liebmann et al. (2004), por exemplo, estudaram as relações entre variações do Jato de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes e a ZCAS. Existem evidências de que, quando o fluxo de umidade na América do Sul central é alto, o qual é transportado pelo JBN, a convecção sobre a ZCAS é fraca, e vice-versa.

Considerando a importância da ZCAS e os episódios frequentes do seu deslocamento até a área de interesse desse estudo. Por tratar-se de sistema convectivo de larga escala e conseqüentemente produtor de raios. Também pelo fato de atuar algumas vezes simultaneamente com a ZCIT sobre o

leste da Amazônia. Esse trabalho, não poderia deixar de dar a ZCAS a devida consideração nas análises que seguem.

5.1.3 Abrangência do Estudo

Esta seção teve a finalidade de mapear a distribuição de raios e investigar a influência da ZCIT e da ZCAS sobre a distribuição do número de raios no leste da Amazônia. A região de estudo foi delimitada entre as Latitudes 0° a 10° Sul e as Longitudes 53° a 43° Oeste.

Para avaliar a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a ocorrência de raios na região de estudo foi escolhida a semana de 9 a 15 de dezembro de 2007, na qual está evidente a presença da ZCIT.

Para avaliar a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a ocorrência de raios na região de estudo foi escolhida a semana de 24 a 30 de novembro de 2007, na qual está evidente a presença da ZCAS.

5.1.4 Especificação dos dados utilizados no estudo

Para estudar a distribuição espacial de raios sob influência da ZCIT foi escolhida a semana de 9 a 15 de dezembro de 2007, e para estudar a distribuição espacial de raios sob influência da ZCAS foi escolhida a semana de 24 a 30 de novembro de 2007. Essas semanas foram escolhidas com base nas anomalias de ROL que caracterizaram a presença da ZCIT e ZCAS.

Outro fator que contribuiu para confirmar essas semanas foi a disponibilidade de dados da atividade cerâmica tanto da Rede RDR/SIPAM como da rede STARNET, visto que seria necessário que as semanas escolhidas estivessem dentro do intervalo de tempo entre 1/out/2006 e 31/dez/2008 (822 dias), dentro desse período foi realizada busca por dados das redes RDR/SIPAM e STARNET.

Os dados referentes a circulação atmosférica e anomalias de ROL foram fornecidos pelo INPE/CPTEC e processados pelo software GRADS.

A quantidade de raios foi inicialmente totalizada em áreas retangulares medindo 0,1° x 0,1° (latitude x longitude). Para estimar a medida do retângulo em quilômetros (km) tomou-se por base as distâncias entre dois pontos A e B. O ponto A com as coordenadas -4S e -45W e o ponto B com as coordenadas -5S E -44W. A distância de 0,1 grau de latitude foi calculada em 10 km. A distância de 0,1 grau de longitude foi calculada em 11 km.. A partir das dimensões laterais foi calculada a

superfície do retângulo a qual mede 110 km^2 . Portanto, para calcular a densidade de raios/ km^2 foi adotado o fator de conversão $1/110$.

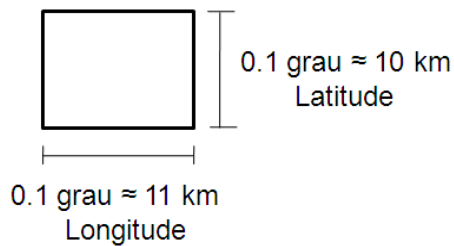


Figura 10: Dimensões da Área Retangular utilizada para estimar a incidência de raios sobre a área de estudo.

Dados de precipitação

Este trabalho utilizou dados semanais de precipitação a partir de um conjunto de 150 estações meteorológicas de superfície (EMS) distribuídas sobre a Amazônia Oriental. Foram analisados dados de duas semanas. A primeira semana, sob influência da ZCIT, no período de 9 a 15 de dezembro de 2007. A segunda semana, sob influência da ZCAS, no período de 24 a 30 de novembro de 2007. As estações e localizações exatas são apresentadas no Apêndice A.

Os registros meteorológicos considerados envolveram dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA-PA) que trabalha em parceria com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo que as EMS da ANA são operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte) e Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH).

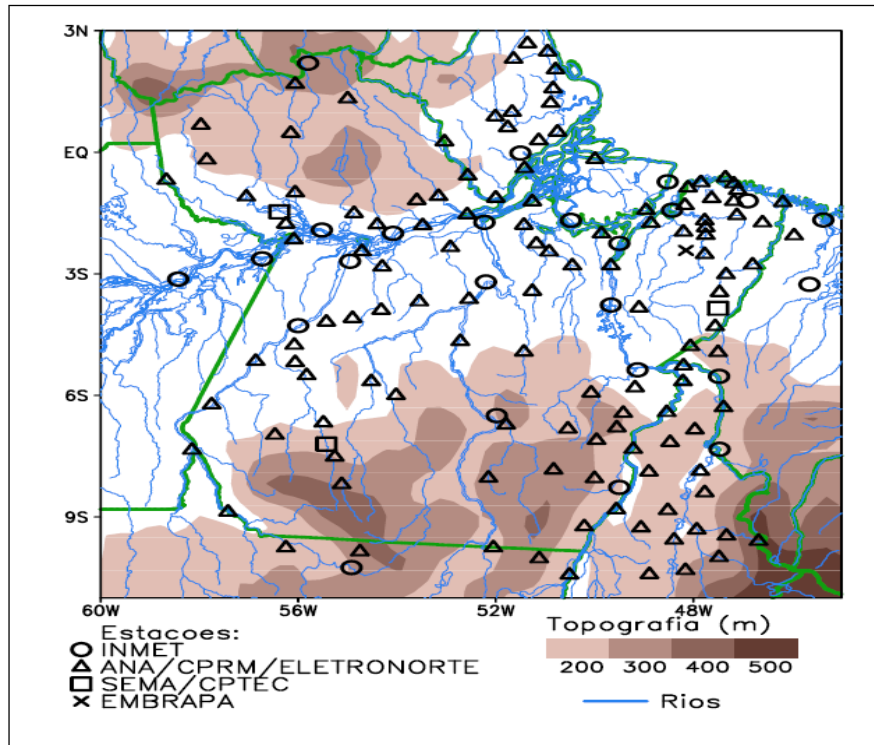


Figura 11 - Localização das estações pluviométricas sobre o estado do Pará usadas para gerar a climatologia da precipitação da Rede Estadual de Previsão Climática e Hidrometeorológica do Pará (RPCH).

Fonte: Lopes (2009)

Dados de Radiação de Ondas Longas - ROL

Os dados semanais de radiação de onda longa (ROL) derivados dos satélites meteorológicos de órbita polar (Liebmann et al, 1996) foram utilizados neste trabalho para gerar a caracterização da atividade convectiva tropical. Os dados de ROL encontram-se dispostos numa grade regular com resolução de 2.5° latitude \times 2.5° longitude.

Dados de ventos

Utilizou-se também os dados semanais das componentes zonal e meridional do vento em m s^{-1} , nos níveis 1000 hPa, 850 hPa e 200 hPa, do NCEP/NCAR (Kalnay et al, 1996) gerados através de um sistema de assimilação de dados empregado no modelo de circulação geral (MCG) do NCEP com resolução de aproximadamente 210 km em latitude e longitude e 28 níveis verticais.

5.1.5 ZCIT, ZCAS e raios no leste da Amazônia

Características da ZCIT presentes na semana de 9 a 15 de dezembro de 2007

Durante a semana de 9 a 15 de dezembro de 2007 a circulação horizontal média ao nível de 1000 hPa é mostrada na Figura 12. Nota-se que os alísios de nordeste estiveram mais intensificados que os de sudeste. Encontrando-se no valor de entre 7 a 8 m/s, fato que favoreceu a convecção na região equatorial e o conseqüente deslocamento da Zona de Convergência Intertropical para o Hemisfério Sul. Sobre o continente verifica-se que há uma diminuição da intensidade desses ventos. Isso deve-se ao fato da imagem se referir a baixos níveis da atmosfera que sofrem a influencia da rugosidade continental.

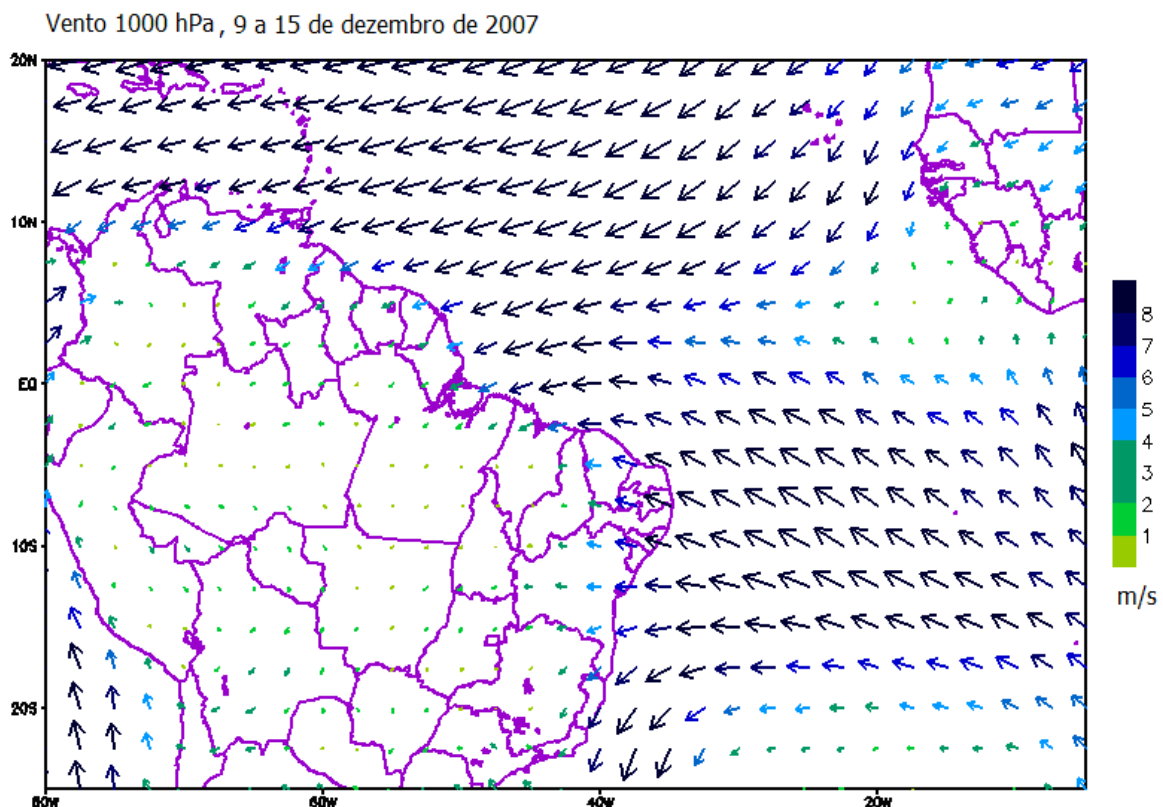


Figura 12: Ventos em 1000 hPa (m s^{-1}) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.

No nível de 850 hPa podemos visualizar a confluência dos ventos alísios sobre o Oceano Atlântico e sobre o continente. Sobre o Norte e Nordeste da Amazônia os ventos apresentaram máxima intensidade, evidenciando a atuação da Zona de Convergência Intertropical sobre e essas regiões (Figura 13).

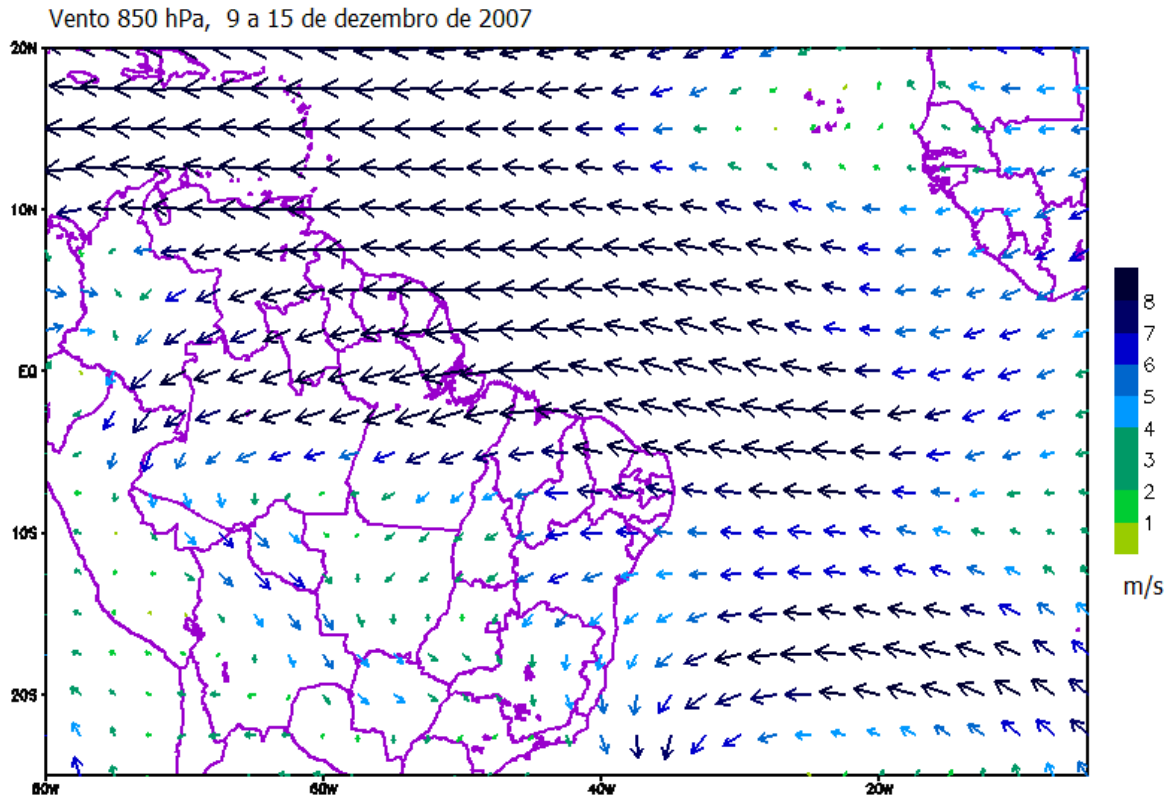


Figura 13: Ventos em 850 hPa (m s^{-1}) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.

A presença da Zona de Convergência Intertropical está evidenciada também devido ao escoamento do vento ao nível de 200 hPa para a área de confluência dos alísios. Trata-se de um deslocamento latitudinal da convecção. A Figura 14 mostra a confluência dos ventos e a convergência de massa em baixos níveis, associadas à ZCIT, pois com o aumento da convecção haverá formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical, contribuindo para as precipitações e logo a eletrificação das nuvens também tenderá a aumentar, em especial na região do Atlântico Tropical. Portanto, esses movimentos favorecem o transporte de umidade e o aumento da convecção sobre o norte da América do Sul.

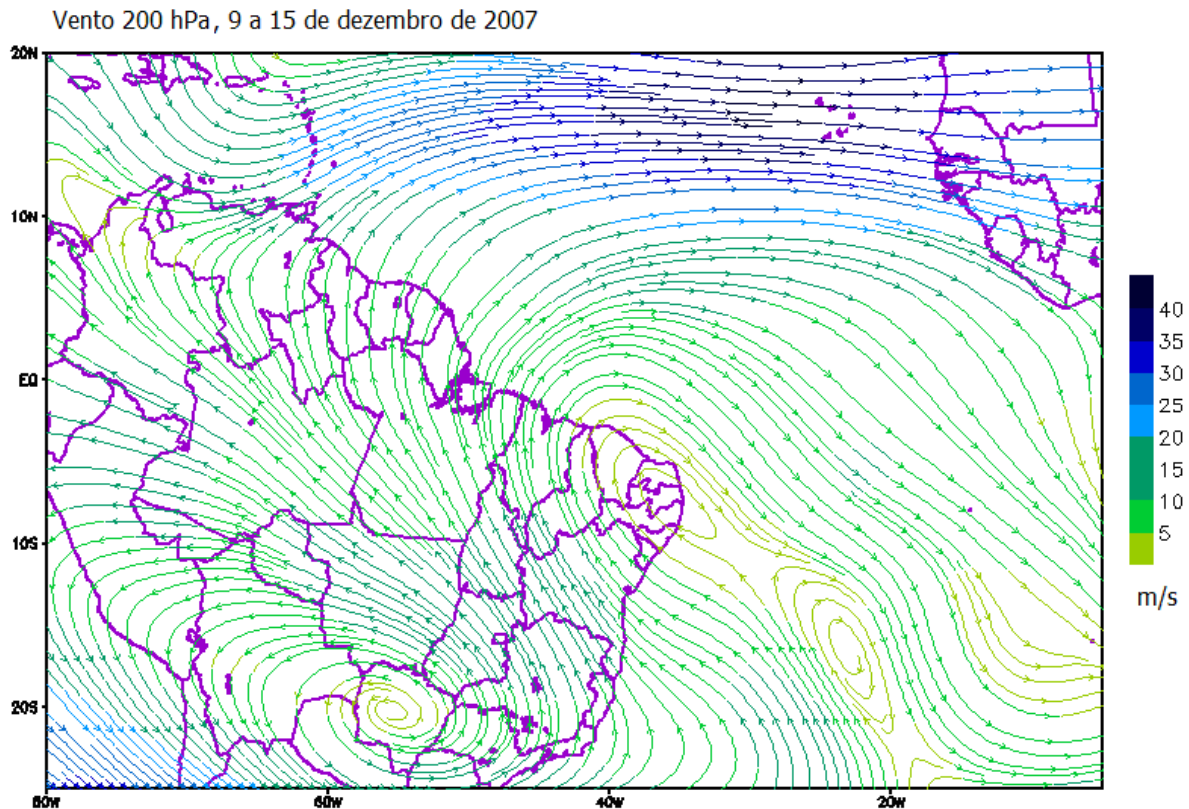


Figura 14: Ventos em 200 hPa (m s^{-1}) no período de 9 a 15 de dezembro de 2007.

