

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LAURE MADELEINE DENTEL**

**Modelagem de sistemas de detecção de descargas  
atmosféricas na Amazônia**

**TD 12/2013**

**UFPA / ITEC / PPGEE**

**Belém-Pará-Brasil**

**2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LAURE MADELEINE DENTEL**

**Modelagem de sistemas de detecção de descargas  
atmosféricas na Amazônia**

**TD 12/2013**

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha.

**UFPA / ITEC / PPGEE**

**Belém-Pará-Brasil**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

---

Dentel, Laure Madeleine, 1976-  
Modelagem de sistemas de detecção de  
descargas atmosféricas na amazônia / Laure  
Madeleine Dentel. - 2013.

Orientadora: Brígida Ramati Pereira da  
Rocha.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2013.

1. Energia elétrica - Transmissão - Amazônia.  
2. Sistemas de energia elétrica - Proteção -  
Amazônia. 3. Redes elétricas - Proteção. 4.  
Detectores. I. Título.

CDD 23. ed. 621.31909811

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS  
ATMOSFERICAS NA AMAZONIA

AUTOR: LAURE MADELEINE DENTEL

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA  
ELÉTRICA.

APROVADA EM 18 / 12 / 2013

BANCA EXAMINADORA:

---

Profª. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha  
(ORIENTADORA – UFPA)

---

Prof. Dr. José Pissolato Filho  
(MEMBRO – UNICAMP)

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez  
(MEMBRO – USP)

---

Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Willamy Moreira Frota  
(MEMBRO – UFAM)

---

Profª. Dra. Valquíria Gusmão Macedo  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Arthur da Costa Almeida  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. João dos Santos Protázio  
(MEMBRO – UFPA)

VISTO:

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

## DEDICATÓRIA

Para Julien e Aïto

## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Professora Brígida Ramati Pereira da Rocha pelo seu incentivo, apoio e dedicação no desenvolvimento desta tese, com constantes sugestões e idéias;

A todos os professores que contribuíram na elaboração deste trabalho; especialmente a Professora Valquíria Gusmão Macedo pelo seu apoio e dedicação, os Professores Arthur da Costa Almeida, José Ricardo Santos de Souza e João dos Santos Protázio pelos seus ensinamentos;

A minha família pelo suporte e dedicação em todos os momentos da minha vida.

*« Whatever you do will be insignificant, but it is very important that you do it. »*

**Mahatma Gandhi**

## RESUMO

As descargas atmosféricas representam um dos maiores fatores de riscos para o setor elétrico, especialmente na Amazônia, uma região do mundo identificada com altas densidades de ocorrências e picos de corrente de raios. Nesse contexto, a rede STARNET (*Sferics Timing And Ranging NETwork*), único sistema de detecção de descargas elétricas atmosféricas, terrestre, gratuito, e contínuo, cobrindo toda a região Amazônica, foi escolhido para a geração de padrões de descargas atmosféricas necessários a otimização dos sistemas de proteção das linhas de transmissão por meio de sistema de monitoramento de descargas atmosféricas. Contudo, o funcionamento intermitente, observado nos diagramas operacionais das várias estações da rede STARNET, afeta o desempenho global do sistema, em especial a eficiência de detecção. Por isso, foi desenvolvido um modelo de uniformização dos dados de descargas atmosféricas em função da configuração da rede (número e localização dos sensores em operação), no objetivo final de editar mapas de índice ceráunico e densidades de raios confiáveis. Existem regiões da Amazônia que sempre apresentam anomalias positivas de densidade de raios como as regiões de Belém e Manaus, bem como o estado do Tocantins que afetam as linhas de transmissão. Depois, a incidência de raios nas linhas de transmissão na Amazônia foi estimada a partir da distribuição de pico de correntes registrada pela RDR-SIPAM e da densidade de raios corrigida da rede STARNET. A avaliação do desempenho da rede STARNET tendo como referência à rede de detecção de raios do Sistema de Proteção da Amazônia (RDR-SIPAM) mostrou também uma forte dependência da eficiência de detecção da rede STARNET em função do pico de corrente das descargas atmosféricas.

Palavras-chave: planejamento energético, modelagem, descargas atmosféricas, rede de detecção, correção de dados.

## ABSTRACT

Lightning is one of the greater risk factors for the Electricity Sector, especially in the Amazon, a region of the world identified with high lightning densities and peak currents. In this context, the Sferics Timing And Ranging NETWORK (STARNET), which is presently the only free and continuous lightning detection system covering the whole Amazon Region was chosen to generate lightning parameter products required for the optimization of protection for transmission lines systems through continuous lightning monitoring. However, the intermittent activity observed in the Operating Diagrams of the various STARNET stations, impacted the system performances in special its detection efficiency. As a consequence, a model of standardization of lightning data was developed as a function of the network configuration (number and location of sensors in operation), with the final objective of editing reliable keraunic parameter as well as lightning densities maps. We found that there are Amazon regions which always have positive lightning density anomalies like the regions of Belém and Manaus, and the state of Tocantins. Next, the lightning incidence on transmission lines in amazon region was estimate from the peak current distribution of the Lightning Detection Network of the Amazon Protection System (SIPAM-LDN) and the standardized stroke density from the STARNET network. A comparative performance evaluation of STARNET with reference to the SIPAM-LDN also showed a strong dependence of the lightning detection efficiency of STARNET network on the peak current of lightning events.

Keywords: energy planning, modeling, lightning, detection network, data correction.

# SUMÁRIO

<b>Lista das Figuras.....</b>	<b>14</b>
<b>Lista das Tabelas .....</b>	<b>19</b>
<b>Lista de Abreviaturas.....</b>	<b>20</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>23</b>
<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 Descrição Geral do Problema .....	25
1.2 Motivação e Objetivos .....	27
1.3 Revisão Bibliográfica .....	31
1.3.1 Sistemas de detecção e exploração de dados de descargas atmosféricas na Amazônia .....	31
1.3.2 Exploração dos dados da rede VLF STARNET .....	36
1.4 Contribuição.....	37
1.5 Organização da Tese .....	39
<b>Capítulo 2 - CONCEITOS BÁSICOS .....</b>	<b>41</b>
2.1 O fenômeno da descarga atmosférica .....	41
2.1.1 Processos elétricos ativos .....	42
2.1.2 Radiação eletromagnética das descargas atmosféricas.....	45
2.1.3 Propagação das ondas na atmosfera .....	49
2.2 Sistemas de detecção .....	52
2.2.1 Medidores de ondas eletromagnéticas.....	53
2.2.2 Localização de uma descarga atmosférica.....	55
2.2.3 Discriminação do tipo de raios .....	58
2.2.4 Multiplicidade.....	59
2.2.5 Determinação da polaridade .....	59
2.2.6 Estimação do pico de corrente.....	59
2.3 Avaliação do desempenho de um sistema de detecção.....	60
2.3.1 Parâmetros de avaliação do desempenho .....	60
2.3.2 Métodos de avaliação do desempenho .....	62
2.4 Redes terrestres em operação no mundo.....	65
2.4.1 Redes terrestres de tipo LF/VLF .....	66
2.4.2 Redes terrestres de tipo VLF .....	68
2.4.3 Redes terrestres de tipo VHF.....	69
2.5 Sensores ópticos em satélites de observação .....	70
<b>Capítulo 3 - BASE DE DADOS.....</b>	<b>72</b>
3.1 Descrição das redes de detecção .....	72
3.1.1 RDR-SIPAM .....	72

3.1.2	STARNET .....	75
3.2	Diagramas de Operação da STARNET .....	79
3.2.1	Construção dos Diagramas Operacionais .....	79
3.2.2	Análise estatística .....	83
3.3	Simulação da cobertura da rede STARNET .....	84
3.3.1	Descrição do modelo .....	85
3.3.2	Resultados da simulação.....	86
3.4	Avaliação do desempenho da rede STARNET em relação à rede RDR-SIPAM 89	
3.4.1	Contribuição .....	89
3.4.2	Método e critérios usados .....	90
3.4.3	Resultados.....	94
3.5	Conclusão.....	102
<b>Capítulo 4 - EXPLORAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ESTÁVEIS .....</b>		<b>105</b>
4.1	Definições das variáveis .....	106
4.1.1	Configuração da rede.....	106
4.1.2	Eficiência de Detecção de um sensor .....	107
4.1.3	Eficiência de Localização de uma configuração .....	108
4.1.4	Taxa de Participação de um sensor.....	108
4.1.5	Taxa de Localização de uma combinação de sensores.....	111
4.1.6	Resumo da relação entre variáveis .....	112
4.2	Identificação das configurações estáveis .....	113
4.3	Densidade de raios das configurações estáveis.....	115
4.4	Taxa de Participação dos sensores.....	117
4.4.1	Configurações com 7 sensores ativos.....	118
4.4.2	Comparação estatística de todas as configurações estáveis .....	124
4.5	Número de sensores que participam da localização de descargas atmosféricas 128	
4.6	Taxas de Localização das combinações de sensores .....	130
4.7	Conclusão.....	136
<b>Capítulo 5 - MODELO DE UNIFORMIZAÇÃO.....</b>		<b>138</b>
5.1	Construção do modelo de uniformização .....	139
5.1.1	Fator de Localização entre duas configurações.....	139
5.1.2	Fator de Uniformização .....	140
5.1.3	Caso das configurações inclusivas .....	141
5.1.4	Caso das configurações com Configuração Ponte.....	142
5.1.5	Caso das Configurações isoladas.....	144
5.1.6	Esquema do modelo de uniformização.....	145
5.2	Resultados do modelo de uniformização .....	145
5.2.1	Fator de Localização entre configurações inclusivas .....	146
5.2.2	Configurações Ponte e Taxa de Uniformização .....	152
5.2.3	Mapas de Fator de Uniformização.....	154