A Figura 15 ilustra a anomalia da ROL (W m^{-2}) durante a semana de 9 a 15 de dezembro de 2007. É a ilustração esquemática do posicionamento da ZCIT. Nela a os tons de azul mais escuro indicam as regiões de baixa pressão. Nessas regiões de baixa pressão a anomalia da ROL atingiu valores entre -30 e -40 W m^{-2} , ou seja, é uma região que apresenta nuvens de topos frios o que caracteriza também serem profundas. Os efeitos da Zona de Convergência Intertropical estão evidenciados, pois a ZCIT encontrava-se dentro de sua posição climatológica esperada e a região de estudo apresentava valores menores que -40 W m^{-2} , portanto, abaixo da média climatológica e a ROL segue diminuindo para as regiões centrais do oceano Atlântico. Essas características combinam com o aumento da atividade convectiva na costa do Brasil nesse período, que é o início da estação chuvosa.

As observações referentes a anomalia de chuvas na semana de ZCIT (Figura 16) mostraram que a região com maiores anomalias de precipitação semanal (entre 8 e 15 mm) foi localizada na linha entre as latitudes 0° e -2° . Essas regiões correspondem a ilha do Marajó, o litoral atlântico e o sul do Pará, e o litoral maranhense.

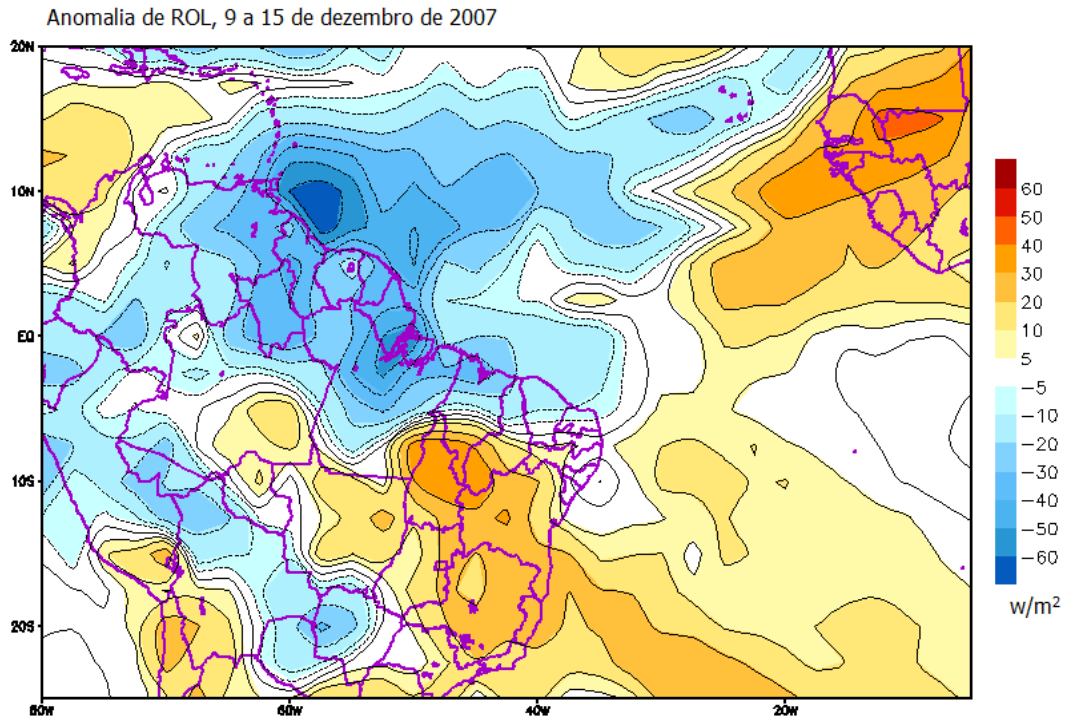


Figura 15: Radiação de Ondas Longas - ROL (W/m^2) diferença em relação a média climatológica durante a semana de de 9 a 15 de dezembro de 2007.

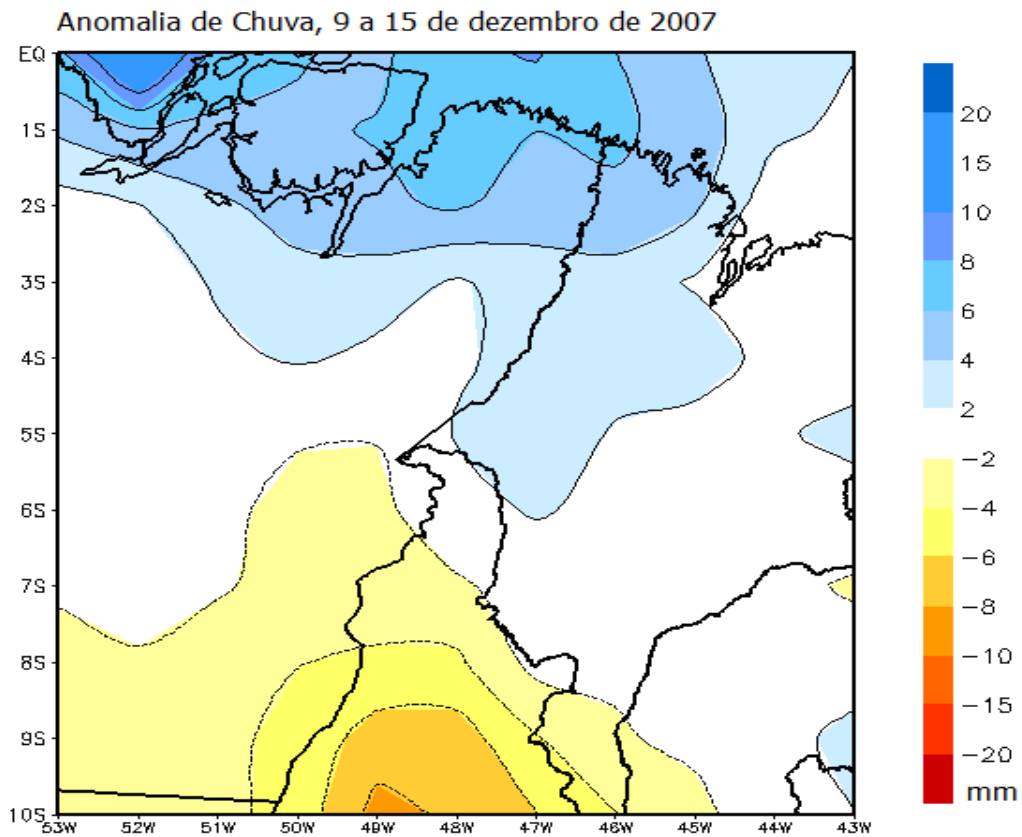


Figura 16: Anomalia de chuva (mm) na semana de 9 a 15 de dezembro de 2007.

Caracterização da ZCAS presentes na semana de 24 a 30 de novembro de 2007

Na semana de 24 a 30 de novembro de 2007 a circulação atmosférica no nível de 1000 hPa e 850 hPa (Figura 18), apresentou a confluência dos ventos no sentido Noroeste/Sudeste do Brasil, com persistente confluência destes ventos estendendo-se do sul da Amazônia ao Atlântico Sul, evidenciando a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul sobre o país.

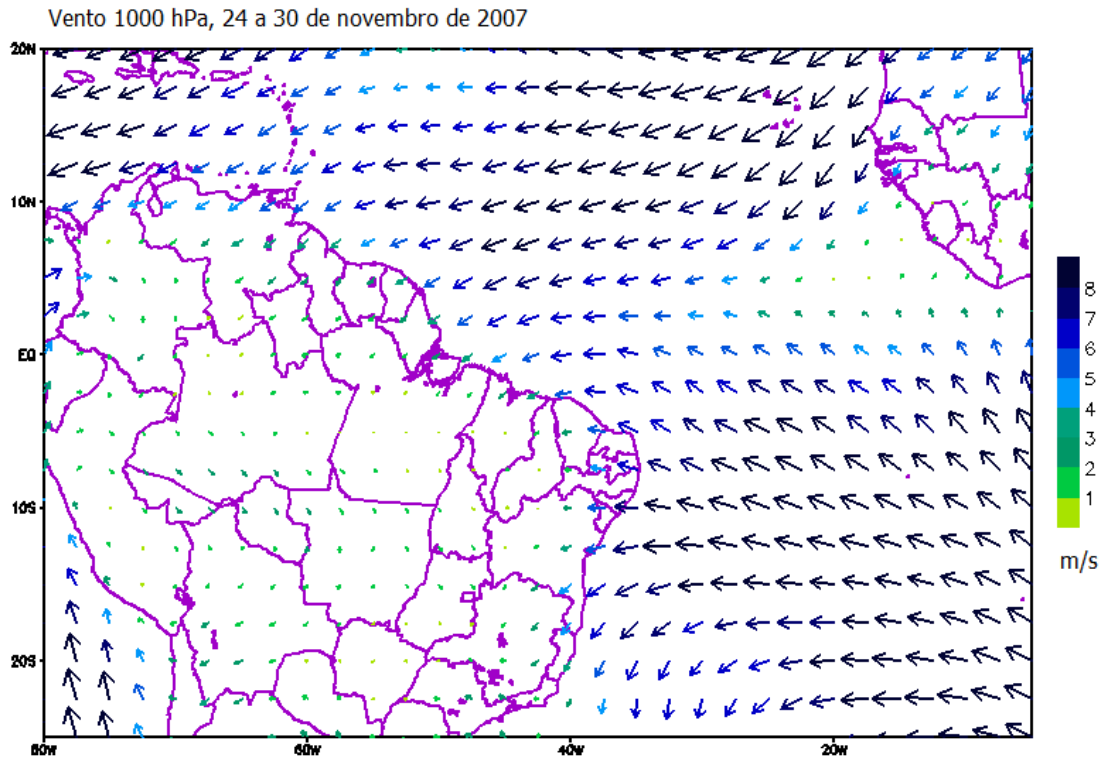


Figura 17: Ventos em 1000 hPa (m s^{-1}) no período de 24 a 30 de novembro de 2007.

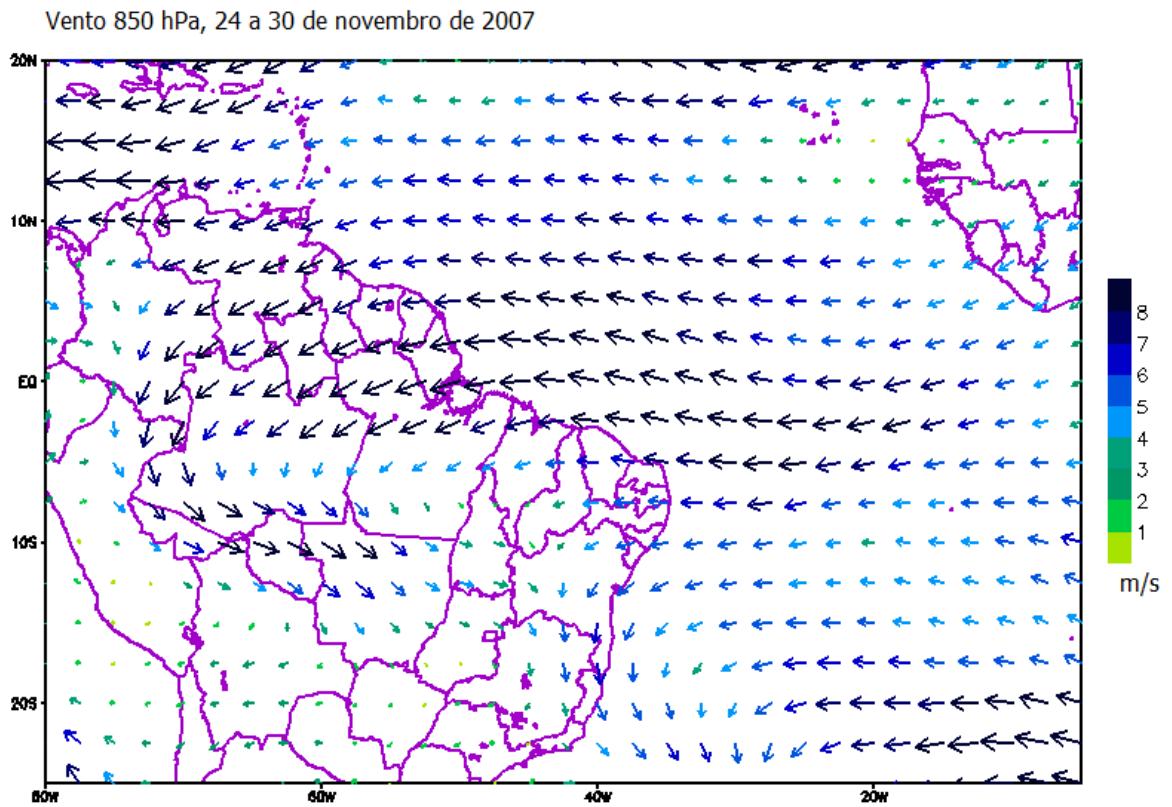


Figura 18: Ventos em 850 hPa (m s^{-1}) no período de 24 a 30 de novembro de 2007.

A Figura 19 mostra a configuração do vento observada nos altos níveis da atmosfera (200 hPa, em torno de 10 a 12 km de altura), sobre a América do Sul. A presença da Alta da Bolívia (circulação atmosférica em altos níveis girando no sentido anti-horário), é evidente sobre o Brasil central, favorecendo a nebulosidade em baixos níveis da atmosfera, resultando em altos valores do número de descargas atmosféricas, associados a Zona de Convergência do Atlântico Sul.

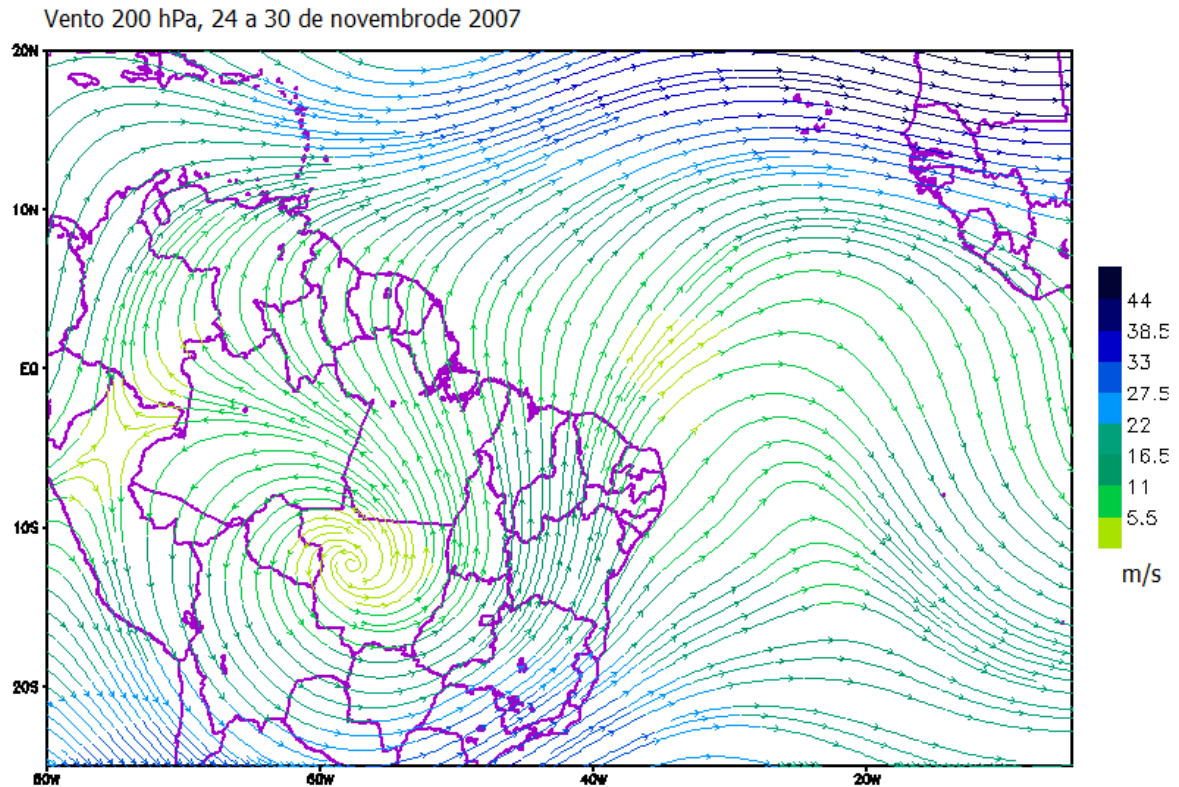


Figura 19: Ventos em 200 hPa (m s^{-1}) no período de 24 a 30 de novembro de 2007.

A Figura 20 mostra a configuração das anomalias de ROL observadas na semana em estudo, verificou-se a banda de anomalias negativas em uma orientação NW/SE, desde o Estado do Amapá até o Atlântico Sul, a qual é indicativa da atuação da ZCAS, nessas regiões pode ser observada a extensão da ZCAS sobre o oceano em oposição às situações em que a convecção se mantém ativa apenas sobre o continente.