5.2.4	Caso das configurações isoladas.....	160
5.2.5	Conclusão .....	160
<b>Capítulo 6 – VALIDAÇÃO DO MODELO DE UNIFORMIZAÇÃO .....</b>		<b>162</b>
6.1	Metodologia.....	162
6.1.1	Cadeias de configurações incluídas.....	162
6.1.2	Taxas de Participação de configurações inclusivas.....	163
6.2	Resultados de Validação do Modelo .....	165
6.2.2	Conclusão .....	172
<b>Capítulo 7 –PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS.....</b>		<b>173</b>
7.1	Aplicação do modelo de uniformização a uma distribuição diária de raios ..	174
7.2	Mapas anuais cerâmico e de densidade uniformizada .....	175
7.2.1	Método.....	175
7.2.2	Resultados.....	176
7.3	Padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão na Amazônia.....	185
7.4	Proteção dos sistemas elétricos.....	187
7.4.1	Método.....	187
7.4.2	Resultados de estimacão da incidência de raios .....	192
7.4.3	Conclusão .....	194
<b>Capítulo 8 – CONCLUSÃO.....</b>		<b>195</b>
8.1	Base de dados.....	195
8.2	Exploração das configurações estáveis.....	197
8.3	Modelo de uniformização .....	197
8.4	Validação do modelo de uniformização .....	199
8.5	Proteção dos sistemas elétricos.....	199
8.6	Futuros trabalhos.....	200
<b>Bibliografia.....</b>		<b>201</b>
<b>Anexo A - REDE RDR-SIPAM.....</b>		<b>207</b>
<b>Anexo B: REDE STARNET .....</b>		<b>209</b>

## Lista das Figuras

Figura 1 - Rede Básica de Transmissão do Sistema Interligado Nacional, horizonte 2013. ....	29
Figura 2 - Altura das Torres da Linha de Transmissão 500 kV entre Tucuruí e Manaus. ....	30
Figura 3 - Mapa de densidade de ocorrência de raios detectados pela RDR-SIPAM, eventos/km <sup>2</sup> /ano. ....	33
Figura 4 - Eficiência de Detecção Relativa da Rede BrasilDAT. ....	34
Figura 5 - Mapa de densidade de ocorrência de raios detectados pela RDR-SIPAM, eventos/km <sup>2</sup> /ano. ....	35
Figura 6 - Média anual de densidade de raios de OTD e LIS, eventos/km <sup>2</sup> /ano. ....	36
Figura 7 - Classificação das descargas atmosféricas NS. ....	43
Figura 8 - Processos de Transferência de Carga de um raio NS negativo, comparados à corrente elétrica medida no solo. ....	44
Figura 9 - Esquema de propagação de uma onda eletromagnética. ....	46
Figura 10 - Espectro das frequências medidas das descargas atmosféricas. ....	46
Figura 11 - Esquema das radiações eletromagnéticas associadas às descargas atmosféricas: a descarga de retorno de um raio NS emite forte radiação LF/VLF; os processos Líder e Descarga Conectante dentro da nuvem geram radiação VHF; todas as descargas emitem radiação óptica (espectro visível). ....	47
Figura 12 - Radiação típica de uma descarga nuvem-solo e de nuvem. ....	48
Figura 13 - Três pulsos de campo elétrico emitidos por um raio NS a uma distância de cerca de 60 km: (a) traço da quebra preliminar dentro da nuvem; (b) traço da primeira Descarga de Retorno; (c) traço de uma Descarga de Retorno subsequente. ....	48
Figura 14 - Esquema de propagação das ondas eletromagnéticas no meio atmosférico: onda de solo e onda refletida. ....	50
Figura 15 - Campo elétrico vertical de formas de onda para 3 Descargas de Retorno de raios NS negativos detectados por sensores localizados em 264, 860 e 3.400 km da descarga; a escala de amplitude é calibrada. ....	51
Figura 16 - Intensidade relativa do sinal em função da distância entre a Descarga de Retorno e o sensor: (a) de dia; e (b) de noite. ....	52
Figura 17 - Esquema de detecção de uma descarga atmosférica. ....	55

Figura 18 - Métodos de localização: (a) TOA (Time of Arrival); (b) MDF (Magnetic Direction Finding). .....	58
Figura 19 - Esquema de funcionamento das redes terrestre de detecção eletromagnética LF/VLF, VLF e VHF. ....	66
Figura 20 - Sensor LIS .....	70
Figura 21 - Localização geográfica dos sensores LPATS-IV da Rede de Detecção RDR-SIPAM. ....	74
Figura 22 - Fotos de uma estação da RDR-SDIPAM: (a) Antena recepção; (b) Antena da VSAT; (c) Sala de operação. ....	75
Figura 23 - Localização dos receptores VLF da rede STARNET operando final de 2013. ....	78
Figura 24 - Estação da STARNET instalada no SIPAM de Belém em Agosto 2012: (a) e (b) antena rádio; (c) sala de operação com o conversor A/C e o computador ligado a Internet. ....	78
Figura 25 - Diagrama de operação de STARNET 2008. ....	81
Figura 26 - Diagrama de operação de STARNET 2009. ....	82
Figura 27 - Diagrama de operação de STARNET 2010. ....	82
Figura 28 - Diagrama de operação de STARNET 2011. ....	83
Figura 29 - Perfil de ganho teórico da antena em função da distância. ....	86
Figura 30 - Cobertura da rede STARNET: (a) dia 7 de julho de 2008; (b) 1 de agosto de 2009; (c) dia 1 de novembro de 2009; (d) dia 12 de novembro de 2010. ....	88
Figura 31 - Cobertura da rede STARNET: (a) máxima em 2010; (b) máximo em 2012. ....	89
Figura 32 - Diagrama de Operação da rede STARNET de 01/03/2008 até 31/06/2009. ....	93
Figura 33 - Escala espacial da comparação: (a) localização dos sensores da rede STARNET com o quadro de zoom; (b) localização dos sensores da RDR-SIPAM. ....	94
Figura 34 - Funções de distribuição (a) e acumulação (b) de pico de corrente do conjunto de dados da RDR-SIPAM. ....	96
Figura 35 - Comparação espaço-temporal sobre o período 14-31/08/2008: (a) STARNET; (b) NS RDR-SIPAM; (c) corrente de pico dos NS da RDR-SIPAM. ....	97
Figura 36 - Função de distribuição (a) e acumulação (b) da Diferença Temporal e erro espacial dos raios coincidentes. ....	98
Figura 37 - Função de distribuição (acima) e acumulação (abaixo) de corrente de pico dos raios coincidentes. ....	100

Figura 38 - Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente para três círculos de raio diferente do conjunto de dados da RDR-SIPAM (130 km, 200 km e 250 km).....	102
Figura 39 - configuração da rede.....	106
Figura 40 - Esquema da relação entre variáveis do modelo de uniformização. ....	112
Figura 41 - Comparação estatística entre os Mapas de Densidades de Raios das configurações estáveis. ....	117
Figura 42 - Mapas de Taxa de participação da configuração '7.3'. ....	120
Figura 43 - Mapas de Taxa de participação da configuração '7.6'. ....	121
Figura 44 - Mapas de participação da configuração '7.9'. ....	122
Figura 45 - Comparação estatística entre a Taxa de Participação das configurações estáveis. ....	126
Figura 46 - Comparação estatística entre a Taxa de Participação das configurações estáveis. ....	127
Figura 47 - Comparação estatística entre Mapas de Número Médio de Sensores que participam das configurações estáveis.....	130
Figura 48 - Taxa de Localização da configuração '7.3'. ....	134
Figura 49 - Taxa de Localização da configuração '6.2'. ....	135
Figura 50 - Taxa de Localização da configuração '5.2'. ....	136
Figura 51 - Esquema do Fator de Localização entre duas configurações da rede. ....	140
Figura 52 - Esquema de configuração inclusiva com combinações de sensores comuns. ....	142
Figura 53 - Esquema de configuração ponte. ....	144
Figura 54 - Esquema de configurações isoladas.....	144
Figura 55 - Esquema do modelo de uniformização.....	145
Figura 56 - Exemplos de Mapas de Fator de Localização.....	148
Figura 57 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.3'. ....	150
Figura 58 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.6'. ....	150
Figura 59 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.9'. ....	151