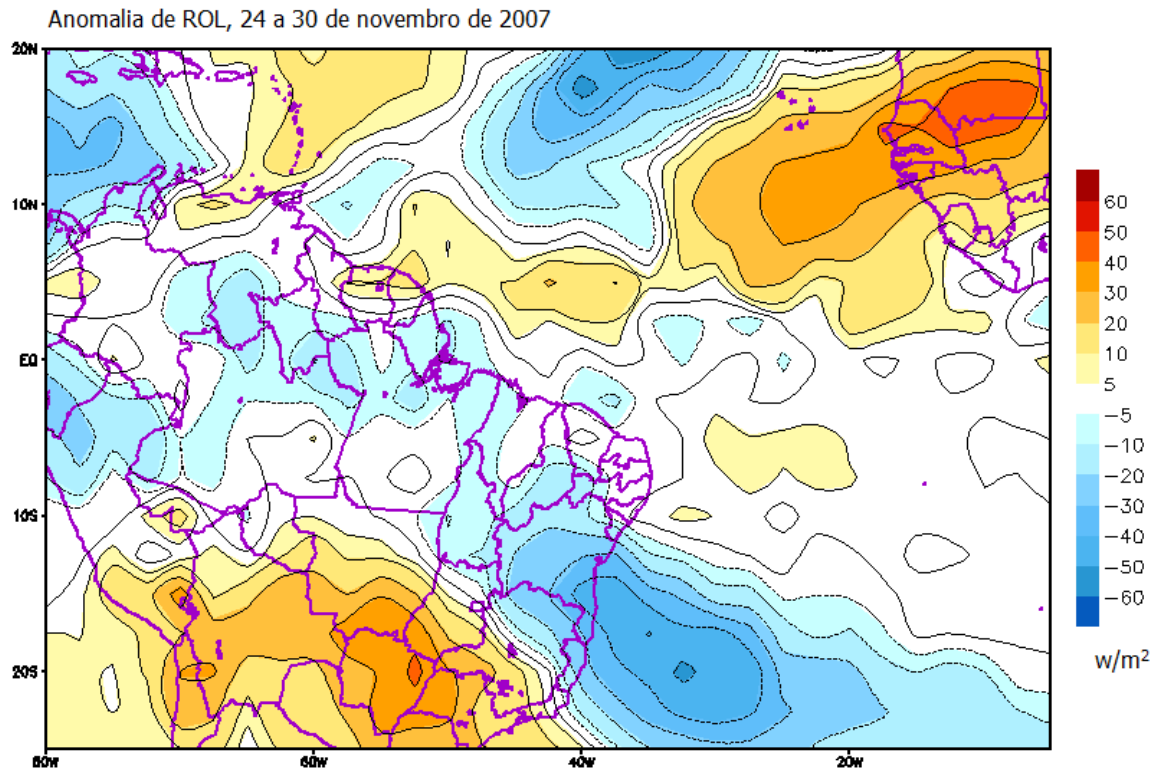


Figura 20: Radiação de Ondas Longas - ROL (W/m^2) diferença em relação a média climatológica durante a semana de 24 a 30 de novembro de 2007.

A análise da anomalia de chuvas na semana de ZCAS ilustrada na Figura 21 mostrou que a precipitação foi mais intensa na região entre as latitudes -7° e -10° , na região correspondente ao Sul e Sudeste do Pará, nos Estados do Piauí, Tocantins e no Sul do Maranhão. O máximo de anomalia de precipitação semanal (15 mm) ocorreu centralizada no Estado do Tocantins.

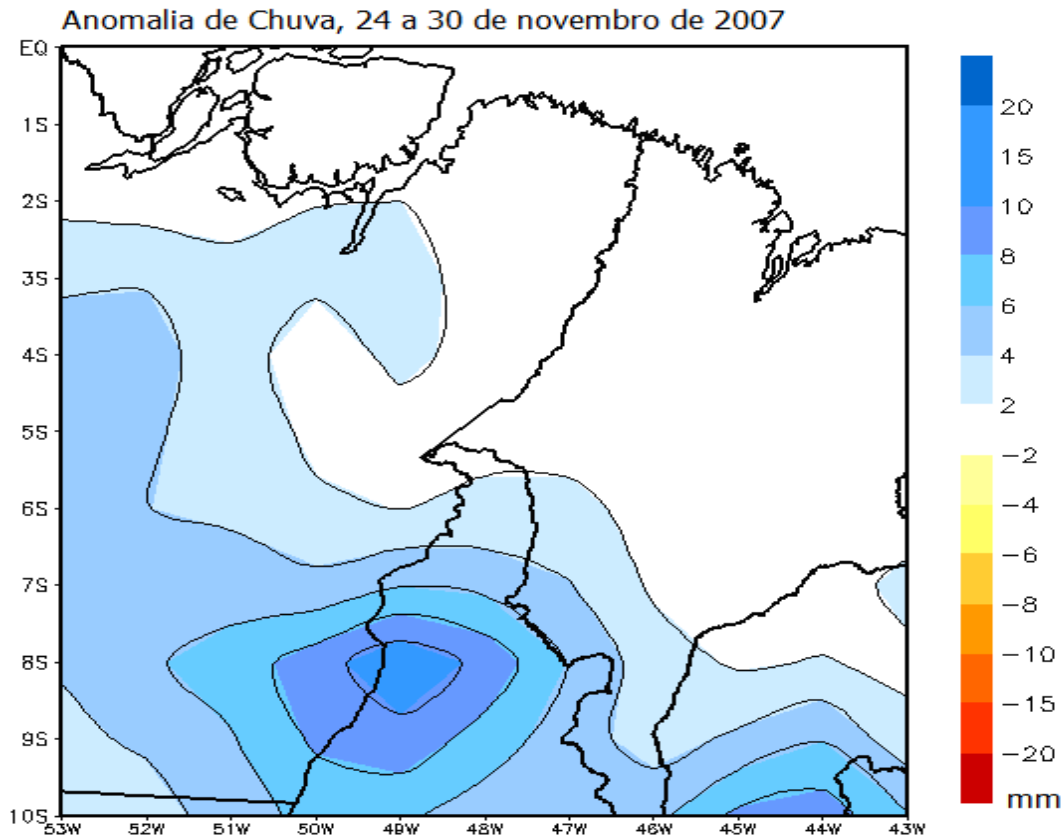


Figura 21: Anomalia de chuvas (mm/semana) na semana de 24 a 30 de novembro de 2007.

A distribuição de raios sob influência da ZCIT e da ZCAS

As semanas nas quais os sistemas meteorológicos ZCIT e ZCAS estavam evidentes na região de estudo, apresentaram diferenciadas configurações da atividade cerâmica; as diferenças iniciam na quantidade de raios. Na semana sob influência da ZCAS foram estimados 246.364 raios, entretanto, na semana sob influência da ZCIT a quantidade de raios foi 62% maior (398.605 raios).

Na semana com presença da ZCIT a região com maior atividade cerâmica foi localizada na linha entre as latitudes 0° e -3° ; portanto evidencia que regiões como o Marajó, o litoral atlântico e o sul do Pará, e o litoral maranhense apresentam níveis máximos de atividade cerâmica semanal (3 a 8 raios/ km^2 /semana). Na semana sob influência da ZCAS a atividade cerâmica mais intensa foi localizada na região entre as latitudes -6° e -7° , localizada no Sul e Sudeste do Pará e na confluência entre os Estados do Maranhão, o Piauí e o Tocantins. Os níveis máximos de densidade semanal de raios variaram entre 3 a 4,4 raios/ km^2 /semana, portanto, menor em relação a semana de ZCIT na qual o pico da incidência de raios ocorreu próximo a costa atlântica do Pará, do Maranhão e no Marajó.

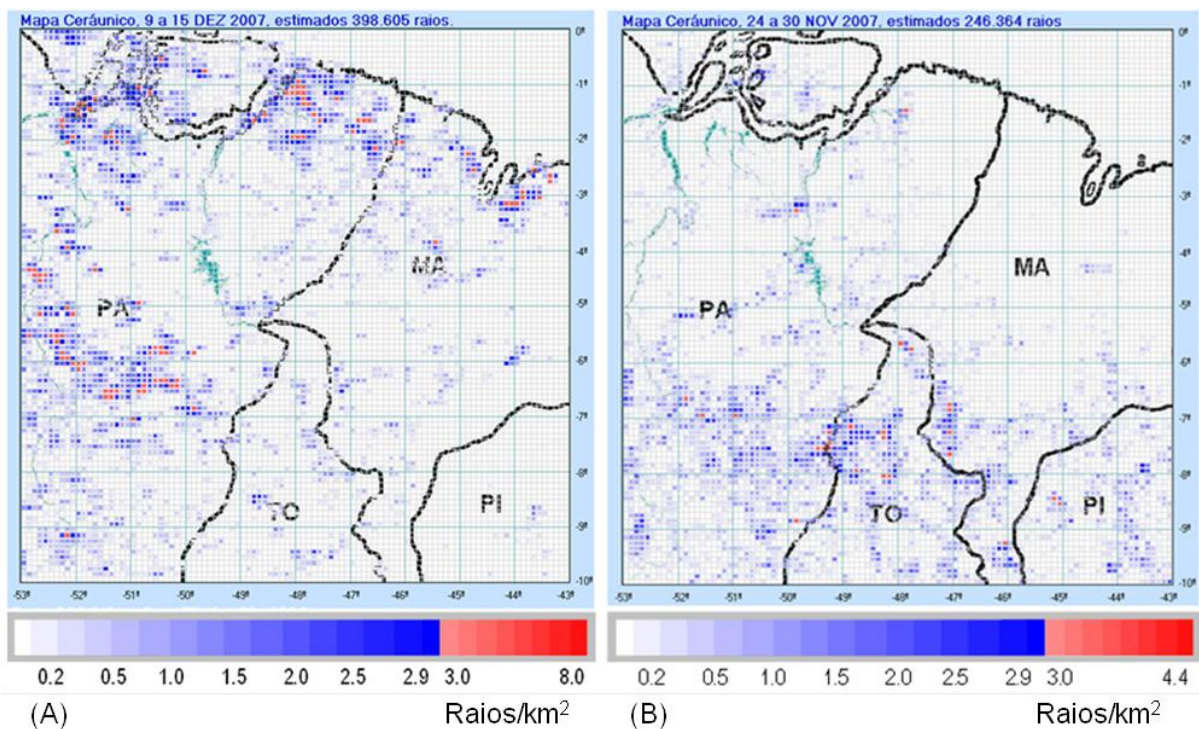


Figura 22: Distribuição de raios/ km^2 /semana (escala do eixo horizontal). Na figura à esquerda (A), a semana de ZCIT, no período de 9 a 15 de dezembro de 2007. Na figura à direita (B), na semana de ZCAS, 24 a 30 novembro de 2007.

Tabela 4: Resumo da atividade cerâmica nas semanas sob influência dos sistemas meteorológicos de grande escala ZCIT e ZCAS.

	Semana ZCIT	Semana ZCAS
Número de raios	398,6 mil	246,3 mil
Densidade média (raios/km ²)	0,356	0,220
Máximos (raios/km ²)	8	4,44

Fonte: STARNET, SIAM/S18

Ocorrências de raios por faixas de latitude

Na semana com a presença da ZCIT as ocorrências maiores que 7 mil raios ocorreram entre as faixas de latitudes -1,3° e -2,3° e entre as latitudes -6,4° e -6,6°. Dentro dessas regiões o valor máximo (8924 raios) ocorreu entre as latitudes -2° e -2,2°. Essas latitudes encontram-se dentro da localização climatológica da ZCIT. O decréscimo da quantidade de raios a partir da latitude -7° até -10°S corresponde a região de enfraquecimento da ZCIT.

Na semana em que a região esteve sob influência da ZCAS a ocorrência de raios foi mais intensa entre as latitudes -6,8° e -8,2°. Dentro desse intervalo foi atingido o máximo de 6.192 raios, na latitude -7,3°.

Ocorrências de raios por faixas de longitude

Na semana sob influência da ZCIT observou-se que duas faixas de longitudes apresentaram maior atividade cerâmica atravessam o leste do Marajó e o sul do Pará. Nessas faixas foram observadas ocorrências semanais maiores que 7 mil raios entre as longitudes -2,4°W e -50,8°W e nessa região foi estimado o valor máximo (10 mil raios) na faixa correspondente a latitude -52°W.

Na semana sob influência da ZCAS a ocorrência de raios teve distribuição longitudinal mais uniforme com poucas faixas registrando mais raios que na ZCIT. Entre essas faixas destacamos a longitude -47° com o máximo de 4.497 raios.

Tanto na ZCIT quanto na ZCAS a faixa de longitudes entre -46° e -43° apresentou os menores níveis de atividade cerâmica. Essa redução de atividade pode ser explicada pela localização e inclusão

de uma porção oceânica localizada na região de estudo, entre essas longitudes. Sabe-se que a densidade de ocorrência de raios é maior sobre os continentes, do que sobre os oceanos.

5.1.6 Influência da ZCIT e ZCAS sobre a ocorrência de raios

Foi possível combinar as melhores características da RDR/SIPAM (alto nível de detecção em uma pequena área de boa eficiência) com as da STARNET (detecção de raios mais uniforme sobre área mais abrangente) que operam na Amazônia. A partir de dados emitidos pelos sistemas de detecção de raios STARNET e RDR/SIPAM os métodos estatísticos que foram programados em linguagem computacional culminaram na elaboração de equações de ajuste que emitiram dados e diagramas os quais possibilitam uma interpretação consistente da incidência de raios no leste da Amazônia e sua inter-relação com fatores climáticos.

A investigação do número de raios em relação aos aspectos de circulação atmosférica e anomalia de ROL em uma semana sob influência da ZCIT permitiram constatar a existência de um arco que se estendeu do litoral atlântico do Estado do Pará até o arquipélago do Marajó e o sul do Amapá. Nessa região foi observada atividade cerâmica semanal entre 3 e 8 raios/km². Nesse contexto, a caracterização da influência da ZCIT foi evidente devido a intensificação dos alísios de nordeste, favorecendo o deslocamento latitudinal da umidade e presença das anomalias da ROL que nessa região atingiram valores entre -30 e -40 W m⁻². A relação da circulação atmosférica sob influência da ZCAS levou à ocorrência de maior número de raios na região que se estendeu do sul e sudeste do Estado do Pará, todo o Estado do Tocantins, o sul do Maranhão e o norte do Piauí. Nessas regiões foram observadas picos semanais de densidade cerâmica entre 3 a 4,4 raios/km².

No caso da ZCIT constatou-se que as configurações do ROL, chuva e ocorrências de raios coincidem espacialmente. Todavia no caso da semana de ZCAS a maior quantidade de raios coincidiu de certa forma com a área de maior precipitação, mas não com a área de maior anomalia negativa de ROL.

5.2 ESTUDO DE CASO 2

INCIDÊNCIA DE RAIOS SOBRE SEGMENTOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM MESES DOS PERÍODOS SECO E CHUVOSO DO LESTE DA AMAZÔNIA

5.2.1 Períodos seco e chuvoso na Amazônia

A climatologia da Amazônia é caracterizada pela presença de um amplo espectro de variações no tempo e espaço da atividade convectiva tropical e da precipitação, as quais se tornam as variáveis climáticas mais importantes da região (Souza, 2009). Segundo Molion (1987), a precipitação na Amazônia é basicamente promovida pelas circulações de meso e grande escala que atuam nessa região e os processos dinâmicos que as organizam.

A região Amazônica é caracterizada por um alto índice de ocorrência de descargas atmosféricas produzidas por esses sistemas meteorológicos, as quais causam interrupções no fornecimento de energia elétrica, nos setores de telecomunicações e diminuição do tempo de vida dos equipamentos. Além disso, a alta umidade regional, com valores superiores a 80% em média anual, leva a condições de alta adversidade operacional, necessitando de estudos dirigidos para o aumento da confiabilidade dos equipamentos e novas técnicas de proteção elétrica (RIBEIRO et al, 2010).

A relação entre os parâmetros dos raios, precipitação e os sistemas meteorológicos convectivos que os produzem tem sido estudada por vários métodos: Roohr (1994) e Carey (2005), utilizaram imagens de satélite, Wang (2006), Macgorman (2005), Gungle (2005) e Soriano (2001), usando radar, balões-sonda de ar, mais sistema de detecção e localização de raios na superfície, associaram os parâmetros de raios e precipitação em Taiwan, E.U.A. e Espanha, respectivamente. Na região Amazônica, especialmente em torno de Belém, as primeiras tentativas de estimar chuva, a partir da frequência de ocorrência de descargas foram feitos por Rocha (1997). As diferenças de comportamento sazonal dos raios versus chuvas foram atribuídas a diferença climática de cobertura entre os sistemas de larga versus meso escala que produzem raios e chuvas sobre essa região.

A estação chuvosa no leste da Amazônia é conseqüente de mecanismos climáticos de grande escala que ocorrem nos oceanos Atlântico tropical e Pacífico equatorial. A atuação desses sistemas meteorológicos resulta em uma distribuição pluviométrica elevada, especialmente nos meses de janeiro a abril, onde grandes áreas homogêneas de precipitação caracterizam desta forma a estação chuvosa. Nesse quadrimestre a precipitação atinge um máximo climatológico entre 700 e 1000 mm no leste da Amazônia.

No período menos chuvoso, a redução significativa da precipitação geralmente estende-se de junho a novembro, é caracterizada ainda por espacialização irregular das chuvas.

5.2.2 Abrangência do estudo

O estudo da incidência de descargas de raios sobre linhas de transmissão de energia elétrica contribui para orientar ações que diminuam os custos de operação e manutenção das empresas do setor elétrico, e para reduzir os prejuízos causados por interrupções de fornecimento de energia a seus usuários. Este estudo de caso analisou o número de ocorrências de raios em escala de tempo trimestral e sazonal no leste da Amazônia.

Especificamente objetivou-se determinar a incidência de raios sobre os trajetos de quatro segmentos de linha de transmissão da CELPA Rede Energia: (a) Castanhal-Paragominas; (b) Mojú-Tailândia; (c) Tucuruí-Novo Repartimento; (d) Jacundá-Marabá. Foram utilizados dados de todos os tipos de descargas (nuvem-nuvem, nuvem-solo ou outras), considerando dois períodos de três meses: meses do período chuvoso (Jan, Fev e Mar/2008) e meses do período mais seco (Set, Out e Nov/2007).