Figura 60 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '6.1'.	151
Figura 61 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '6.21'.	152
Figura 62 - Mapa de Fator de Localização entre Configurações de Referência Secundaria e Configuração de Referência da Rede.	154
Figura 63 - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização entre Configurações de Referência Secundaria e Configuração de Referência da Rede.	154
Figura 64 - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 7 sensores ativos.	156
Figura 65 - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 6 sensores ativos.	157
Figura 66 - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 5 sensores ativos.	158
Figura 67 - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 4 sensores ativos.	159
Figura 68 - Exemplo de cadeia de validação do modelo '7.9'/'6.24'/'5.42'.	167
Figura 69 - Exemplo de cadeia de validação do modelo '7.3'/'6.2'/'5.2'.	168
Figura 70 - Comparação estatística das distancias entre $F_{K3/K1}$ e $F_{K3/K2} * F_{K2/K1}$ .	168
Figura 71 - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por Configurações Incluídas.	169
Figura 72 - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por Configurações de Referências.	170
Figura 73 - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por sensores.	170
Figura 74 - Comparação de Mapas de Taxas de Participação dos resultados do modelo e da estatística.	171
Figura 75 - Distribuição de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização junto com o Diagrama Operacional da rede STARNET: (a) 11 de julho de 2011; (b) 13 de julho de 2011.	175
Figura 76 - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2008.	178
Figura 77 - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2009.	178
Figura 78 - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2010.	179
Figura 79 - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2011.	179

Figura 80 - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2008...	181
Figura 81- Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2009 .....	182
Figura 82 - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2010...	183
Figura 83 - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2011...	184
Figura 84- Mapas de índice ceráunico e mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização na Amazônia no trajeto das linhas de transmissões instaladas (sólida), linhas futuras (pontilhada).....	186
Figura 85 - Problema de saturação. ....	187
Figura 86 - Superfícies de atração no modelo eletrogeométrico. ....	188
Figura 87 - Comparação das expressões para calcular a distância de atração.....	189
Figura 88 - Comparação das funções de acumulação de pico de corrente da RDR-SIPAM e IEEE. ....	190
Figura 89 - Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente e em relação à RDR-SIPAM. ....	191
Figura 90 - Estimação da incidência de raios numa secção de 100 km de linha de transmissão em função da expressão de calculo da distância de atração e da densidade de raios uniformizada registrada pela rede STARNET.....	193
Figura 91 Estimação da incidência de raios numa torre em função da expressão de calculo da distância de atração e da densidade de raios uniformizada registrada pela rede STARNET. ....	193

## Lista das Tabelas

Tabela 1 - Radiações associadas às descargas atmosféricas.....	47
Tabela 2 - Avaliação de sistemas de detecção com referência absoluta. ....	63
Tabela 3 - Resultados de avaliação de sistemas de detecção com referência relativa....	65
Tabela 4 - Características das redes terrestres de detecção. ....	66
Tabela 5 - Abreviaturas usadas para cada estação.....	80
Tabela 6 - Percentagem do tempo de funcionamento da rede para cada número de estações ativas.....	83
Tabela 7 - Percentagem de raios detectados para cada número de estações ativas e cada número de estações participando no cálculo de localização (2008-2009).....	84
Tabela 8 - Percentagem de raios detectados para cada número de estações ativas e cada número de estações participando no cálculo de localização (2010-2011).....	84
Tabela 9 - Comparação das características das redes RDR-SIPAM e STARNET. ....	91
Tabela 10 - Comparação do conjunto de dados da STARNET e da RDR-SIPAM para diversas áreas.....	102
Tabela 11 - Configurações estáveis com 7 estações ativas. ....	113
Tabela 12 - Configurações estáveis com 6 estações ativas. ....	114
Tabela 13 - Configurações estáveis com 5 estações ativas. ....	115
Tabela 14 - Padrões de Participação das configurações com 7 estações ativas. ....	124
Tabela 15 - Configurações de substituição para configurações isoladas.....	160
Tabela 16 - Cadeias de configurações estáveis incluídas.....	165
Tabela 17 - Número de dias sem detecção da rede STARNET por ano de operação. .	176
Tabela 18 - Coordenadas dos sensores da rede RDR-SIPAM.....	207
Tabela 19 - Campos dos arquivos da rede RDR-SIPAM.....	208
Tabela 20 - Coordenadas dos sensores da rede STARNET. ....	209
Tabela 21 - Campos dos arquivos da rede STARNET.....	210

## **Lista de Abreviaturas**

**AA** - Atenuação de Amplitude

**ALDIS** - *Austrian Lightning Detection Network*

**AM** - *Amplitude Modulation*

**APCB** - Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade

**ATD** - *Arrival-Time-Difference*

**BLDN** - Rede de Detecção de Raios do Brasil

**Ba** - Sensor de Brasília

**BrasilDAT** - Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas atmosféricas

**CDD** - *Charge-Coupled Device*

**CLDN** - *Canadian Lightning Detection Network*

**CPTEC** - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

**Cg** - Sensor de Campo Grande

**Cp** - Sensor de Cachoeira Paulista

**Cu** - Sensor de Curitiba

**DE** - *Detection Efficiency* (Eficiência de Detecção)

**DIFT** - *VHF Broadband Digital Interferometer*

**EIWG** - *Earth-Ionosphere Wave Guide*

**ELAT** - Grupo de Eletricidade Atmosférica, do INPE

**ELF** - *Extremely Low Frequency* (Extremamente Baixa Frequência)

**FIR** - Filtro-Impulsivo-Finito

**Ft** - Sensor de Fortaleza

**GLM** - *Geostationary Lightning Mapper*

**GOES** - *Geostationary Operational Environmental Satellites*

**GPS** - *Global Positioning System*

**GI** - Sensor de Guadalupe

**IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IEEE** - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**IN** - Intra-Nuven

**INCRA** - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

**INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**IMPACT** - *Improved Accuracy from Combined Technology*

**IR** - Infravermelhas

**JLDN** - *Japan Lightning Detection Network*

**LA** - *Location Accuracy* (Erro de Localização)

**LF** - *Low Frequency* (Baixa Frequência)

**LIS** - *Lightning Imaging Sensor*

**LLP** - *Lightning Location and Protection Inc.*

**LMA** - *Lightning Mapping Array*

**LPATS** - *Lightning Position And Tracking Sensor*

**LT** - Linha de transmissão

**MDF** - *Magnetic Direction Finding*

**MME** - Ministério de Minas e Energia

**Ma** - Sensor de Manaus

**NA** - Nuvem-Ar

**NALDN** - *North American Lightning Detection Network*

**NE** - Nuvem-Estratosfera

**NLDN** - *National Lightning Detection Network*

**NN** - Nuvem-Nuvem

**NMT** - *New Mexico Institute of Mining and Technology*

**NS** - Nuvem-Solo

**NZLDN** - *New Zealand Lightning Detection Network*

**OTD** - *Optical Transient Detector*

**PLL** - *Phase Locked Loop*

**RDR-SIPAM** - Rede de Detecção de Raios do SIPAM

**RINDAT** - Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas

**RNSS** - *Range-Normalized Signal Strength*

**SAFIR** - *Surveillance et Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique*

**SD** - *Sensor Detection*

**SIDDEM** - Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos

**SIN** - Sistema Interligado Nacional

**SIPAM** - Sistema de Proteção da Amazônia

**STARNET** - *Sferics Timing And Ranging NETWORK*

**SWD** - *Without Sensor Detection*

**Sp** - Sensor de São Paulo

**St** - Sensor de São Paulo Teste

**TOA** - *Time-of-Arrival*

**TOGA** - *Lightning Location by Time of Group Arrival*

**TRMM** - *Tropical Rainfall Measuring Mission*

**UECE** - Universidade Estadual do Ceará

**UFPA** - Universidade Federal do Pará

**UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina

**UHF** - *Ultra High Frequency*

**UHE** - Usina Hidrelétrica

**USP** - Universidade de São Paulo

**UTC** - Tempo Universal Coordenado

**VHF** - *Very High Frequency* (Muita Alta Frequência)

**VLf** - *Very Low Frequency* (Muita Baixa Frequência)

**UHE** - Usina Hidrelétrica

**ULF** - *Utra Low Frequency*

**WWLLN** - *World Wide Lightning Location Network*

**ZCAS** - Zona de Convergência do Atlântico Sul

**ZCIT** - Zona de Convergência Intertropical

**3D** - 3 Dimensões

## Lista de Símbolos

$C_K$	Conjunto de combinações de sensores ativos da configuração K	
$C_{C_{K/ref}}$	Conjunto de Combinações Commons entre as configurações K e Kref	
$D$	Distância	[m]
$D_{kn}$	Conjunto de descargas detectadas por um sensor $k_n$	
$DE_{kn}$	Eficiência de Detecção do sensor $k_n$	
$E$	Intensidade do campo elétrico	[dB]
$E_p$	Intensidade do pico elétrico medido	[dB]
$F_{K/Kref}$	Fator de Localização de uma configuração da rede K em relação a uma melhor configuração da rede com mais sensores ativos Kref	
$H$	Altura	[m]
$I_p$	Intensidade do pico de corrente	[A]
$I_r$	Incidência de raios	[raios/ano]
$K_0$	Conjunto dos sensores disponíveis da rede	
$K$	Configuração de sensores ativos ou conjunto de sensores ativos	
$L_{C_m_K}$	Taxa de Localização de uma combinação de sensores $c_m$ numa configuração da rede K	
$LE_K$	Eficiência de Localização da configuração K	
$M$	Intensidade do campo magnético	[dB]
$Ng$	Densidade de raios	[raios/km <sup>2</sup> /ano]
$P_{k_n_K}$	Taxa de Participação de um sensor $k_n$ numa configuração da rede K	
$R$	Conjunto de de descargas atmosféricas reais	
$S$	Conjunto de configurações da rede de sensores	
$X_K$	Conjunto de descargas atmosféricas localizadas pela rede na configuração K	
$X_{K_{C_m}}$	Conjunto de descargas atmosféricas localizadas pela rede na configuração K com a combinação de sensores $c_m$	
$X_{K_{k_n}}$	Conjunto de descargas localizadas pela rede na configuração K onde o sensor $k_n$ participou	
$a_k$	Matriz dos Flags de ativação do sensor $k_n$ da rede na configuração K	
$c$	Velocidade de propagação da onda eletromagnética ou velocidade da luz	[m/s]
$ce$	Índice ceráunico	
$c_{m_K}$	Conjunto de sensores formando uma combinação da configuração K	

$\mathbf{d}_{rk}$	Matriz dos Flags de detecção da descarga $r_i$ por cada sensor $k_n$	
$f$	Frequência	[Hz]
$f_c$	Frequência de corte ionosférico	[Hz]
$k_n$	Sensores da rede	
$n_k$	Número de sensores disponíveis da rede	
$na_K$	Número de sensores ativos na configuração K	
$nc_K$	Número de combinações possíveis de sensores ativos da configuração K	
$ncc_{K/ref}$	Número de de Combinações Communs entre as configurações K e Kref	
$nd_{kn}$	Número de descargas detectadas por um sensor $k_n$	
$nr$	Número de descargas atmosféricas reais	
$ns$	Número de configurações na rede de sensores	
$nx_K$	Número de descargas atmosféricas localizadas pela rede na configuração K	
$nx_{K\_Cm}$	Número de descargas atmosféricas localizadas pela rede na configuração K com a combinação de sensores $c_m$	
$nx_{K\_kn}$	Número de de descargas localizadas pela rede na configuração K onde o sensor $k_n$ participou	
$P_{xk}$	Matriz dos Flag de participação do sensor $k_n$ na localização da descarga $x_j$	
$r_i$	Evento de descargas atmosféricas real	
$rs$	Raio de atração	[m]
$t$	Tempo	[s]
$v$	Velocidade	[m/s]
$x_j$	Evento de descargas atmosféricas localizado pela rede	
$\alpha_{K/Kref}$	Fator de Uniformização entre as configurações K e Kref	
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\varepsilon$	Poder emissivo do corpo	
$\varepsilon_0$	Constante elétrica	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]

# Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 Descrição Geral do Problema

Esta tese de doutorado se inscreve no contexto do planejamento da proteção dos sistemas elétricos na Amazônia, calculando padrões de descargas atmosféricas globais com dados da rede de detecção STARNET (*Sferics Timing And Ranging NETwork*). A rede STARNET, único sistema de detecção gratuito e uniforme, ora em operação na região, não tem um nível de detecção constante devido à instalação de novas estações e funcionamento intermitente das estações. Por isso foi desenvolvido um modelo de correção de nível de desempenho de uma rede de detecção em função da localização das estações ativas para uniformizar os cálculos de densidade de descargas atmosféricas.

O setor elétrico brasileiro está conectando a região amazônica ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com a expansão das linhas de transmissão ao longo de milhares de quilômetros cobertos por florestas densas e atravessados por grandes rios. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área da Amazônia Legal no Brasil é de 5.032.925 km<sup>2</sup>, compreendida pelos estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Roraima, Acre e Amapá e parte dos estados do Tocantins, Mato Grosso e Maranhão. Devido às restrições ambientais, as linhas precisam passar acima da floresta sem danificar as árvores. Para enfrentar este desafio técnico, as torres de linhas de transmissão alcançam alturas entre 79 m e 295 m. Estas linhas de transmissão têm um papel estratégico para a distribuição de energia em todo o país, bem como a sua proteção para garantir o seu funcionamento contínuo. Para otimizar os sistemas de proteção se calcula a incidência de descargas atmosféricas nas estruturas a partir dos padrões de descargas atmosféricas.

O sistema de detecção de descargas atmosféricas estudado nesta tese é a rede de tipo VLF (*Very Low Frequency*) STARNET. Esse sistema de detecção é constituído por uma rede de antenas que identifica a assinatura eletromagnética associada aos campos emitida pela corrente da descarga atmosférica e permite a geolocalização desta. A rede STARNET, operada pela Universidade de São Paulo (USP), cobre toda América do Sul desde 2006. Atualmente se constitui no único sistema de detecção de raios gratuito e contínuo cobrindo a Região Amazônica; o centro e sul do Brasil, além da rede

STARNET, são cobertos pela rede de detecção conhecido como Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas, BrasilDAT. A rede STARNET está ainda em fase de desenvolvimento com o crescimento constante de estações instaladas: o número de estações participantes da rede cresceu de 4 no início de 2008 até 7 no final de 2009, alcançando um total de 8 estações disponíveis no final do ano 2011 e de 11 estações disponíveis no final do ano 2013. Esse aumento de número de estações tem um impacto direto tanto no desempenho da rede como no nível de detecção de descargas atmosféricas.

Além disso, a rede STARNET faz parte da família das redes ambientais sem fio (Environmental Wireless Network) que funcionam em 3 etapas: detecção, comunicação e processamento. Cada uma destas etapas apresenta falhas de funcionamento ou de processamento que aumenta a vulnerabilidade da rede e afeta a qualidade dos dados. Assim, a falha de uma ou várias estações tem também um impacto direto tanto no desempenho como no nível de detecção de descargas atmosféricas. No caso da rede VLF World Wide Lightning Location Network (WWLLN), Abarca et al. (2010), observou que o número de sensores em funcionamento durante um período varia, porque alguns têm serviço intermitente. Ademais, no caso da rede VLF ZEUS, similar a rede STARNET, Chronis e Anagnostou (2006) observou que o número de receptores em operação tem um papel importante no desempenho da rede. O estudo estabeleceu que a eficiência de detecção e a acurácia da localização dependem da quantidade e do espaçamento dos sensores da rede, em termos de magnitude (distância km) e em termos de direção (ângulo graus).

Nesta tese foram primeiro analisados, em detalhe, o comportamento temporal e espacial da rede STARNET modelizando os diagramas operacionais para cada ano de funcionamento da rede, assim como a cobertura teórica da rede em função da localização das estações ativas. Depois, o desempenho da rede STARNET foi avaliado em comparação com a rede de detecção de raios do Sistema de Proteção da Amazônia (RDR-SIPAM) de tipo LF/VLF operando na parte oriental da Amazônia entre 2004 e 2009.

Em seguida, o nível de detecção das varias configurações (número e localização dos sensores em operação) estáveis da rede foi avaliada através do cálculo estatístico da

Taxa de Participação dos sensores ativos e da Taxa de Localização das combinações de sensores. Além disso, um modelo de uniformização das densidades de raios em função da configuração da rede, baseado nos resultados estatísticos das configurações da rede estáveis identificadas na base de dados, foi desenvolvido para compensar a intermitência de funcionamento da rede. Assim um Fator de Correção foi calculado para cada configuração da rede através do Fator de Localização entre uma configuração e a configuração de referencia estável. Em seguida, o modelo foi validado calculando de duas maneiras estatísticas os Fatores de Localização entre duas configurações estáveis e as Taxas de Participação dos sensores de uma configuração estável.

Por fim, o modelo foi aplicado na geração de mapas de densidades de raios uniformizadas e mapas de índice ceráunico no trajeto de linhas de transmissão de alta tensão, já instaladas ou planejadas para a Amazônia. A partir dos mapas de densidade de raios uniformizados foi estimada a incidência de raios sobre as estruturas como linhas de transmissão e torres possibilitar a otimização dos sistemas de proteção.

## **1.2 Motivação e Objetivos**

O objetivo principal da tese é a geração de mapas ceráunicos e de densidade de descargas atmosféricas para o calculo de incidência de raios sobre as estruturas, e a otimização dos sistemas de proteção na Amazônia.

As descargas atmosféricas do tipo Nuvem-Solo representam um dos maiores fatores de risco para o setor elétrico na produção, transmissão e distribuição de energia e a região Amazônica foi identificada como uma das zonas do planeta de alta densidade de descargas atmosféricas, e com intensidades de corrente muito elevadas. Os mapas de índice ceráunico e de densidade de descargas atmosféricas permitem avaliar o nível de proteção necessário aos sistemas elétricos instalados ou otimizar um sistema de monitoramento de descargas atmosféricas. No objetivo de identificar os padrões de descargas atmosféricas na Amazônia, foram editados produtos climáticos de descargas atmosféricas confiáveis a partir da base de dados da rede STARNET. Para isso, os dados de descargas atmosféricas foram uniformizados por um modelo estatístico em função da localização das estações ativas da rede.