5.2.3 Delimitações da região de estudo

Uma das potenciais aplicações da Equação S18 é a estimativa da incidência de raios em qualquer localização da região retangular, delimitada pelas Latitudes -3° e -5° e pelas Longitudes -49° e -47° . Esse retângulo, ver Figura 23, inclui todos os quatro segmentos que foram localizados geograficamente. Portanto, a Equação S18 pode ser utilizada para estimar a incidência de raios em todos esses segmentos de linhas de transmissão. Foram selecionados quatro Segmentos da linha de transmissão: (Segmento A) Castanhal-Paragominas; (Segmento B) Mojú-Tailândia; (Segmento C) Tucuruí-Novo Repartimento; (Segmento D) Jacundá-Marabá. Esses segmentos de linhas de transmissão foram geograficamente posicionados por GPS.

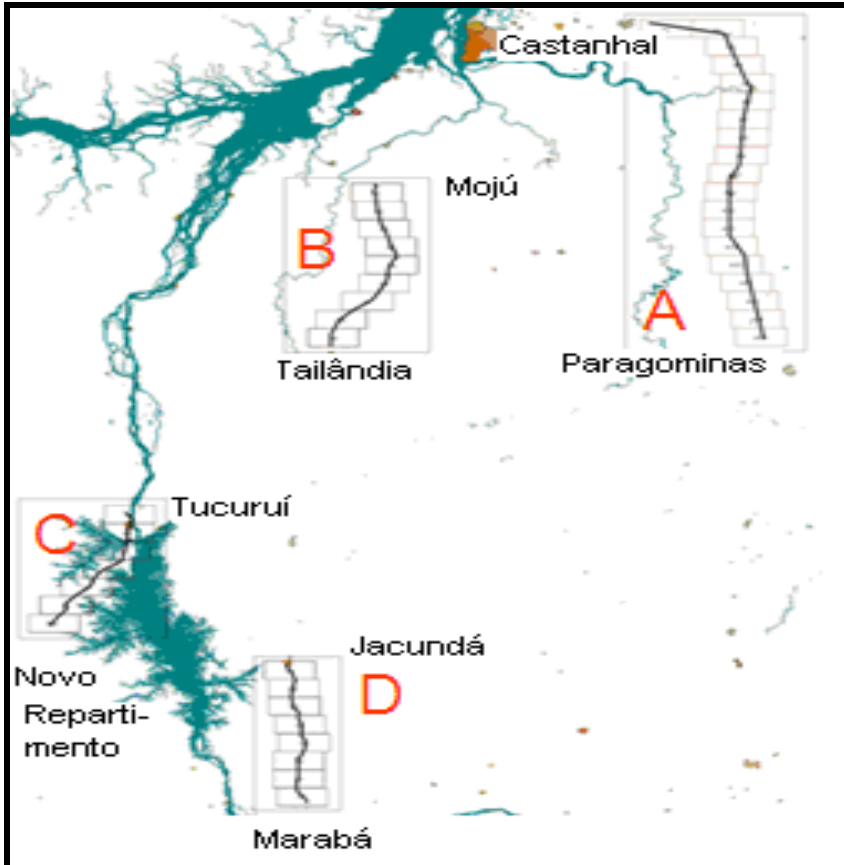


Figura 23 Quatro segmentos de linhas de transmissão. Esses Segmentos foram escolhidos para fins de aplicar a Equação S18 e estimar a incidência de raios sobre pontos localizados sobre o segmento. Em detalhe: (A) Castanhal-Paragominas; (B) Mojú-Tailândia; (C) Tucuruí-Novo Repartimento; (D) Jacundá-Marabá. Em detalhes no ANEXO 1.

Para realizar a estimativa da incidência de raios, os segmentos das linhas de transmissão foram subdivididos em Áreas Retangulares $0,1^{\circ} \times 0,2^{\circ}$ (latitude x longitude), conforme ilustra a Figura 24.

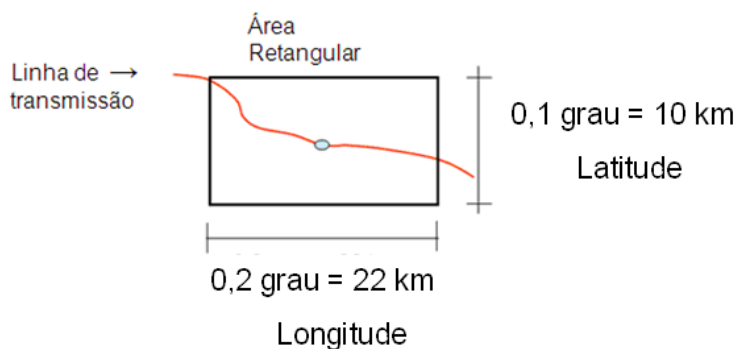


Figura 24: Dimensões da Área Retangular utilizada para estimar a incidência de raios sobre a linha de transmissão.

A contagem do número de raios sobre as áreas retangulares dos segmentos de linhas de transmissão foi realizada através do software implementado no sistema SIAM\S18.

Tratamento Estatístico

O tratamento estatístico dos dados foi realizado pela aplicação de métodos descritivos e inferenciais. A quantidade de raios, variável quantitativa discreta, foi apresentada através de medidas de tendência central e variação. Visto que a variável aleatória (número de raios) não apresentou distribuição compatível com a curva normal, então foi aplicado um teste de hipótese baseado em estatística não-paramétrica, a ANOVA de Kruskal-Wallis, e em seguida aplicado o pós-teste de Dunn (Zar, 1984). Foi previamente fixado o nível alfa = 0.05 para rejeição da hipótese nula. Os testes de hipótese foram apoiados pelo software BioEstat versão 5 (Ayres et al, 2007).

O teste de Kurskal-Wallis é aplicado da seguinte forma:

Inicialmente classifique em rank (ordinal) todos os elementos dos grupos (1 a N)

$$K = (N - 1) \frac{\sum_{i=1}^g n_i (\bar{r}_{i\cdot} - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2},$$

Onde:

n_i é o número de observações no grupo i

r_{ij} é o rank (de todas observações) da observação i do grupo j

N é o número total de observações em todos os grupos

$$\bar{r}_{i\cdot} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} r_{ij}}{n_i}$$

$$\bar{r} = \frac{1}{2}(N + 1)$$

$$\Pr(\chi_{g-1}^2 \geq K)$$

O p-valor é calculado pela aproximação de

5.2.4 Distribuição da raios nos períodos seco e chuvoso

Raios no período seco

Nos meses da estação mais seca, Setembro, Outubro, Novembro de 2007 a Figura 25A ilustra a distribuição espacial de raios no leste da Amazônia. O mapa de densidade de raios mostra que nos meses mais secos houve maior densidade de raios nas regiões do Marajó, área Metropolitana de Belém, sudeste do Estado do Pará e no Estado do Tocantins. Nessas localizações, no período de três meses, foram registrados máximos variando entre 3 e 8 raios/km²/trimestre.

Raios no período chuvoso

Na estação mais chuvosa (Janeiro, Fevereiro e Março de 2008) a atividade cerâmica ocorreu com maior regularidade, ou seja, com maior uniformidade em toda a região de estudo (Figura 25B). Nesses meses foram estimados 2.020.445 raios na região de estudo. Esse número de raios é 88,6% maior que a mesma medida no período mais seco (1.073.445 raios). A atividade cerâmica mais intensa foi localizada no Estado do Tocantins, onde os pontos de máximo variaram entre 5 e 16 raios/km² no transcurso de três meses.

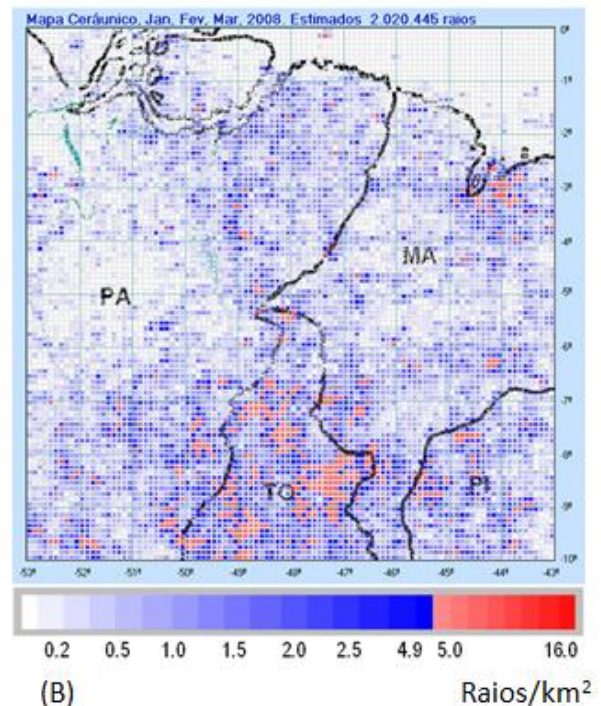
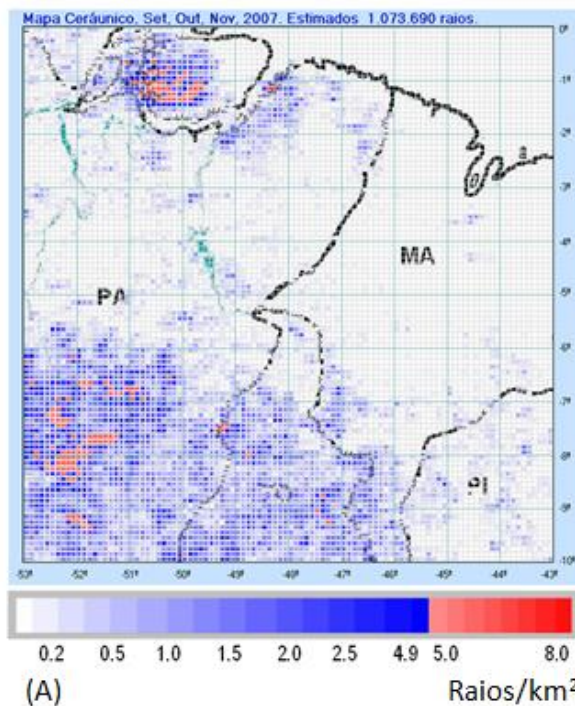


Figura 25: Densidade de raios (raios/km²). Figura à esquerda (A) referente aos meses mais secos Setembro, Outubro e Novembro de 2007; Figura à direita (B) referente aos meses mais chuvosos Jan, Fev e Mar, 2008 (à direita).

Raios sobre os segmentos de linha de transmissão no período seco

A análise da incidência semanal de raios no período mais seco previamente selecionado, no leste da Amazônia, mostrou que os totais de raios ao longo dos quatro segmentos apresentaram alta variabilidade. Essa constatação pode ser verificada pelos coeficientes de variação: Segmento A (489,1%), Segmento B (223,6%), Segmento C (469,4%) e Segmento D (309,3%).

A distribuição temporal mostrou que em três segmentos (A, C e D) durante 3/4 do período (9 semanas) não foi observada incidência de raios, apenas o Segmento B apresentou ausência de raios em 50% das semanas. Conseqüentemente, observou-se que a maior quantidade de raios ocorreu sobre a linha de transmissão em apenas 1/4 das semanas estudadas.

As mais intensas atividades de descargas atmosféricas ocorreram durante 3 (três) semanas. Nessas semanas foram observados os seguintes valores máximos: Segmento A (10 raios/km²), Segmento B (16 raios/km²), Segmento C (7 raios/km²) e Segmento D (18 raios/km²). Portanto, esses dados indicam que a incidência de raios/semana sobre os segmentos da linha de transmissão, nos meses em estudo, podem ser divididos em duas categorias: (a) Semanas sem raios e (b) Semanas com muitos raios. As semanas sem raios predominam (75%) nos meses menos chuvosos. Por outro lado, as semanas com muitos raios (25%) apresentaram média de 1.0 raio/semana em cada Área Retangular (retângulos de um décimo de grau de latitude e dois décimos de grau de longitude).

No período seco a comparação dos quatro segmentos, no tocante a variável aleatória número de raios por semana, resultou no p-valor = 0,0011*, o qual apontou para a existência de diferença altamente significativa. As comparações, entre os segmentos, da quantidade de raios dentro das Áreas Retangulares (0,1° x 0,2°), realizadas pelo teste post-hoc de Dunn, mostraram que houve dois segmentos que apresentaram incidência de raios significativamente maiores: o Segmento B (Média = 1,0 raios/semana) que vai de Mojú a Tailândia e o Segmento D (média = 0,91 raios/semana) entre os municípios de Jacundá à Marabá. Esses resultados conduzem a constatação que, durante o período seco do ano de 2007 os segmentos Mojú-Tailândia e Jacundá-Marabá foram significativamente mais susceptíveis a descargas atmosféricas.

Raios sobre os segmentos de linha de transmissão no período chuvoso

A ocorrência de descargas atmosféricas sobre os mesmos quatro segmentos de linha de transmissão de energia elétrica também foi estudada no período chuvoso, ver Tabela 8.

A quantidade semanal de raios mostrou que no período chuvoso ocorre menor variação, quando comparada com o período mais seco. Observou-se, conforme descrito na Tabela 8, que os coeficientes de variação nos quatro segmentos (A = 200,6%, B = 196,0%, C = 252,3% e D = 214,3%).

Apenas o Segmento C (Tucuruí - Novo Repartimento) apresentou maior variação semanal, pois neste segmento não houve ocorrência de raio em 75% do período (9 semanas), porém, nos outros segmentos (A, B e D) a ausência de raios ocorreu em apenas 50% das semanas.

Durante o período em estudo destacou-se o fato que durante 3 semanas, não consecutivas, ocorreram picos de atividade cerâmica sobre os segmentos.

A ocorrência semanal de raios sobre as regiões que contém os segmentos da linha de transmissão, apresentou semanas com as seguintes características: (a) Semanas sem raios e (b) Semanas com muitos raios (3/4 do período), essas semanas apresentaram áreas retangulares ($0,10^\circ \times 0,20^\circ$) com máximos entre 8 e 18 raios por semana.

Tabela 5: Medidas de tendência central e de variação do número de raios/semana incidentes sobre as Áreas Retangulares ($0,10^\circ$ latitude x $0,20^\circ$ longitude) traspassadas pelos quatro segmentos da linha de transmissão (A, B, C e D), conforme o período: seco ou chuvoso.

	Segmento A		Segmento B		Segmento C		Segmento D	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Tamanho amostral	228	227	107	108	84	84	96	96
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	10	17	16	18	7	10	18	19
Média Aritmética	0,18	1,36	1	1,58	0,18	0,73	0,91	1,46
Desvio Padrão	0,9	2,73	2,24	3,1	0,84	1,83	2,8	3,13
Coefficiente de Variação	489,1%	200,6%	223,6%	196,0%	469,4%	252,3%	309,3%	214,3%

Fonte: STARNET, SIAM\S18

No período chuvoso a comparação da incidência semanal de raios entre os quatro segmentos resultou no p -valor = 0,0783. Essas estatísticas atestam que durante o período mais chuvoso não existe diferença estatisticamente significativa da quantidade de raios/semana sobre os quatro segmentos que estão sendo comparados. Houve três segmentos que apresentaram ocorrência de raios superiores a 1 raios/semana: B (média = 1,58 raios), D (média = 1,48 raios) e A (média = 1,36 raios). A menor incidência foi observada no Segmento C (média = 0,73 raios).

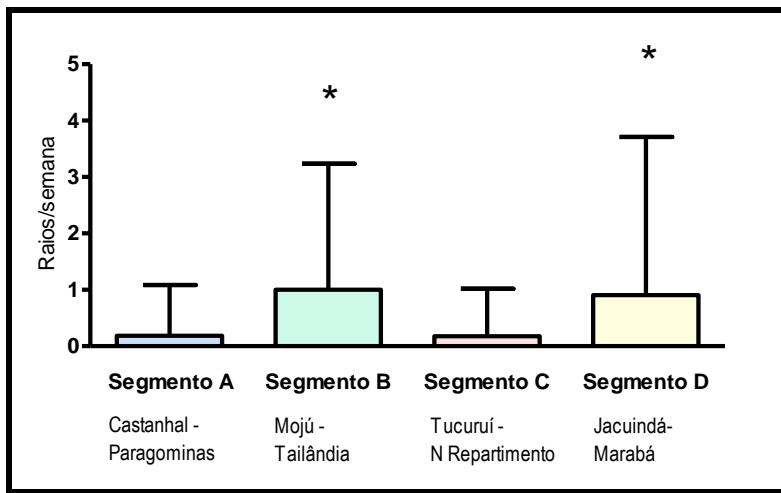


Figura 26: No período seco (set a nov/2007), média e desvio padrão do número de raios/semana incidentes sobre as Áreas Retangulares ($0,10^\circ$ latitude x $0,20^\circ$ longitude). Os asteriscos (*) indicam os segmentos que tiveram incidência de raios significativamente maior (p -valor < 0.05) pelo teste de Kruskal-Wallis.