O setor elétrico é um dos mais atingidos pelos efeitos provocados por raios nuvem-solo; cerca de 70% dos desligamentos das linhas de transmissão e 30% a 60% dos desligamentos das redes de distribuição são causados por descargas atmosféricas (SHIGA et al., 2008). Em 5% até 10% dos casos, as descargas atmosféricas podem também causar danos permanentes aos equipamentos elétricos (IEEE, 2004). Além disso, as descargas atmosféricas são responsáveis por flutuações de tensão no sistema elétrico que podem alterar a longevidade dos equipamentos elétricos. Vários estudos já analisaram o impacto das descargas atmosféricas na Amazônia: por exemplo, as correlações entre raios e desligamentos no sistema telefônico de Belém (ROCHA et al., 1998), ou os efeitos das descargas no sistema de distribuição de energia elétrica em torno de Belém (ROCHA et al., 1996). Depois, Lessa et al. (2008) avaliou os casos individuais de desligamentos no sistema na linha de transmissão da Rede CELPA entre as duas subestações em Belém a partir dos mapas cerâmicos calculados com os dados da rede RDR-SIPAM.

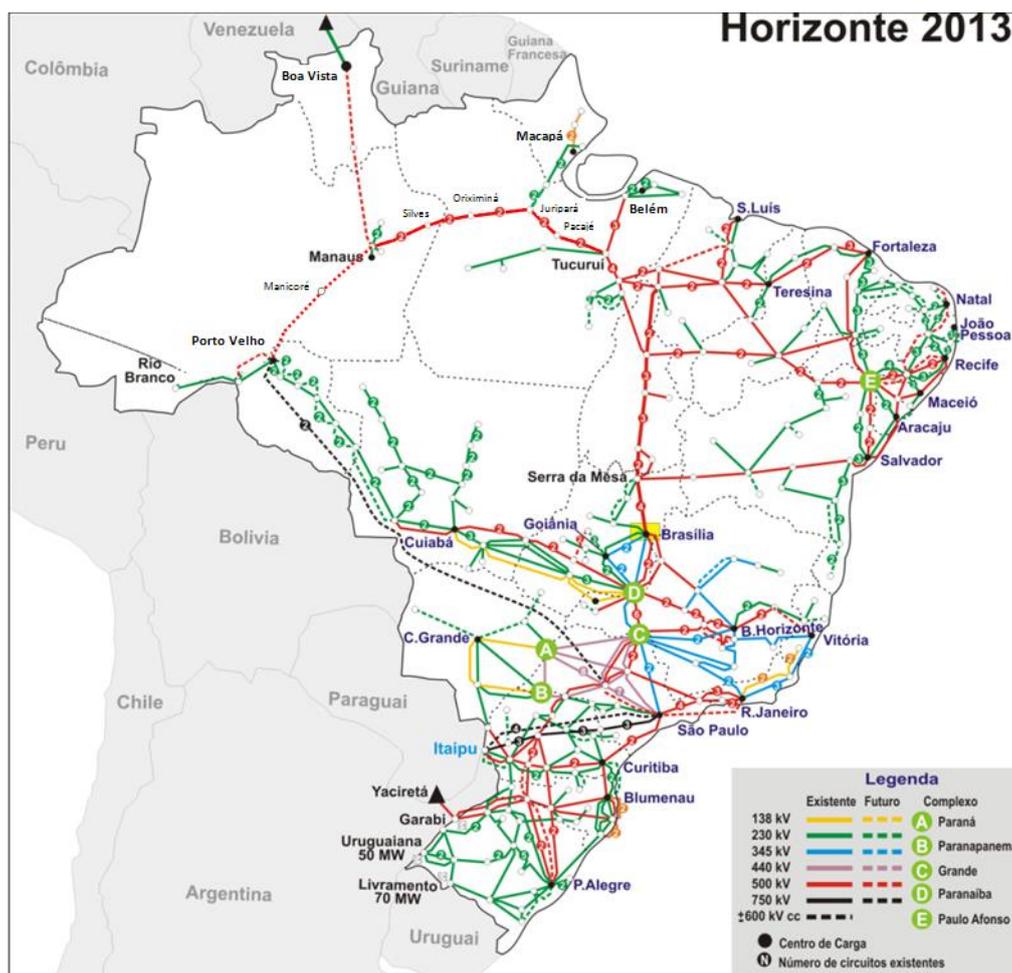
As linhas de transmissão de alta tensão e as subestações são particularmente sensíveis às descargas atmosféricas. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2019 (MME/EPE, 2010), para atender as projeções de crescimento da carga de energia do SIN (Sistema Interligado Nacional), o sistema de geração deverá crescer em cerca de 2.200 MW no Sudeste/Centro-Oeste e Acre/Rondônia, 580 MW no Sul, 590 MW no Nordeste e 600 MW no Norte e Manaus/Amapá. Por isso é previsto principalmente o aproveitamento do potencial hídrico do país, especialmente da região Norte, com uma interligação elétrica entre os subsistemas regionais para trocas de energia. A expansão dos troncos de transmissão e a operação integrada permitirão um melhor aproveitamento das especificidades de cada região com uma maior flexibilidade nos intercâmbios.

A capacidade de geração hidráulica aumentará de 28.383 MW na região Norte, o que representa 88% dos projetos hidrelétricos no Brasil de 2015 a 2019. Os aproveitamentos de Belo Monte (rio Xingu), Santo Antônio e Jirau (rio Madeira), juntos, serão responsáveis por cerca de 10% da capacidade instalada do SIN no final do horizonte decenal. Ao se incluir nesse conjunto os empreendimentos dos rios Teles Pires, Tapajós e Jamanxim, a participação de todas essas usinas representará cerca de

15% do total da capacidade de geração hidráulica, no final do horizonte de planejamento.

Então as interligações entre as diferentes regiões do país deverão ser expandidas, principalmente, para integração dos novos aproveitamentos hidrelétricos localizados na região amazônica (Figura 1).

**Figura 1** - Rede Básica de Transmissão do Sistema Interligado Nacional, horizonte 2013.

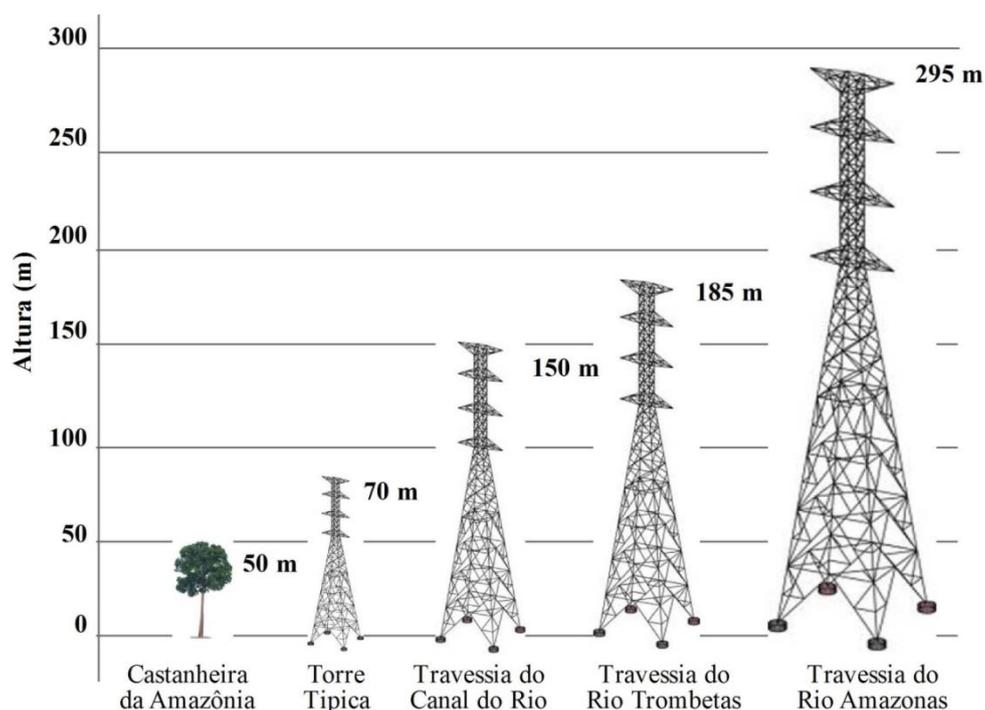


Fonte: MME/EPE (2010)

Os Estados do Pará, Tocantins e Maranhão já estão integrados ao SIN. Os Sistemas Elétricos Isolados dos Estados do Amazonas e Amapá foram interligados a partir de 2013 e o estado de Roraima deverá ser integrado a partir de 2014. A interligação Tucuruí-Manaus-Macapá constitui uma extensão de 1481 km entre Tucuruí e Manaus com uma linha de Alta Tensão de 500 kV e 2870 torres com alturas de até 295 metros (Figura 2). A derivação até a cidade de Macapá é aproximadamente de 339 km com uma tensão de 230 kV e 708 torres. O tronco entre os municípios de Altamira e

Tucuruí constituirá, portanto, uma antecipação da ligação da Usina Hidrelétrica (UHE) de Belo Monte ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Os investimentos necessários para a implantação da Linha de transmissão (LT) Tucuruí-Manaus-Macapá foram da ordem de US\$ 1 bilhão. A LT permitirá um intercâmbio médio de aproximadamente 1.000 MW entre o Sistema Manaus e o SIN, e 200 MW para o sistema Amapá. A instalação de uma linha de transmissão de 500 kV é prevista entre o Complexo Hidroelétrico do Madeira (UHE, Santo Antônio com 3.580 MW e Jirau com 3.900 MW) e o SIN, no Estado de Rondônia. Existem também outros projetos de interconexões elétricas entre a cidade de Boa Vista (RR), que atualmente é atendida através de uma linha de transmissão proveniente do Complexo de Guri, na Venezuela, e o SIN em 500 kV bem como uma LT entre Manaus e Porto Velho também em 500 kV (MME/EPE, 2010).