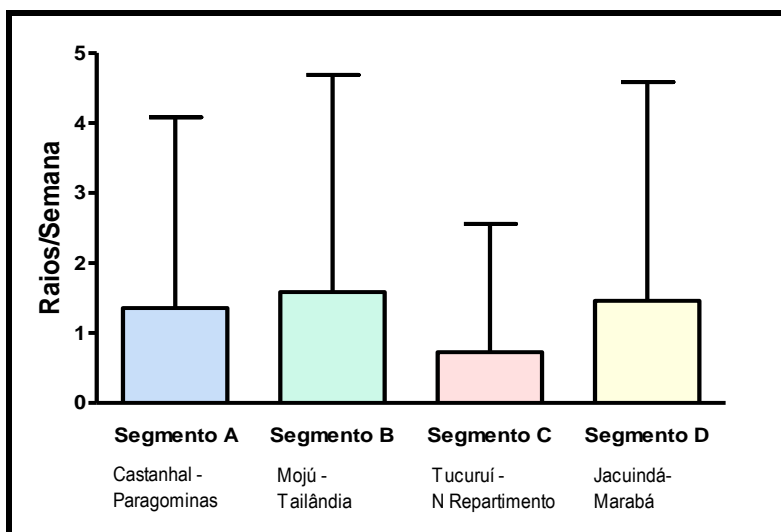


Figura 27: No período chuvoso (jan a mar/2008), média e desvio padrão do número de raios/semana sobre as Áreas Retangulares ($0,10^\circ$ latitude x $0,20^\circ$ longitude) traspassadas pelos quatro segmentos da linha de transmissão (A, B, C e D).

Raios sobre o Segmento A (Castanhal-Paragominas)

Durante os três meses da estação seca a incidência média semanal de descargas atmosféricas nas áreas retangulares do Segmento A (Figura 28), situado entre os municípios de Castanhal e Paragominas (média = 0,18 raios) mostrou que quatro áreas retangulares foram mais propensas a incidência de raios. Esses segmentos estão localizados nos 40 km iniciais; portanto, os mais próximos de Castanhal e são os seguintes: A2 (média = 1,16 e máximo = 10), A1 (média = 0,91 e máximo = 6), A4 (média = 0,41 e máximo = 3) e A3 (média = 0,33 e máximo = 2).

Nos meses de estação chuvosa (Figura 29) a incidência semanal de descargas atmosféricas dentro do Segmento A (média aritmética = 1,36 raios/semana) mostrou que houve nove áreas retangulares que apresentaram média acima do valor esperado (A1, A4, A12, A13, A14, A15, A17, A18 e A19). Esses segmentos apresentaram média entre 1,1 e 2,0 raios/semana e o máximo foi atingido pelo Segmento A13 (2,3 raios/semana).

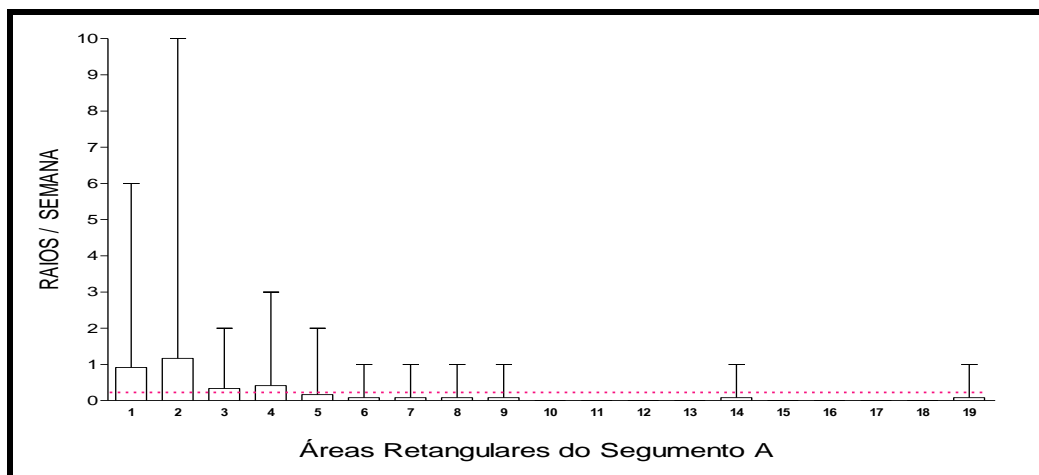


Figura 28: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento A, em meses do período seco no leste da Amazônia. A linha tracejada (vermelha) representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento A no período seco.

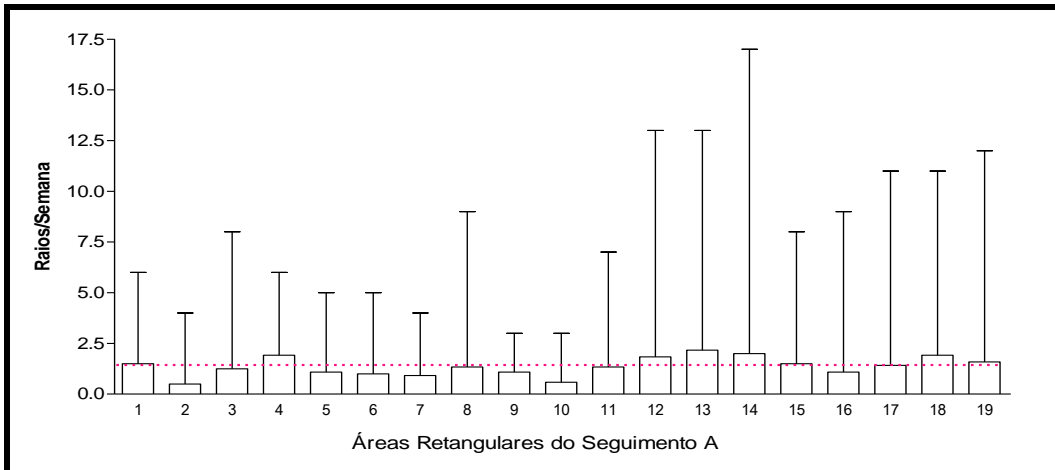


Figura 29: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento A, em meses do período chuvoso no leste da Amazônia. A linha tracejada representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento A no período chuvoso.

Raios sobre o Segmento B (Mojú-Tailândia)

Durante a estação seca a média semanal de raios no Segmento B (figura 30), entre os municípios de Mojú e Tailândia, (média = 1,0) entre outubro a novembro de 2007, mostrou que as áreas retangulares B3, B4, B5 e B8 apresentaram média semanal acima do esperado: B5 (média = 2,1 e máximo = 16), B4 (média = 1,7 e máximo = 6), B3 (média = 1,3 e máximo = 8) e B5 (média = 1,1 e máximo = 8).

Na estação chuvosa (figura 31) a comparação da quantidade semanal de raios sobre as áreas retangulares traspassadas pelo Segmento B (média = 1,58 raio) de linha de transmissão, mostrou que cinco áreas retangulares apresentam média semanal acima do valor esperado: B1 (média = 2,0 e máximo = 18,0), B3 (média = 1,9 e máximo = 9,0), B4 (média = 1,8 e máximo = 8,0), B8 (média 2,1 e máximo = 11,0) e B9 (média = 2,1 e máximo = 11,0).

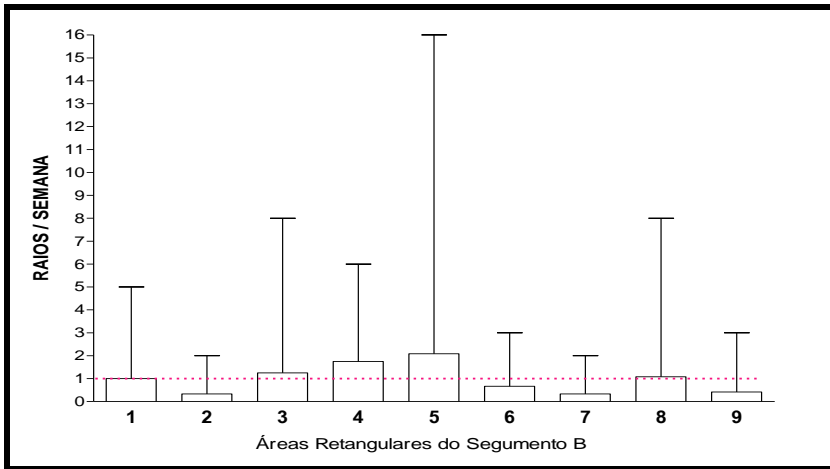


Figura 30: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento B, no período seco no leste da Amazônia. A linha tracejada (vermelha) representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento B no período seco.

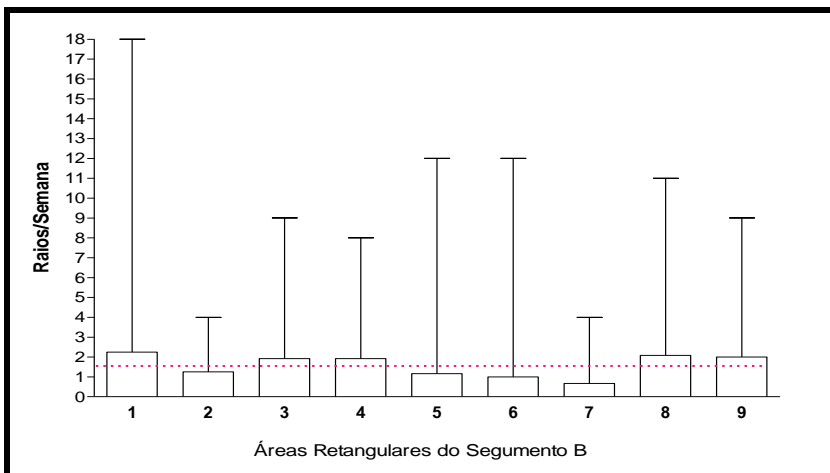


Figura 31: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento B, em meses do período chuvoso no leste da Amazônia. A linha tracejada (vermelha) representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento B no período chuvoso.

Raios sobre o Segmento C (Tucuruí-Novo Repartimento)

Nos meses do período climatologicamente mais seco (Figura 32) a avaliação da incidência média semanal de descargas atmosféricas dentro do Segmento C, entre os municípios de Tucuruí e Novo Repartimento (média aritmética = 0,18 raios) mostrou que a área retangular C7, localizada nas proximidades do município de Novo Repartimento, apresentou incidência de raios (média = 0,48 e máximo = 7) maior que a média do segmento.

A distribuição da incidência semanal de descargas atmosféricas dentro do Segmento C (Média aritmética = 0,73 raios/semana), em um período climatologicamente chuvoso (figura 33), mostrou que houve duas Áreas Retangulares que apresentaram quantidade de raios maior que o valor esperado. As áreas retangulares C1 (média = 1,8 e máximo = 10,0) e C2 (média = 0,92 e máximo = 7,0) apresentaram incidência de raios maior que os outros pontos deste segmento.

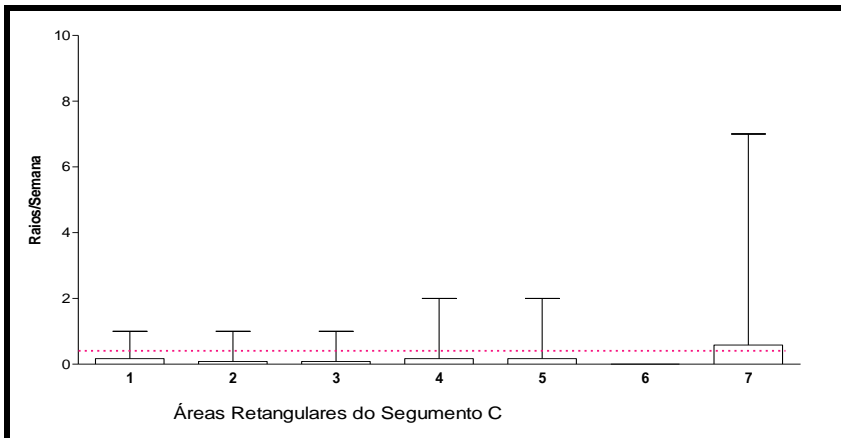


Figura 32: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento C, em meses do período seco no leste da Amazônia.

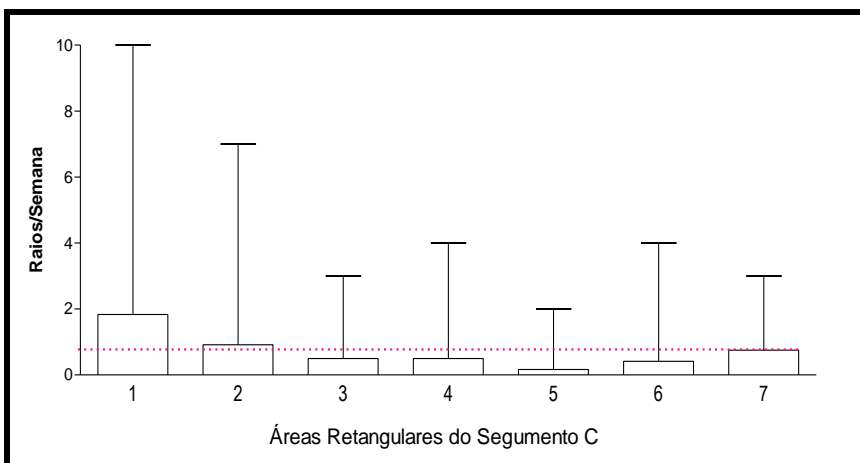


Figura 33: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento C, em meses do período chuvoso no leste da Amazônia.

Raios sobre o Segmento D (Jacundá-Marabá)

Nos 03 meses de estação seca (figura 34) a quantidade semanal de raios que incidiram sobre as 08 (oito) Áreas Retangulares que são traspassadas pelo Segmento D (média aritmética = 0,91 raio) mostrou que algumas áreas retangulares (D1, D4, D6 e D7) apresentaram média semanal acima do esperado (0,91 raio), logo, as seguintes áreas foram mais susceptíveis a descargas atmosféricas durante os meses de estação seca: D4 (média = 2,1 e máximo = 18), D7 (média = 1,4 e máximo = 11), D1 (média = 1,2 e máximo = 13) e D6 (média = 1,1 e máximo = 9).

A comparação da quantidade semanal de raios que sobre as 08 (oito) áreas retangulares que são traspassadas pelo Segmento D (Média aritmética = 1,46 raio/semana) da linha de transmissão da Rede CELPA durante os 03 meses típicos de estação chuvosa (Figura 35), mostrou que quatro áreas retangulares apresentaram média semanal acima do valor esperado: D1 (média = 1,8 e máximo = 19,0), D4 (média = 1,6 e máximo = 10,0), D6 (média = 1,6 e máximo = 9,0) e D7 (média = 1,4 e máximo = 7,0).

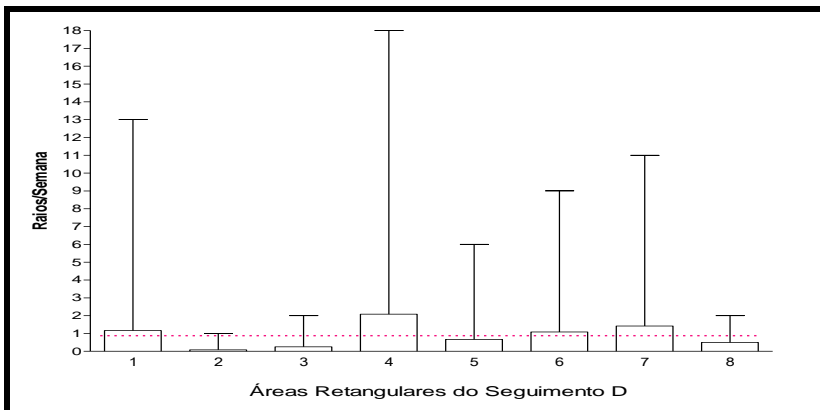


Figura 34: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento D, em meses do período seco no leste da Amazônia. A linha tracejada (vermelha) representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento D no período seco.

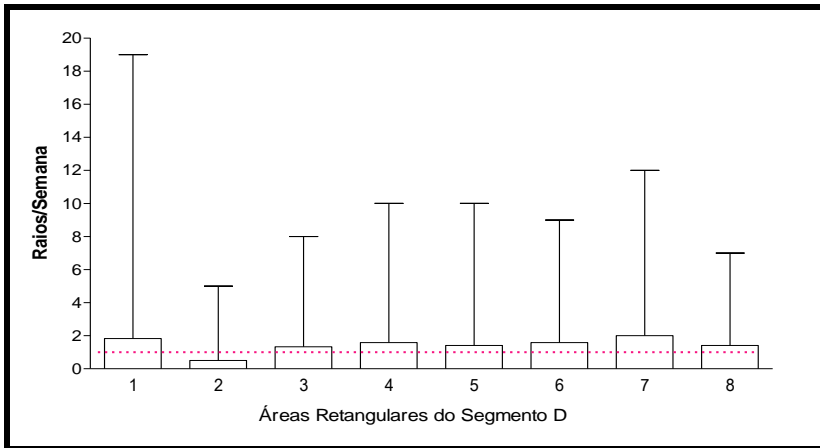


Figura 35: Média e máximo de raios/semana sobre Áreas Retangulares do Segmento D, em meses do período chuvoso no leste da Amazônia. A linha tracejada (vermelha) representa a média de raios/semana de todas as áreas que compõem o Segmento D no período chuvoso.

Comparação da incidência semanal de raios

A incidência de raios sobre áreas retangulares traspassadas pelos segmentos da linha de transmissão de energia elétrica foi avaliada em um trimestre seco e um chuvoso. O resumo desses dados encontra-se na Tabela 6.

A média de raios/semana foi sempre maior no período chuvoso. A menor diferença de incidência de raios entre os períodos seco e chuvoso ocorreu no Segmento C (Tucuruí-Novo Repartimento) que apresentou as seguintes proporções de áreas retangulares com quantidade de raios acima da média: Seco (14%) e Chuvoso (28%). A maior diferença entre os períodos seco e chuvoso foram observadas no Segmento A (Tucuruí-Novo Repartimento) que apresentou as seguintes as Áreas Retangulares com raios acima da média: Seco (21%) e Chuvoso (47%).

Tabela 6: Resumo da comparação entre a incidência de raios/semana em cada Segmento das linhas de transmissão da CELPA em dois períodos: Seco e Chuvoso.