**Figura 2** - Altura das Torres da Linha de Transmissão 500 kV entre Tucuruí e Manaus.



Fonte: Comunicação pessoal de Willamy Moreira Frota, 2012

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2019 (MME/EPE, 2010), as linhas de transmissão foram planejadas, por meio de sistema de informações geográficas, evitando-se, sempre que possível, áreas urbanas e periurbanas, unidades de conservação, terras indígenas, assentamentos do INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), Áreas Prioritárias para a Conservação da

Biodiversidade (APCBs), áreas com vegetação nativa, áreas de relevo montanhoso e áreas alagáveis. Sem embargo, numa região de alta densidade cerâmica como a Amazônia, se precisa também de uma avaliação dos riscos ligados às descargas atmosféricas no planejamento do trajeto dessas linhas e da consideração dos parâmetros ligados a descargas atmosféricas como a densidade de raios (em raios/km<sup>2</sup>/ano) e a intensidade de corrente média (em kA). Esses parâmetros são necessários para a definição do nível de proteção e conseqüentemente para a operação das linhas e subestações desses sistemas.

Nesse contexto, o Setor Elétrico Brasileiro precisa também de um sistema de monitoramento das descargas atmosféricas que possa atender aos sistemas elétricos e que pode garantir a segurança da manutenção e da operação dos sistemas de geração e transmissão existentes e os que estão sendo construídos e planejados para a região. O sistema de monitoramento deveria responder tanto a possibilidade de gerar alertas às equipes de manutenção em campo quanto à aproximação de tempestades; remanejamento de carga no sistema de transmissão; apoio a manobras de religamentos e linhas de transmissão; e maior precisão na identificação do local de falha permanente ocasionada por tempestades (queda de torres, rompimento de cabos condutores, entre outros). O sistema de monitoramento de descargas atmosféricas deveria cobrir todos os sistemas de transmissão existentes, em construção e os previstos para toda a região.

### **1.3 Revisão Bibliográfica**

Nas últimas décadas, o conhecimento sobre a atividade elétrica na Amazônia, como características das descargas atmosféricas e padrões temporais e espaciais de raios, evoluiu em função do desempenho dos sistemas de detecção atuando na região.

#### **1.3.1 Sistemas de detecção e exploração de dados de descargas atmosféricas na Amazônia**

##### **1.1.1.1 Sistemas de detecção terrestres**

O primeiro sistema de detecção de raios na Amazônia foi um sensor de tipo LLP-TSS 430 da Lightning Location and Protection Inc. (LLP), instalado em 1994 no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém. Esse sensor mediu o campo elétrico e magnético terrestre com uma boa precisão no tempo de ocorrência

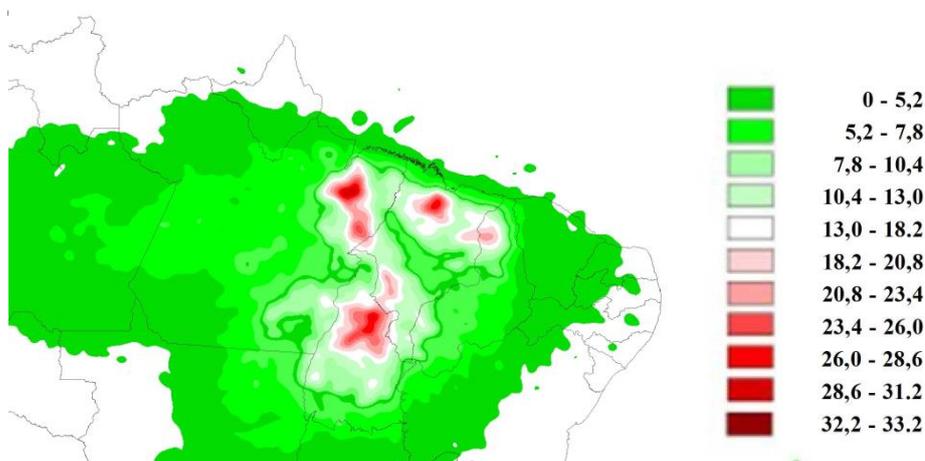
(milissegundos) e direção de evento ( $\pm 2,5^\circ$ ) em ângulo azimutal e calculava as características das descargas atmosféricas por quatro faixas de distâncias do sensor (a última faixa de distância de ocorrência  $>48$  km) e de azimute. A zona de localização foi obtida cruzando o tempo de chegada da onda com a direção do campo magnético. A cobertura do sistema de detecção foi estimada a um círculo de cerca de 160 km de raio em torno da posição geográfica do sensor. Os dados obtidos no período 1995-1998 permitiram a primeira caracterização da atividade elétrica na região: campos elétricos e magnéticos produzidos pelas descargas (ROCHA et al., 1996), distribuições espaciais e temporais de ocorrências, intensidades e polaridades das descargas, (SOUZA et al., 1997) e (SOUZA et al., 1999). A partir destes primeiros estudos, a região de Belém foi identificada como uma zona do planeta de alta densidade de raios, e com intensidades de correntes muito elevadas. Os primeiros mapas de densidades de raios calculadas a partir daquelas observações foram de muita baixa resolução e limitadas para a região de Belém.

Outros estudos regionais foram possíveis após a instalação em 2004 de uma rede de 12 sensores de tipo LPATS IV operando nas faixas LF/VLF, cobrindo o leste da Amazônia e chamada RDR-SIPAM (Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia). Essa rede foi integrada em 2006 no Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) criado pelo ELAT (grupo de Eletricidade Atmosférica) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no final da década de 80, em parceria com diversas instituições no Brasil.

A primeira análise dos dados da RDR-SIPAM apresentou as distribuições mensais e horárias de ocorrência de raios Nuvem-Solo (NS) e Nuvem-Nuvem (NN), nas localidades de Belém, Paragominas, Tucuruí e São Luís, no período de novembro de 2006 a março de 2007 (ROCHA et al., 2007). Este período foi centrado na transição entre a estação seca e chuvosa mostrando o efeito do deslocamento o sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em ocorrências de raios locais. Posteriormente, Pereira et al. (2008) analisou os primeiros 22 meses de operação da rede RDR-SIPAM de outubro de 2006 até julho de 2008. O estudo apresentou a primeira distribuição de pico de correntes registrado pela rede e o primeiro mapa de densidade de raios calculado para a região (Figura 3). A discriminação por polaridade dos eventos mostrou que 75% das descargas detectadas tinham uma polaridade negativa e 25% uma polaridade

positiva. Ademais, a discriminação por pico de corrente dos eventos mostrou que 20% das descargas tinham uma alta intensidade de corrente ( $> 75$  kA), algumas com valor extremamente elevado (0,55% acima de 200 kA). No mapa de densidade, apareceram zonas de intensa atividade elétrica, com valores de densidade até 17 raios/km<sup>2</sup>/ano, dando um índice cerâmico de 127 calculado neste estudo. Os resultados de distribuição mensal de ocorrência de raios mostrou também uma influencia dos fenômenos de El Niño e La Niña na atividade elétrica da região. Contudo, os autores observaram que a densidade de raios foi afetada pela diminuição da eficiência de detecção na periferia da rede de detecção.

**Figura 3** - Mapa de densidade de ocorrência de raios detectados pela RDR-SIPAM, eventos/km<sup>2</sup>/ano.

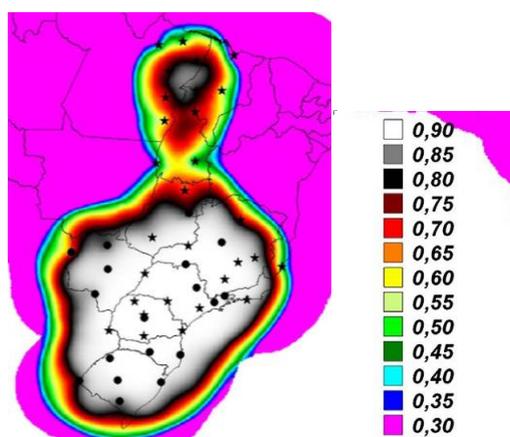


Fonte: Pereira et al. (2008).