		Período Seco	Período Chuvoso
		Set, Out, Nov/2007	Jan, Fev, Mar/2008
Segmento A	Média de raios/semana	0,18	1,36
	Áreas acima da média	A1, A2, A3 e A4	A1, A4, A12, A13, A14, A15, A17, A18, A19
	Proporção acima da Média	21,0%	47,0%
Segmento B	Média de raios/semana	1,0	1,58
	Áreas acima da média	B3, B4, B5 e B8	B1, B3, B4, B8 e B9
	Proporção acima da Média	44,0%	56,0%
Segmento C	Média de raios/semana	0,18	0,73
	Áreas acima da média	C7	C1 e C2
	Proporção acima da Média	14,0%	28%
Segmento D	Média de raios/semana	0,91	1,46
	Áreas acima da média	D1, D4, D6 e D7	D1, D4, D6 e D7
	Proporção acima da Média	50%	50%

Fonte: Starnet, SIAM/S18, UFPA/IG/PPGCA

A comparação dos quatro Segmentos (inteiros) dentro de cada período de estudo (ver Tabela 10) mostrou que durante os meses de período seco foi maior a variabilidade, especialmente registrada pelo Coeficiente de Variação (223% a 489%), por outro lado, no período chuvoso a variação foi menor (196% a 252%). No período seco houve maior quantidade de semanas sem raios (75%) contra apenas

25% no período chuvoso. No período seco houve dois segmentos que apresentaram maior incidência de raios: Mojú-Tailândia e Jacundá-Marabá.

Tabela 7: Resumo da comparação entre a incidência de raios/semana em segmentos da linha de transmissão da CELPA em dois períodos: Período Seco (Set, Out, Nov/2007) e Período Chuvoso (Jan, Fev, Mar/2008).

	Período Seco	Período Chuvoso
	Set, Out, Nov/2007	Jan, Fev, Mar/2008
Semanas sem raio	3/4 (75%)	1/4 (25%)
Coeficiente de variação		
Mínimo	223%	196%
Máximo	489%	252%
Assimetria		
Mínimo	3,8	2,9
Máximo	7,6	3,4
p-valor (Kruskal-Wallis)	0,0011*	0,0783
	Diferença Extrema	Sem Evidência de Diferença
Segmentos mais propícios a descargas atmosféricas	(B) Mojú-Tailândia (D) Jacundá-Marabá	Não Houve

Fonte: STARNET, SIAM/S18, UFPA/IG/PPGCA

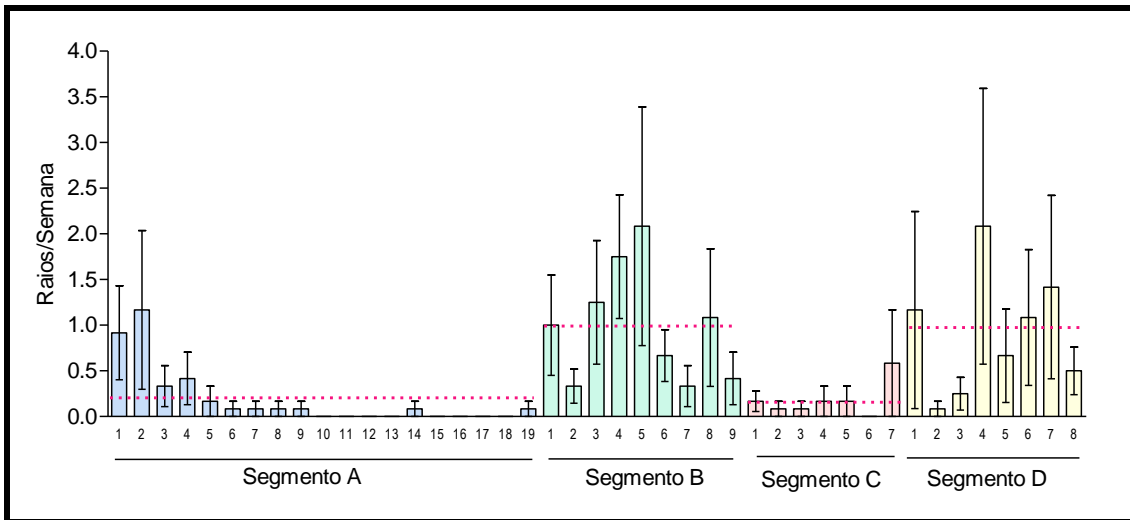


Figura 36: Média e erro padrão da quantidade de raios/semana sobre Áreas Retangulares traspassadas por Segmento da linha de transmissão. Valores estimados pelo SIAM\S18, no período de 01/set/2007 a 30/nov, 2007(trimestre seco). Segmento A (azul), Segmento B (verde), Segmento C (vermelho) e Segmento D (amarelo).

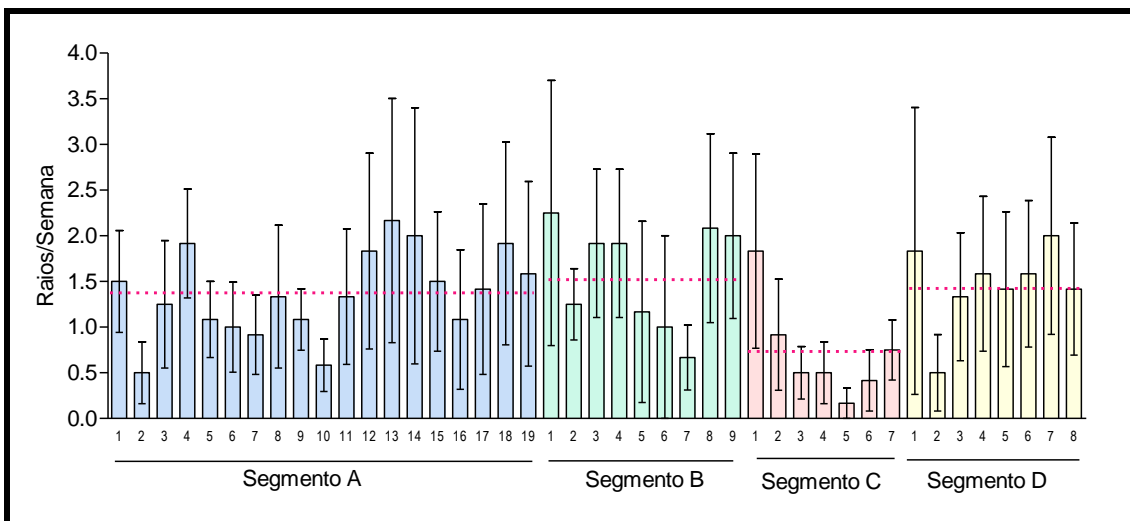


Figura 37: Média e erro padrão da quantidade de raios/semana sobre Áreas Retangulares traspassadas por Segmento da linha de transmissão. Valores estimados pelo SIAM\S18, no período de 01/jan/2008 a 31/mar/2008 (trimestre chuvoso). Segmento A (azul), Segmento B (verde), Segmento C (vermelho) e Segmento D (amarelo).

5.2.5 Estações e segmentos mais propensos a incidência de raios

O estudo da incidência de raios em regiões traspassadas por linhas de transmissão em meses de períodos seco e chuvoso no leste da Amazônia possibilitou a realização de algumas análises. Inicialmente foi observado que no período chuvoso ocorreu maior número de raios em todos os segmentos de linhas de transmissão. Nos meses e período chuvoso os raios foram mais homoganeamente distribuídos ao longo do trajeto das linhas de transmissão. Nos meses de estação seca os segmentos B (Mojú-Tailândia) e D (Jacundá-Marabá) foram os que receberam maior número de descargas atmosféricas. Nos meses do período seco observou-se a maior quantidade de semanas sem raios sobre os segmentos de linhas de transmissão.

Esses resultados podem ser utilizados pela empresa CELPA Rede Energia para planejar melhorias na proteção de suas linhas de transmissão de energia, através de medidas preventivas, como instalação de novos dispositivos de pára-raios e de aterramento, nos locais e períodos de maiores incidência de raios sobre as mesmas. Dessa forma esse estudo de caso chegou ao objetivo proposto de sugerir melhorias de desempenho desse sistema elétrico e diminuição de perdas financeiras para a Empresa e seus usuários.

6. CONCLUSÃO

A análise da ocorrência de raios sob diferentes condições meteorológicas no leste da região Amazônica, entre os anos de 2006 a 2008, foi realizada através de um software que foi elaborado para ajustar observações de raios da rede STARNET aos níveis de maior eficiência da RDR/SIPAM. Os resultados mostraram boa correspondência entre as áreas com convecção intensa e o incremento significativo na ocorrência de raios. Nas regiões de mais alta atividade elétrica atmosférica, foi observada ocorrência de convergência dos ventos e anomalias negativas de ROL, para situações de presença de ZCAS e ZCIT sobre a região em estudo. Em uma semana sob influência da ZCIT verificou-se que o número de raios foi maior em um arco que se estendeu do litoral atlântico do Estado do Pará até o arquipélago do Marajó e o sul do Amapá. Nessa região constatou-se que as configurações de ROL, chuva e ocorrências de raios coincidem espacialmente

A influência da ZCAS na região de estudo coincidiu com picos semanais de densidade de raios, especificamente nas localizações entre o sul e sudeste do Estado do Pará, o Estado do Tocantins, o sul do Maranhão e o norte do Piauí. Na semana de ZCAS a maior quantidade de raios coincidiu com a área de maior precipitação, mas não com a área de maior anomalia negativa de ROL.

Outra aplicação do software desenvolvido foi feita para avaliar a incidência de raios em regiões traspassadas por quatro segmentos de linhas de transmissão de energia elétrica. Em um trimestre seco a incidência de raios foi maior (p -valor = 0,0011*) em dois segmentos: Mojú-Tailândia e Jacundá-Marabá. Durante o trimestre chuvoso a densidade de raios apresentou distribuição mais uniforme.

Com base na avaliação estatística, a ocorrência de raios no leste da Amazônia foi significativamente influenciada por condições meteorológicas de larga escala. Portanto, essas condições tem o potencial de interferir na continuidade do funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica e outras atividades humanas na Amazônia Oriental. Conseqüentemente, os resultados deste estudo também fornecem subsídios para a elaboração de medidas preventivas, de proteção de linhas de transmissão de energia, visando a diminuição de perdas e danos para sociedade amazônica.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M.L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Revista Geonomos**, v. 06, nº 2, p.17-22, dez. 1998.
- ALTARATZ, O., Z. LEVIN, YAIR, **Winter thunderstorms in Israel: A study with lightning location systems and weather radar**. American Meteorological Society. Monthly Weather Review 2001; 129: 1259-1266.
- ALTARATZ, O., Z. LEVIN, TAMIR REISIN, T. **Simulation of the electrification of winter thunderclouds using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulations**. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110, D20205, doi:10.1029/2004JD005616, 2005.
- ALMEIDA, A. C., MONTEIRO, J. H. A., VIEIRA, G. R., CUNHA, H. T. S., ROCHA, B. R. P., SOUZA, J. R. S., SOUZA, E. B., SOUZA, W. A. P. **Lightning characteristics associated to severe rainfall events, around Belém-Pa-Brazil**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.
- ARAÚJO, R.L., DINIZ, J.M., CHERCHIGLIA, L.C., ERICSSON, A.J., GOLDENLUYS, H.J. Applied research in a intertropical mountainous area. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER DISTRIBUTION, 1., 1990, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: AIEE, 1990. p.1-6.
- AYRES, MANUEL, AYRES JR, MANUEL, AYRES, DANIEL LIMA, SANTOS, ALEX DE ASSIS SANTOS DOS. **BioEstat 5: Aplicações Estatísticas nas Áreas das Ciências Biológicas e Médicas**. 5. ed. Belém-PA: Publicações Avulsas do Mamirauá, 2007. 361 p.
- BEZERRA, A.C.N., NEVES, D.G., CAVALCANTI, E.P. **Perfis verticais de energia estática da atmosfera sobre o norte e nordeste do Brasil em episódios anômalos**. Revista SODEBRAS, Volume 1, Nº 1, 2006.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **British Standard Code of Practice for Protection of Structures against Lightning**. (BS 665). [S.l.], 1992.
- CARVALHO, L.M.V., JONES, C., LIEBMANN, B. **The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence and relationship with interseasonal to interannual activity and extreme rainfall**. Journal of Climate, .17, p.88-108, 2004.
- CAVALCANTI, I. F. A.; P. SATYAMURTY; J. A. MARENGO; C. A. NOBRE; I. TROSNIKOV; J. P. BONATTI; A. O. MANZI; T. TARASOVA; C. D'ALMEIDA; G. SAMPAIO; C. C. CASTRO; M. SANCHES; H. CAMARGO; L. P. PEZZI. **Climate characteristics in an ensemble simulation using the CPTEC/COLA atmospheric global circulation model**. São José dos Campos: INPE, 2001. 71 p. (INPE-8150-RPQ/717).

CAREY, L. D., MURPHY, M. J., MCCORMICK, T. L., DEMETRIADES, N. W. S. “**Lightning location relative to storm structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system**”, *J. Geophys. Res.*, vol. 110, D03105, doi: 10.1029/2004JD004371, 2005.

CHALMERS, J. A. **Atmospheric Electricity**. London: Pergamon Press, 1957. p. 235-255, 327 p.

DOSWELL III, CHARLES A.; RASMUSSEN, ERIK N. **The effect of neglecting the virtual temperature correcting on CAPE calculations**. [S.l.]: NOAA/Environmental research laboratories, 1994..

CHEN,S.M., DU, Y., FAN, L. M. **Lightning Data Observed With Lightning Location System in Guang-Dong Province, China**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004

CHEVALIER, G. **The Earth's Electrical Surface Potential A summary of present understanding**. California Institute for Human Science.

Disponível em: http://www.earthinginstitute.net/commentaries/gaetan_electrical_surface.pdf.

Acessado em: 12 jul 2010

CHEVALIER, G.; MORI, K.; OSCHMAN, J.L. **The Effect of Earthing (grounding) on Human Physiology**. European Biology and Bioelectromagnetics (2006) 31/01 600-621; Disponível em: http://www.earthingsolutions.com/pdf/EFX_science_Physiology.pdf. Acessado em: 12 jul 2010:

COLLE, B. A.; C. F. MASS e K. J. WESTRICK. “**MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-99 cool seasons**”. *Weather and Forecasting*. V.15, p.730-744,2000.

CLIMANÁLISE: **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista-SP: INPE/CPTEC, 2007, v.23.n.3.40p.

CUMMINS, K. L. **Lightning Information for use in Power Systems Analysis: How much more do we need to know?** IEEE 0-7803-7525-4/02, 2002

DIENDORFER, G.; SCHULZ, V.; RAKOV V.A. **Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Locating System**. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 40, NO. 4, 1998

KRIDER, E.P. **Benjamin Franklin and Lightning Rods**. Physics Today. American Institute of Physics, S-0031-9228-0601-020-0, 2006.

Disponível em: <http://www.benjaminfranklinhouse.org> Acessado em: 24 set 2007.

FARIAS, W.R.G.; ZEPKA, G.S.; PINTO JR, O. **A FORECAST CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING SYSTEM PART 2 - SUPPORT VECTOR MACHINES PRELIMINARY RESULTS**. Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais – INPE, 2006.

FLEAGLE, R. G., BUSINGER, J. A. **AN INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC PHYSICS:** New York: Academic Press, 1980.

GALVAN, A.; COORAY, V.; SCUKA, V. **Interaction of Electromagnetic Fields.** Hagenguth, J. H., 1951: Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on Volume: 41 Issue: 3 page: 250 - 257. ISSN: 0018-9375, 1999.

HIDAYAT, S., HARYANTO, N., SRIYATMO, E. **Lightning Characteristics and performance of Distribution Systems around Jakarta.** IEEE. 0-7803-7525-4/02, 2002.

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

HIDAYAT, S.; SIRAIT, K.T.; PAKPAHAN, P.M.; ISHII, M.; HOJO, J. **LIGHTNING CHARACTERISTICS ON JAVA ISLAND, OBSERVED BY LIGHTNING LOCATION NETWORK.** High Voltage Engineering Symposium, Volume: 2, pages: 192 - 195 vol.2, ISSN: 0537-9989, 1999.

HOLLADAY, APRIL. **Not so hot lightning.** WeatherQuesting. Disponível em: <<http://www.weatherquesting.com/not-so-hot-lightning.htm>>. Acessado em: 11 jul. 2010.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric Physics.** Dordrecht: D. Reidel, 1986.

JOHNSON, P. **Lightning by Porter Johnson.** Disponível em: <<http://www.iit.edu/~johnsonp/smart00/lesson2.htm>> Acessado em: 15 jul. 2010.

JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SANTOS, I., A.; GARRANA D. **Operacionalização de previsões meteorológicas locais no Estado do Rio de Janeiro.** Boletim da SBMET, julho, 2001.

KALNAY, E. **The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.** Bulletin of the American Meteorological Society, v.77, n.3, p437-471. 1996.

KOCHTUBAJDA, B.; BURROWS, W.; POWER, B. **An Analysis of Large Current Lightning Flashes Across Canadá: 1999-2006.** Journal of Lightning Research, Volume 3, 2007, pages 27-43

KODAMA, Y. **Large-scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones**”, Journal Meteorological Society of Japan, v.70, 813-835, 1992.

LEES, M.I. **Extension of and improvements to the ERDC low frequency magnetic direction finding system.** In: Int Conference on Lightning and Static Electricity. NASA Accession Number: 91N32708; Document ID: 19910023394, 1991.
Disponível em: <http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp> Acessado em: 14 jul 2010

LIEBMANN, B.; KILADIS, G.N.; VIEIRA, C.S.; SAULO, A.C.; CARVALHO, L.M.N. **Subseasonal variation on South America in the vicinity of the low-level jet East of Andes and comparison to those in the South Atlantic Convergence Zone.** *Journal of Climate*, v.17, n.19, p.3829-3842, 2004.

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

LIEBMANN, B. et al. **Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone.** *Journal of Climate*, v.12, p.1877-1891. 1999.

LOPES, M.N.G. **Aspectos regionais da variabilidade de precipitação no Estado do Pará: estudo observacional e modelagem climática em alta resolução.** 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2009.

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

MARTON, E., **“Oscilações Intrasazonais Associadas a Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro”**, 2000. Tese de Doutorado, IAG/USP, SP, SP.

MICAH, F. **How Lightning Forms.** Public Broadcasting System, 2007.

MOLION, L.C.B. **Climatologia dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.2,p.107-117.1987.

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*, 4(2), 141-159. 2003.

MORALES, C., CÂMARA, E. K. S., ANAGNOSTOU, E.N., SALES, F., PINHEIRO F.G. **STATUS ON THE ZEUS LIGHTNING NETWORK IN BRAZIL AND ITS APPLICATION TO THE ELECTRICAL SECTOR OF COELCE.** In: IX International Symposium on Lightning Protection. 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil

MELO, A.B.C.; NOBRE, P.; MENDES, D.; BOTTINO, M.J. **A Zona de Convergência Intertropical sobre o oceano Atlântico: Climatologia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu-PR. SBMet, 2002.

MUNOZ, R. **Factsheet: Lightning.** University Corporation for Atmospheric Research. 2003.

Disponível em: <http://www.ucar.edu/communications/factsheets/Hail.html>

Acessado em: 7 jul 2010

MURPHY . **Lightning detection and data acquisition system**. United States Patent. US 6,791,311 B2. 2004. Disponível em: www.freepatentsonline.com/6791311.html
Acessado em: 7 jul 2010

NASA. **Soaking in Atmospheric Electricity**, Space Science News, NASA. 2002. Acessado em 10/jul/2010. http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/1999/essd15jun99_1/

NASA. "**Flashes in the Sky: Lightning Zaps Space Radiation Surrounding Earth**". 2005. Disponível em: http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/image_lightning.html
Acessado em 12 set 2010.

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

NGDC - NOAA. **Volcanic Lightning**. National Geophysical Data Center - NOAA. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/stratoguide/galunfeat.html>
Acessado em: 13 jul 2010.

NOGUES-PAEGLE, J.; MECHOSO, C.R.; FU, R.; BARBERY, E.H.; CHAO, W.C.; CHEN, T.C. PROGRESS IN Pan American CLIVAR research. Understanding the South America Monsoon. Meteorologica, v.27, p.3-30, 2009.

NWS. **Lightning Safety**. National Weather Service, 2007. Disponível em: <http://www.lightningsafety.noaa.gov/> Acessado em: 7 jul 2010.

JOHNSON, P. (2007) Lightning and Storms. Lightning on a Shelf Cloud. Disponível em: <http://www.chaseday.com/lightning.htm> Acessado em: 14 jul 2010.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 196p., São Paulo, 2000.

POPOLANSKY, F. **Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents**, Electra, no.22, pp139-147, 1972.

QUADRO, M.F.L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 94f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 1994.

QUADRO, M.F.L. **Case study of the South Atlantic convergence zone (SACZ) over the South America**. *Rev. Bras. Geof.*, 1999, vol.17, no.2-3, p.210- 210. ISSN 0102-261X.

RAKOV, V.A; UMAN, M., (2003) **Lightning: Physics and Effects**, Cambridge University Press. 687 pp., Cambridge Univ. Press, New York.

RAKOV, V.A. (1999). **Lightning Makes Glass**. University of Florida, Gainesville. **29th Annual Conference of the Glass Art Society, Tampa, Florida, 1999**.

Disponível em: <http://plaza.ufl.edu/rakov/Gas.html> Acessado em: 12 jul 2010.

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.

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

ROBERTSON, A.W.; MECHOSO, C.R. Interannual and decadal variability of the South Atlantic Convergence Zone. *Monthly Weather Review*, v.128, p.2947-2957, 2000.

ROCHA, B. R. P.; PEREIRA, C. S.; ROCHA, E. J. P.; LESSA, L. A. S.; SOUZA, J. R. S.; MOTA, G. V.; LOBATO, M. P.; MONTEIRO, J. H. A. **LIGHTNING CHARACTERISTICS TIME DISTRIBUTION OVER FOUR LOCATIONS IN EASTERN AMAZONIA**. In: IX International Symposium on Lightning Protection. 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.

ROCHA, B. R. P. J.R.S. SOUZA, COSTA, J.M. **“Electric and Magnetic Fields from Lightning in Belém”**. In: *Anais do II Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, pp. 55-58, Ouro Preto - MG, 1996.

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.

SAUNDERS, C. P. R.; BROOKS, I (1992), **The effects of high liquid water content on thunderstorm charging**, *J. Geophys. Res.*, 97(D13), 14,671- 14,676.

SAUNDERS, C. P. R.; H. NORMAN; AVILA, E.E. (2003), **Laboratory studies of the effect of cloud conditions on charge transfer in thunderstorm electrification (abstract)**, paper presented at 12th International Conference on Atmospheric Electricity, Off. Natl. d'Etudes et de Rech. Aerospatiales, Versailles, France.

SAUNDERS, C. P. R.; W. D. KEITH; MITZEVA, R.P. (1991), **The effect of liquid water on thunderstorm charging**. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 96, NO. D6, PP. 11,007-11,017, 1991.

SCHONLAND, B. F. **The Flight of Thunderbolts**, Clarendon Press, 1550. Oxford. 152 pp.

SCOTT, L J: **'A Lightning Location system for the UK Electricity Supply Industry'**, Int. In: Conference on Lightning and Static Electricity, 1988.

SEABRA, M.S., ROCHA, C.H.E.D., MENEZES, W.F. **Comparação dos Efeitos dos Ventos ZCAS de janeiro de 2006 nas Cidades do Rio de Janeiro e Brasília**. Congresso Brasileiro de Meteorologia – CBMET, Florianópolis, 2006.

SERRA, A. **Climatologia: Trovoadas e Névoa Seca**, In: Boletim Geográfico, Rio de Janeiro, 35(255), Out/Nov 1977, p. 142-163

SHINDO, T., YOKOYAMA, S. **Lightning Occurrence data Observed with Lightning Location Systems in Japan: 1992-1995**. IEEE Transactions on Power delicery, 1998. Vol. 13, No. 4, 0885-8977/98.

SHOORY, A.; MOINI, R.; SADEGHI, S.H.H.; RAKOV, V.A. **Analysis of Lightning-Radiated Electromagnetic Fields in the Vicinity of Lossy Ground**. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 47, NO. 1, 2005.

SILVA, L.M. **Caracterização dos regimes de umidade em regiões tropicais: comparação entre floresta e savana**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, EMBRAPA, Museu Emílio Goeldi. 2008

SRINIVASAN,K.; GU, J. (2006). **LIGHTNING AS ATMOSPHERIC ELECTRICITY**. IEEE CCECE/CCGEI, 1-4244-0038-4.

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.; ALVES, J.M.B.; NOBRE, P. “**Anomalias de precipitação nos setores norte e leste do noreste brasileiro em associação aos eventos do padrão dipolo na bacia do atlântico tropical**”, *Revista Brasileira de meteorologia*, v.13, n2, 45-55. 1993.

SOUZA, E.B.; NOBRE, P. **Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Atlântico tropical**. *Rev. Bras. Meteor.*, v.13, n.1, p.31-44, 1998.

SOUZA, J.R.S.; ROCHA, B.R.P.; CARRERA, G.T. “**CG-Lightning Observation (and applications) Around Belém During the 1995-1998 Period**”. In: *Proceedings of the V International Symposium on Lighting Protection*, Vol. 1, pp. 17-21, São Paulo - SP, 1999.

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.

SOUZA, E.B. **Precipitação Sazonal Sobre a Amazônia Oriental no Período Chuvoso: Observações e Simulações Regionais com o REGCM3.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.2, 111-124, 2009.

SOUZA, J.R.S. **Desenvolvimento de sistema de alerta, através de observações de nuvens e raios, para a melhoria da proteção e desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica.** Relatório Técnico Final. Projeto Cepa Rede Energia/ANEEL, 2010.

TAKAHASHI, T. (1978), **Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms.** J. Atmos. Sci., 35, 1536- 1548.

TAKAHASHI, T. **A numerical simulation of winter cumulus electrification: Part I.** Shallow cloud, J. Atmos. Sci., 40, 1257- 1280.,1883.

TAKAHASHI, T. **Thunderstorm electrification a numerical study.** J. Atmos. Sci., 41, 2541- 2558, 1984.

USGS (1998). **Bench collapse sparks lightning, roiling clouds.** United States Geological Society. Disponível em: http://hvo.wr.usgs.gov/volcanowatch/1998/98_06_11.html. Acessado em: 15 jul 2010.

VISACRO, S.F. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia.** 17-62. Editorial Artliber, São Paulo, 2005.

WAHLIN, L. **Atmosphere electrostatics.** Research Studies Press, 1989, N.Y. ISBN 0-86380-042-4.

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. Geophysics. Res.*, Vol. 111, D05206, doi:10.1029/2005JD006411, in press, 2006 (SCI).

ZAR, J.H. **Biostatistical analysis.** 2^a ed. Prentice Hall, USA, 1994.

ZAJAC, B.A.; RUTLEDGE, S.A. **Cloud-to-Ground Lightning Activity in the Contiguous United States from 1995 to 1999.** American Meteorological Society. Monthly Weather Review 2001; 129: 999-1019.

ZIEGLER, C. L.; MACGORMAN, D.R., RAY, P. S.; DYE, J.E. **A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm,** *J. Geophys. Res.*, 96, 12,833- 12,855, 1991.

ZIEGLER, C. L.; RAY, P. S.; MACGORMAN, D.R. **Relations of kinematics, microphysics and electrification in an isolated mountain thunderstorm,** *J. Atmos. Sci.*, 43, 2098- 2115, 1986.

ANEXOS

ANEXO A– LOCALIZAÇÃO DOS SEGMENTOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

SEGMENTO CASTANHAL - PARAGOMINAS

Tabela 5 – Localização geográfica de 8 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Paragominas/Castanhal. Localização Paragominas: -3.01028 / -47.3431 / 101 m. Localização Castanhal: -1.3008 / -47.9475 / 65 m.

Pontos / GPS	Latitude	Longitude
1	02° 50' 23,4'' S	47° 26' 28,8'' W
2	02° 41' 32,6'' S	47° 28' 11,6'' W
3	02° 28' 27,3'' S	47° 30' 30,5'' W
4	02° 27' 05,9'' S	47° 30' 34,0'' W
5	02° 21' 51,2'' S	47° 33' 12,3'' W
6	02° 13' 55,1'' S	47° 33' 36,1'' W
7	01° 42' 17,4'' S	47° 30' 19,7'' W
8	01° 30' 55,5'' S	47° 31' 10,5'' W

Fonte: Silva, G.C.G. Levantamento de Campo In: Relatório Técnico Final (Souza, 2010)

SEGMENTO TUCURUI – NOVO REPARTIMENTO

Tabela 6 – Localização geográfica de 5 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Tucuruí/Novo Repartimento. Localização Tucuruí: -3.8227/ - 49.6750 / 148 m. Localização Novo Repartimento: - 4,2432 / - 49, 9369/ 117 m.

Pontos / GPS	Latitude	Longitude
1	03° 53' 41,4'' S	49° 41' 09,5'' W
2	03° 58' 19,2'' S	49° 44' 00,9'' W
3	04° 07' 38,1'' S	49° 52' 10,9'' W
4	04° 11' 50,0'' S	49° 54' 12,0'' W

5

04° 14' 35,6'' S

49° 56' 13,1'' W

Fonte: Silva, G.C.G. Levantamento de Campo In: Relatório Técnico Final (Souza, 2010)

SEGMENTO MARABÁ – JACUNDÁ

Tabela 6 – Localização geográfica de 11 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Marabá/Jacundá. Localização Marabá: -3.01028 / -47.3431 /101 m. Localização Mojú: -1.3008 / -47.9475 / 65 m.

Pontos / GPS	Latitude	Longitude
1	-5,1255	-49,0497
2	-4,9038	-49,0684
3	-4,7367	-49,0705
4	-4,6254	-49,0994
5	-4,4498	-49,1165
6	-2,8809	-48,9651
7	-2,4816	-48,7553
8	-2,4517	-48,7357
9	-2,4250	-48,7376
10	-1,9034	-48,7684
11	-1,8612	-48,7582

Fonte: Silva, G.C.G. Levantamento de Campo In: Relatório Técnico Final (Souza, 2010)

SEGMENTO MOJÚ-TAILÂNDIA

Tabela 7 – Localização geográfica de 11 pontos fixos marcados sob as torres da Celpa. Trecho: Mojú-Tailândia. Localização Marabá: -3.01028 / -47.3431 /101 m. Localização Mojú: -1.3008 / -47.9475 / 65 m.

Pontos / GPS	Latitude	Longitude
1	(-4.44,-49.20)	(-4.53,-49.02)
2	(-4.53,-49.18)	(-4.61,-49.00)
3	(-4.61,-49.18)	(-4.70,-49.00)
4	(-4.70,-49.16)	(-4.79,-48.98)

5	(-4.79,-49.15)	(-4.88,-48.97)
6	(-4.88,-49.17)	(-4.97,-48.99)
7	(-4.97,-49.17)	(-5.06,-48.99)
8	(-5.06,-49.15)	(-5.15,-48.98)

Fonte: Silva, G.C.G. Levantamento de Campo In: Relatório Técnico Final (Souza, 2010)

ANEXO B – MANUAL DO SISTEMA SIAM/S18

1. REQUERIMENTOS DO SISTEMA

O SIAM/S18 requer sistema operacional Windows XP ou posterior e um processador compatível com o padrão Intel Pentium com no mínimo 1024 MB de memória RAM.

2. INSTALAÇÃO DO SIAM/S18

- a) Coloque o CD-ROM do SIAM/S18 no drive apropriado;
- b) Execute o programa setup.exe;
- c) Com a instalação completa, o SIAM/S18 estará disponível no menu Iniciar.

3. INERFACE DO SIAM/S18.

O programa SIAM/S18 foi projetado para acessar arquivos dos sistemas de detecção de raios RDR/SIPAM e STARNET e emitir mapas de densidade de raios. A tela inicial do sistema apresenta seis botões, localizados no lado direito: (a) Rede Zeus; (b) RDR/SIPAM; (c) Modelo conjunto; (d) Raios na linha de transmissão; (e) GAPI e (f) Redestacar o gráfico.

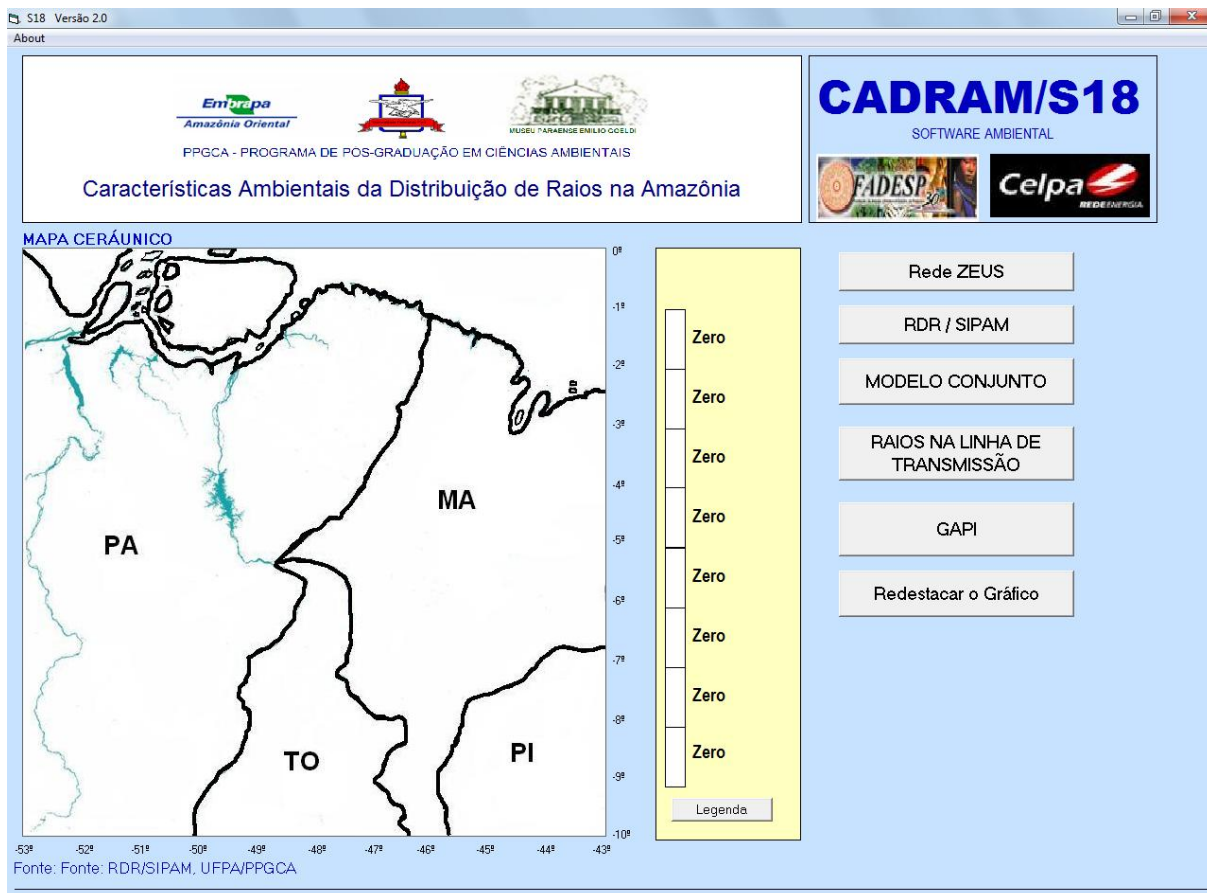


Figura 1: Interface do programa SIAM/S18.