A quantidade de descargas com alta intensidade de corrente (acima de 100 kA) registrada pela RDR-SIPAM levou depois a uma estudo especial das super-descargas realizada por Almeida et al. (2008) com dados de outubro 2006 a dezembro 2007. As descargas acima de 100 kA representavam 8,4% da base de dados indicando que as super-descargas, na Amazônia oriental, são muito mais frequentes que nos Estados Unidos (2,3%) ou no Canadá (0,7%). A discriminação por polaridade dos eventos mostrou também uma clara predominância dos eventos negativos sobre os positivos no intervalo de intensidades de correntes entre 100 e 250 kA. Além disso, as intensidades máximas medidas pela rede eram muito elevadas (957 kA para polaridades negativas e 580 kA para polaridades positivas) e acima dos máximos já detectados nos Estados Unidos (598 kA) ou no Canadá (574 kA).

Ao mesmo tempo uma análise da distribuição geográfica do desempenho da RDR-SIPAM utilizando-se os dados de localização (latitude e longitude) dos sensores revelou a deterioração da eficiência de detecção em direção das fronteiras da rede (SOUZA et al., 2008). O estudo identificou as zonas de melhor eficiência com um centro geográfico da melhor eficiência da rede localizado a 4° S de longitude e 48° W de longitude. Além disso, Naccarato e Pinto Jr (2009) estimaram a eficiência de detecção da RDR-SIPAM entre 35-75% dentro das fronteiras da rede Figura 4.

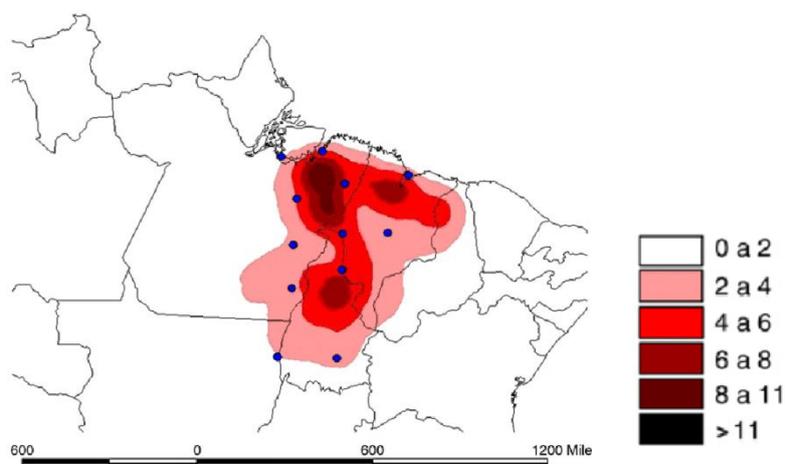
**Figura 4** - Eficiência de Detecção Relativa da Rede BrasilDAT.



Fonte: Naccarato e Pinto Jr (2009)

Nesse contexto, as análises do último estudo usando os dados da RDR-SIPAM e cobrindo todo o período de bom funcionamento da rede (de 2006 até 2008), foram restritas a um retângulo limitado pelas coordenadas geográficas de 41° W a 55° W de longitudes e de 1° S a 15° S de latitude (ALMEIDA et al., 2012). Nesta zona a eficiência de detecção fica entre 50% e 80% de acordo com Naccarato e Pinto Jr (2009). O estudo apresentou os resultados estáticos seguintes: distribuição das descargas atmosféricas por pico de corrente (7% das descargas detectadas estão entre 100 kA e 250 kA); distribuição das super-descargas (acima de 250 kA); distribuição horária discriminada por pico de corrente (pico de atividade elétrica a 15:00 Hora Local cerca de 1 hora antes do máximo de precipitação) e depois por polaridade (a taxa de raios negativos sobre positivos ficou alta entre 11:00 e 19:00 Hora Local); mapa de densidade de raios. O mapa de densidade de raios (Figura 5) apresentou densidades de raios até 11 eventos/km<sup>2</sup>/ano.

**Figura 5** - Mapa de densidade de ocorrência de raios detectados pela RDR-SIPAM, eventos/km<sup>2</sup>/ano.



Fonte: Almeida et al. (2012).

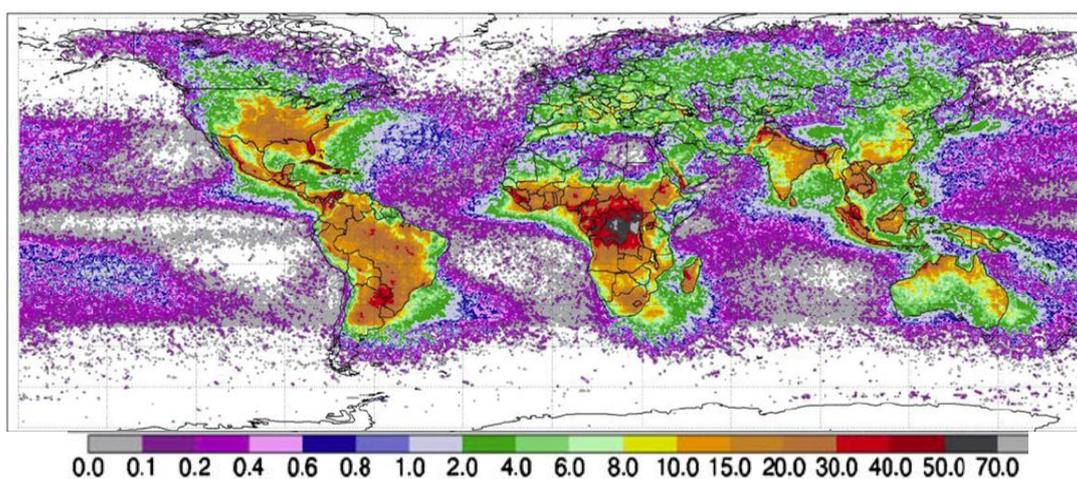
Contudo observam-se nos mapas de densidades de raios (Figura 3 e Figura 5) que as zonas de altas densidades registradas pela RDR-SIPAM correspondem também as zonas de alta eficiência de detecção (Figura 4), indicando a necessidade de correção dos valores de densidades de raios em função da eficiência relativa da rede de detecção.

#### 1.1.1.2 Sistemas em satélites

Os primeiros sistemas globais de detecção de descargas atmosféricas atuando na Amazônia são sensores ópticos chamados OTD (*Optical Transient Detector*) de tipo câmera vídeo e LIS (*Lightning Imaging Sensor*) de tipo CDD (*Charge-Coupled Device*) incorporados respectivamente nos satélites polares MicroLab-1 lançado em 1995 e TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) lançado em 1997. Esses sistemas geram imagens de ocorrências de descargas atmosféricas ao longo da trajetória dos satélites. A análise dos dados do OTD e LIS permitiram a geração dos primeiros mapas de densidade global de descargas atmosféricas e estudar as relações com os fenômenos climáticos de grande escala. Assim, Christian et al. (2003) mostraram que 78% dos raios observados pelo satélite TRMM ocorrem entre as latitudes 30° N e 30° S, onde atua a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) como na Amazônia. Os resultados desse estudo confirmaram que o raio ocorre, principalmente, em áreas de terra, com uma relação média de terra/oceano de 10/1. Os resultados mostraram também que as maiores densidades de raios ocorrem em áreas costeiras e regiões montanhosas como Himalaias, Sierra Madre, Andes, Alpes italianos.

Além disso, Cecil et al. (2012) construíram uma climatologia para as zonas tropicais e subtropicais com a compilação de 15 anos de dados de OTD e LIS (entre 1995 e 2010). Essa climatologia incluiu: a média anual de densidade de raios (Figura 6); os ciclos diários médios (com resolução de 24 horas); os ciclos anuais médios (com resolução diária, mensal ou sazonal); as séries temporais de densidade de raios sobre 16 anos com três meses de suavização (com resolução diária, mensal ou sazonal). Os resultados foram uniformizados por tempo de passagem do satélite (150 horas acumuladas entre 1995 e 2010 na Amazônia) e por hora de passagem de passagem considerando que a eficiência de detecção do sensor seja melhor a noite que de dia (de 88% a 23:00 HL até 69% a 12:00 HL).

**Figura 6** - Média anual de densidade de raios de OTD e LIS, eventos/km<sup>2</sup>/ano.



Fonte: Cecil et al. (2012)

Contudo a confiabilidade desses resultados médios numa zona geográfica é afetada pela curta duração de observação; pela variação diária da hora de passagem do satélite sobre uma mesma zona geográfica; e pela capacidade do sensor de detectar os pulsos ópticos gerados pelas descargas atmosféricas através de uma capa de nuvem espessa e extensa como a ZCIT, atuando especialmente na Amazônia.

### **1.3.2 Exploração dos dados da rede VLF STARNET**

Os dados de descargas atmosféricas fornecidas pela rede VLF STARNET já foram exploradas por vários estudos e aplicações como: estimacão de precipitações utilizando dados da rede experimental STARNET que operou nos EUA entre 1994 e 1998 (MORALES et al., 2003); previsão de nível de ocorrências de raios na região de Belém (SÁ et al., 2011); estudo climático de densidade de raios (LACERDA et al.,

2011); estudo de tempos severos observados no leste da Amazônia (POMPEU et al., 2011).

No futuro, os dados da STARNET poderiam ser aplicados também a monitoramento de tempestades, impacto da mudança climática na produção de descargas atmosféricas, e no planejamento de sistemas elétricos. Contudo a confiabilidade destes estudos depende do desempenho do sistema e da qualidade dos dados.