As funcionalidades dos seis botões são:

(a) Rede Zeus: executa programa aplicativo cuja finalidade é emitir mapas de densidade de raios a partir de arquivos gerados pela rede STARNET.

(b) RDR/SIPAM: executa programa aplicativo cuja finalidade é emitir mapas de densidade de raios a partir de arquivos gerados pela rede de detecção de raios do Sistema de proteção da Amazônia - SIPAM.

(c) Modelo conjunto: este módulo encontra-se desativado.

(d) Raios na linha de transmissão: executa programa aplicativo cuja finalidade é estimar a quantidade de raios sobre os quatro segmentos de linha de transmissão.

(e) GAPI: este aplicativo tem a finalidade de compactar os dados provenientes da Rede STARNET para que, posteriormente, esses arquivos compactados possam ser processados para gerar mapas de densidade de raios e estimativas de raios sobre linhas de transmissão.

(f) Redestacar o gráfico: esta programa permite destacar as linhas de contorno dos mapas, desta forma, permitindo, melhorar a qualidade de visualização dos mapas de densidade de raios.

4. EMISSÃO DE MAPAS DE DENSIDADE RAIOS.

Para emitir mapas de densidade de raios, com base no modelo S18, são necessários três procedimentos:

- a) Clique no botão “Rede ZEUS” mostrado na Figura 1, então aparecerá a tela mostrada na Figura 2.
- b) Utilize interface da Figura 2, no lado esquerdo da figura, para localizar os arquivos que contém os dados provenientes da Rede STARNET. Esses arquivos deverão estar em formato de texto ou ter a extensão “.dat”.
Obs: Inicialmente os arquivos provenientes da Rede STARNET são fornecidos em arquivos compactados. O usuário deverá descompactar os arquivos antes de submetê-los ao SIAM/S18.
- c) Informe o Intervalo de latitude. Esse intervalo é delimitado pelas latitudes mínima e máxima de para as quais deseja-se estimar a densidade de raios.
- d) Informe o Intervalo de longitude. Esse intervalo é delimitado pelas longitudes mínima e máxima de para as quais deseja-se estimar a densidade de raios.
- e) Clique em “Processar PASTA INTEIRA”. Esse procedimento irá processar todos os arquivos de raios que estiveram na pasta selecionada. Este programa tem efeito cumulativo, ou seja, as quantidades de raios são acumuladas até que o usuário decida finalizar o arquivo GAPI.
- f) Finalizar o arquivo GAPI. Para completar o processo de geração do arquivo GAPI, o usuário deve clicar sobre o botão “GERAR ARQUIVO GAPI”. Esse procedimento solicitará que o usuário digite o nome do arquivo (GAPI) que está sendo gerado.
- g) Para deixar o sistema livre para a geração de novos arquivos GAPI, o usuário deve clicar sobre o botão “Inicializar Mapas”. Esse programa zera todas as variáveis do sistema.

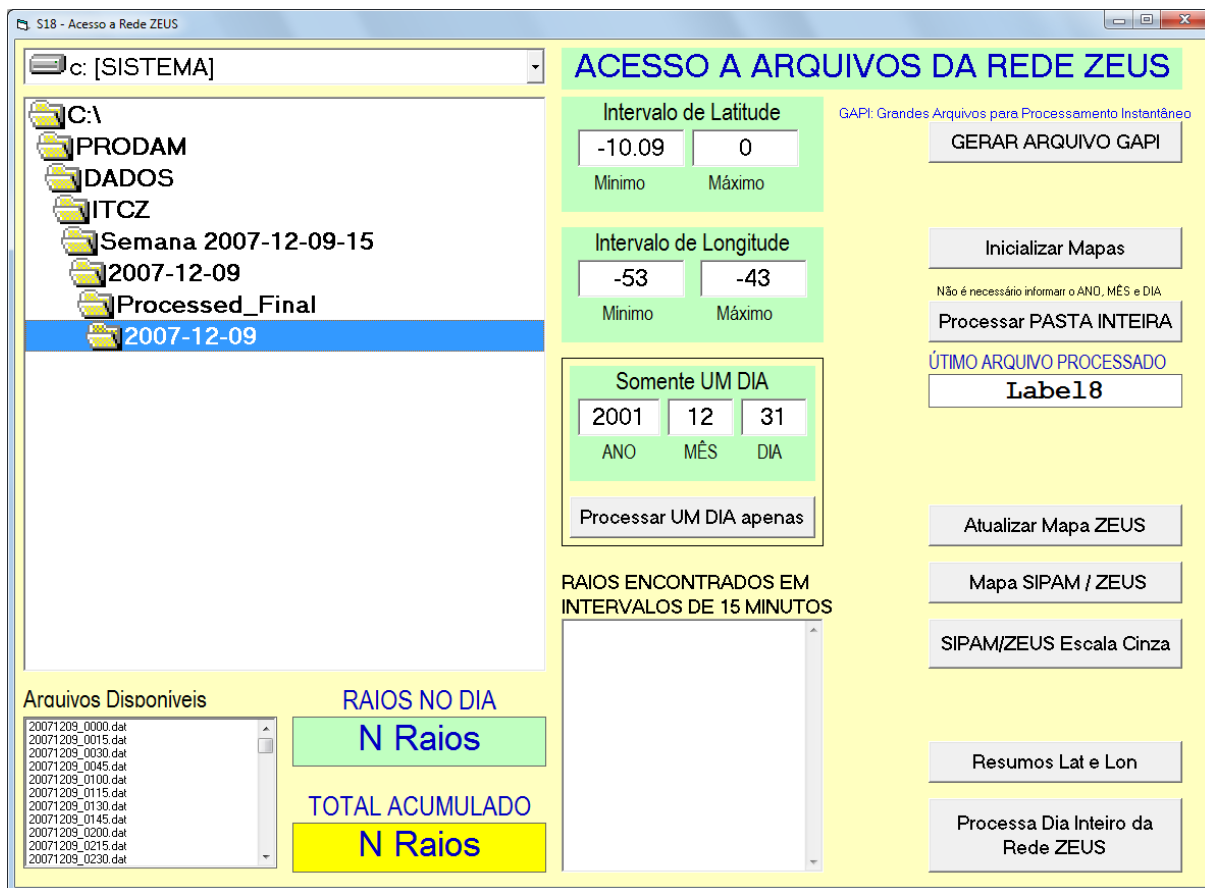


Figura 2: Construção do arquivo GAPI.

g) Para emitir um mapa de densidade de raios, o usuário deverá acessar a tela inicial do aplicativo e clicar sobre o botão “GAPI”. Esse programa exibirá uma tela conforme a ilustra a Figura 3, a qual , exibe uma lista de todos os arquivos GAPI disponíveis no sistema.

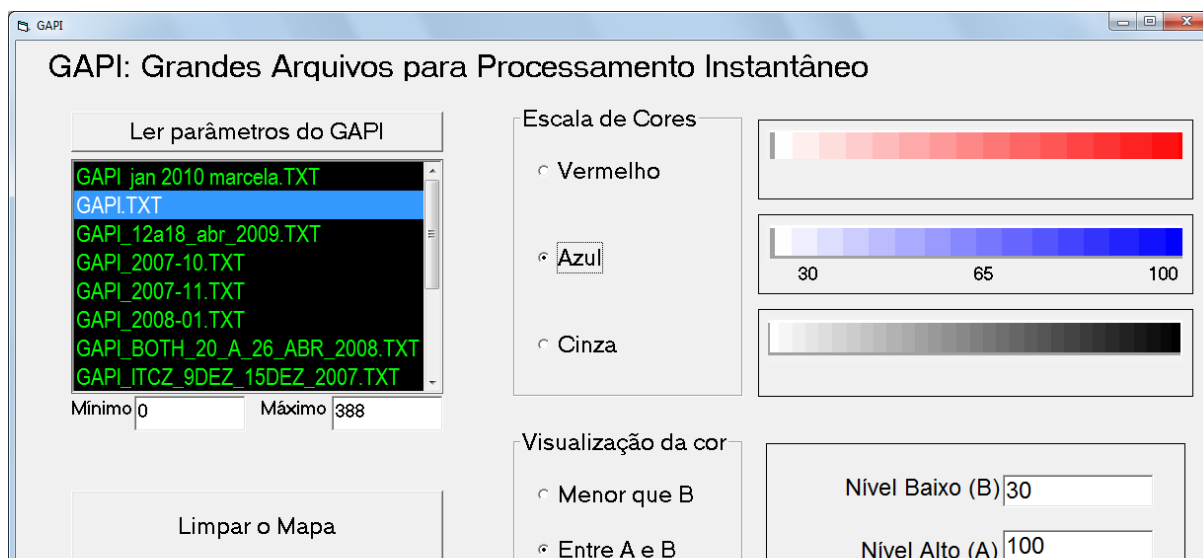


Figura 3: Lista dos arquivos GAPI já existentes e opções para geração de mapas de intensidade de raios.

- h) Para gerar os mapas configure os seguintes requisitos, conforme dispostos na Figura 3.
 - a. Escolha a cor padrão da escala do mapa:
 - i. Vermelho;
 - ii. Azul;
 - iii. Cinza.
 - b. Digite os níveis da escala:
 - i. Nível Baixo (B)
 - ii. Nível Alto (A)
 - iii. Valor Arbitrário (desativado)
 - c. Digite em que intervalo serão emitidas as graduações da escala:
 - i. Menor Que (B)
 - ii. Entre A e B
 - iii. Maior que XY (desativado)
 - d. Clique no botão “Processar GAPI”. Essa opção atualizará o mapa mostrado na Figura 1, entretanto, desta forma surgirá o correspondente mapa densidade de raios conforme mostra a figura 4.

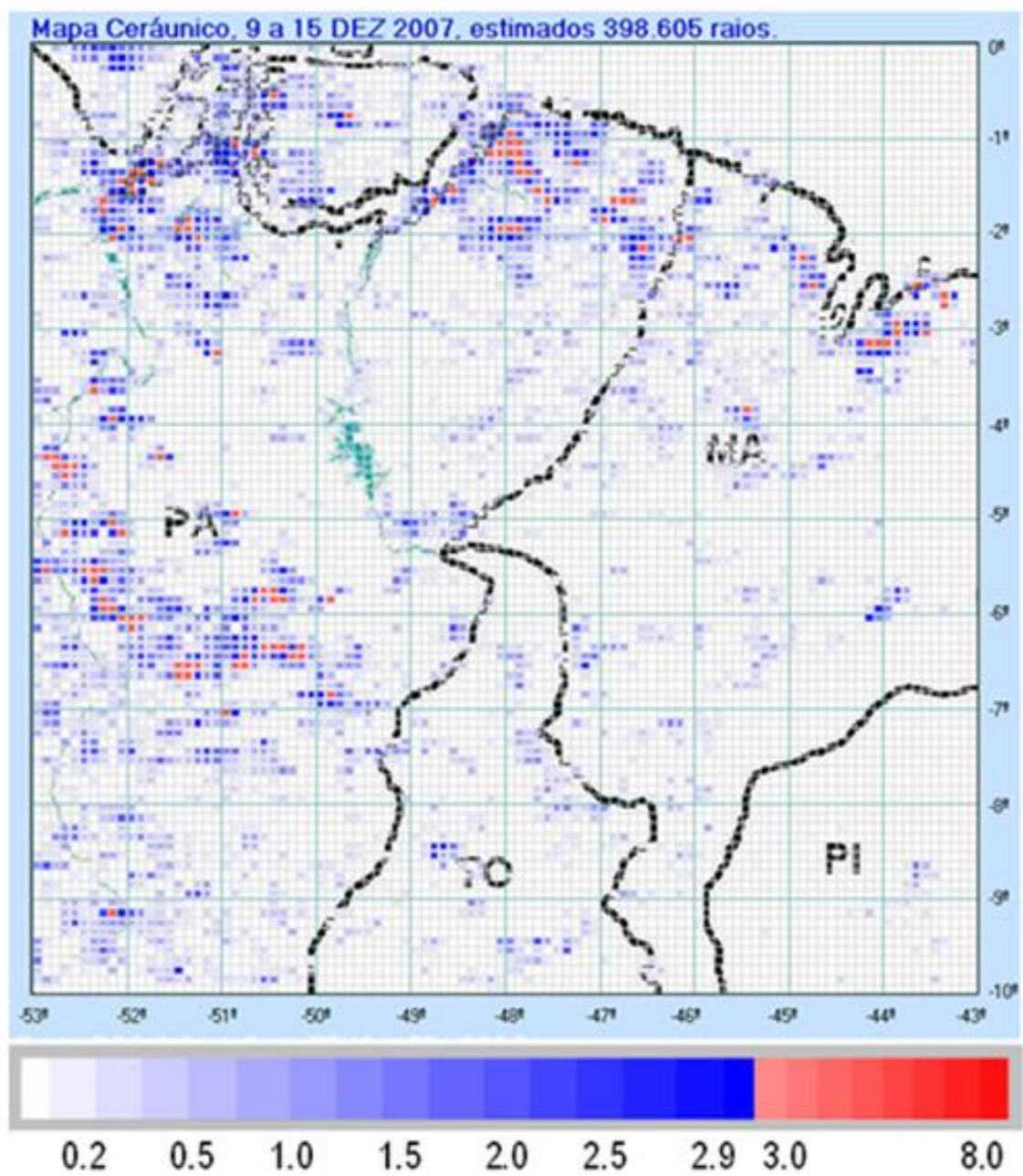


Figura 4: Mapa de densidade de raios.

5. EMISSÃO DA ESTIMAÇÃO DE RAIOS SOBRE A LINHA DE TRANSMISSÃO

Para estimar a incidência de raios sobre os segmentos da linha de transmissão realize os seguintes procedimentos:

- Clique no botão “RAIOS NA LINHA DE TRANSMISSÃO”;
- Clique sobre o botão “Contar raios no arquivo GAPI”;
- Observe os resultados surgirem na tela.

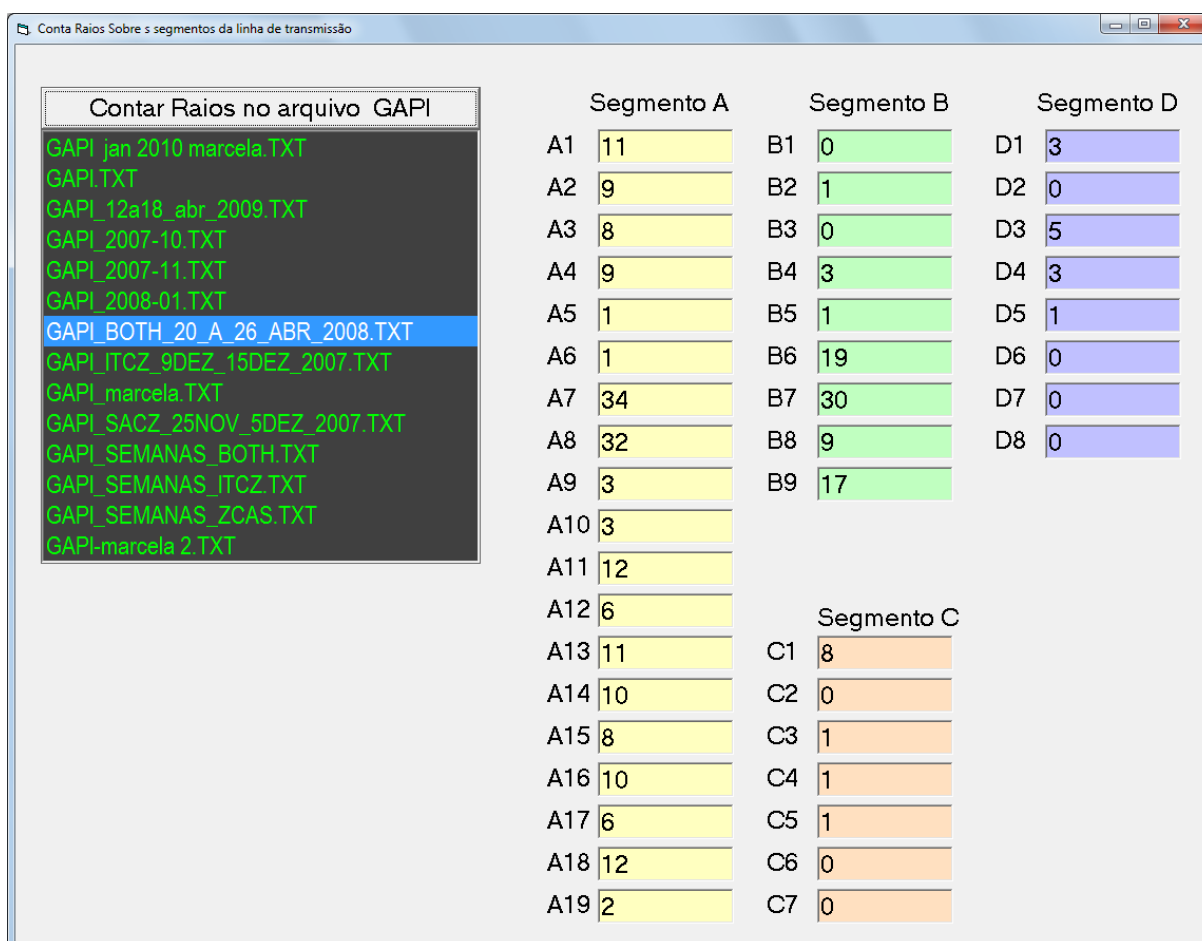


Figura: Resultado da contagem de raios sobre a linha de transmissão.