#### **1.4 Contribuição**

O presente trabalho está focalizado no desenvolvimento de um modelo de uniformização de detecção das densidades de descargas atmosféricas em função da localização das estações ativas para a edição de produtos climáticos de descargas atmosféricas uniformes no espaço e no tempo, cobrindo a região Amazônica, onde foram planejados sistemas elétricos de transmissão.

Até hoje não foi encontrado na literatura sobre as redes ambientais sem fio um modelo resolvendo esse problema de nível de desempenho ligado à distribuição de sensores e intermitência de operação das várias estações que integram uma rede de detecção. O modelo foi construído estatisticamente a partir das configurações estáveis identificadas na base de dados histórica da rede STARNET entre 2008 e 2011 e ainda não explorado neste aspecto.

Nesse sentido, foi estudado primeiro o desempenho da rede através do comportamento temporal e espacial da rede STARNET calculando os diagramas operacionais e a simulação da cobertura teórica da rede em função da localização das estações ativas. Os diagramas operacionais da rede foram construídos a partir dos *flags* de participação dos sensores na solução de localização de cada descarga atmosférica detectada pela rede com quatro anos de dados reprocessadas da rede STARNET, de janeiro de 2008 até dezembro de 2011. Em seguida foi realizada uma análise estatística dos diagramas de operação sobre cada ano. A cobertura da rede STARNET foi simulada, para várias etapas de seu desenvolvimento, a partir de um algoritmo baseado num modelo de distribuição geográfica do desempenho do sistema seguindo a metodologia desenvolvida por Souza et al. (2008) e usada previamente para simular a

cobertura da rede RDR-SIPAM na Amazônia oriental. A simulação apoia-se na localização (latitude e longitude) das estações da rede e num padrão ideal de radiação das antenas. Os resultados dessa simulação permitiram acompanhar a evolução da cobertura da rede em função da instalação de novos sensores.

Depois, o desempenho da rede STARNET na Amazônia oriental, numa configuração com 5 sensores ativos, foi avaliado pela primeira vez em relação com a RDR-SIPAM limitada a sua zona de melhor eficiência, calculando o erro temporal, erro de localização, e a distribuição de pico de corrente dos raios coincidentes entre as duas redes. O resultado final apresenta a eficiência de detecção relativa da rede STARNET em função do pico de corrente das descargas atmosféricas.

Em seguida, o comportamento da rede STARNET, para várias configurações estáveis com 5, 6 ou 7 estações ativas, foi analisado estatisticamente calculando: os mapas de densidade de raios para observar o impacto do número de sensores ativos no desempenho global; os mapas de número médio de sensores que participam na solução de localização para observar o comportamento de um conjunto de sensores; os mapas de taxa de participação de cada sensor na solução de localização para avaliar a eficiência de detecção de um sensor ativo entre outros; e os mapas de taxa de localização de cada combinação de sensores de uma configuração para observar o comportamento de uma combinação de sensores dentro de uma configuração de sensores ativos.

Em seguida o modelo de uniformização dos dados de raios, em função da configuração da rede STARNET (número e localização dos sensores em operação), foi construído em relação aos resultados estatísticos das configurações estáveis da rede, calculando os mapas de Fatores de Uniformização entre a melhor configuração da rede e as outras identificadas na base de dados. O modelo de uniformização foi validado de forma matemática com dois métodos: calculando com modelo e comparando os Fatores de Localização de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas; calculando com o modelo as Taxas de Participação de cada sensor de uma configuração estável e comparando os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente.

Aplicando os mapas de fatores de uniformização aos diagramas operacionais da rede, é gerada uma matriz de uniformização espaço-temporal tridimensional (tempo com uma amostragem a cada 10 minutos, e espaço com uma resolução de 100 km x 100

km) que pode ser aplicado a qualquer distribuição de descargas atmosféricas como, por exemplo, densidade de raios diária na região de Belém. Depois, o modelo de uniformização foi aplicado à geração de mapas de densidades de raios uniformizadas e mapas de índice cerâmico a partir dos dados de descargas atmosféricas da base histórica da rede STARNET entre 2008 e 2011. Os mapas de padrões de descargas atmosféricas foram analisados no trajeto das linhas de transmissão para a determinação das áreas críticas em termo de proteção dos sistemas elétricos na região Amazônica. Por fim, a incidência de raios nas linhas de transmissão e torres em função da altura da estrutura foi estimada para a otimização dos sistemas de proteção usando a distribuição de pico de corrente da RDR-SIPAM e as densidades de raios uniformizadas da rede STARNET.

## **1.5 Organização da Tese**

A tese organiza-se em 6 capítulos:

O capítulo 1 apresenta a descrição geral do problema, a motivação e os objetivos, a revisão bibliográfica e a contribuição da tese.

O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos necessários ao entendimento deste estudo como: o fenômeno de descarga atmosférica com a emissão das ondas eletromagnéticas e seus modos de propagação na atmosfera. Depois, foram detalhados os sistemas de detecção baseados na detecção do sinal eletromagnético, junto com as técnicas de localização dos raios, e outros métodos de caracterização. Por fim, foram listadas as principais redes de detecção terrestre de tipo LF/VLF, VLF ou VHF, bem como os principais sistemas de monitoramento espaciais.

O capítulo 3 detalha primeiro os sistemas de detecção de descargas atmosféricas operando na Amazônia, usados neste estudo, e as bases de dados associadas: a rede LF/VLF RDR-SIPAM e a rede VLF STARNET. Depois, esse capítulo apresenta a análise do comportamento temporal e espacial da rede STARNET através da modelagem dos Diagramas Operacionais, da simulação da Cobertura Teórica da rede em função da localização das estações ativas e da avaliação do desempenho da rede STARNET em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF com o cálculo da Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente.

O capítulo 4 apresenta uma avaliação do nível de detecção das várias configurações (número e localização dos sensores em operação) estáveis da rede através do cálculo estatístico da Taxa de Participação dos sensores ativos e da Taxa de Localização das combinações de sensores. O capítulo define primeiro as variáveis usadas. Depois, a partir Diagramas Operacionais, são identificadas as várias configurações da rede e, entre elas, as configurações estáveis.

O capítulo 5 apresenta a construção do modelo de uniformização dos dados de descargas atmosféricas, em função da configuração da rede. Por fim, esse capítulo apresenta os mapas de Fator de Uniformização.

O capítulo 6 apresenta a validação matemática do modelo de uniformização.

O capítulo 7 apresenta a aplicação do modelo de uniformização a correção de distribuição de raios, os mapas de índice cerâmico anuais e densidade de raios uniformizada anuais geradas com o modelo, a análise dos padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão e a estimativa da incidência de raios nas linhas de transmissão e torres na Amazônia brasileira para a otimização dos sistemas de proteção.

O capítulo 8 apresenta a conclusão da tese.

## **Capítulo 2 - CONCEITOS BÁSICOS**

O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos necessários ao entendimento do funcionamento dos sistemas de detecção de descargas atmosféricas. Com este objetivo, define-se primeiro o fenômeno de descarga atmosférica e descrevem-se os vários processos elétricos ativos durante a sua formação, bem como as radiações eletromagnéticas emitidas com seus modos de propagação na atmosfera. Depois, foram detalhados os sistemas de detecção baseados na detecção do sinal eletromagnético, junto com as técnicas de localização dos raios, e outros métodos de caracterização (discriminação do tipo de raios e da multiplicidade, determinação da polaridade e da estimação do pico de corrente). Em seguida, se definem os parâmetros de avaliação do desempenho de um sistema de detecção. Por fim, foram listadas as principais redes de detecção terrestre de tipo LF/VLF, VLF ou VHF, bem como os principais sistemas de monitoramento espaciais.

### **2.1 O fenômeno da descarga atmosférica**

Uma descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória, de alta corrente, cujo comprimento percorrido na atmosfera tem dimensão de quilômetros (UMAN, 1987). A principal fonte de descargas atmosféricas são as nuvens de tempestades e as descargas atmosféricas estão associadas a uma sequência de neutralização de centros de cargas (positivas e negativas), armazenadas na nuvem de tempestade (UMAN, 1987).

Nas nuvens de tempestade, podem ser identificados cinco tipos de descargas atmosféricas: dentro da nuvem, chamadas IN (Intra-Nuvem); entre nuvens, chamadas NN (Nuvem-Nuvem); entre nuvem e solo, chamadas NS (Nuvem-Solo); entre nuvem e ar, chamadas NA (Nuvem-Ar); e entre nuvem e a estratosfera, chamadas NE (Nuvem-estratosfera). As descargas atmosféricas IN são as mais frequentes. As descargas NN, NA e NE são menos comuns, por isso todas as descargas diferentes das NS são agrupadas no conjunto Descargas de Nuvens (UMAN, 1987). Uma descarga IN típica inicia na região principal de carga negativa da nuvem (tipicamente, a uma altura de 4-8 km) e propaga-se na direção de uma região superior de carga positiva (tipicamente, a uma altura de 8-12 km). As descargas NS são as mais estudadas por estarem mais

acessíveis à observação visual e principalmente por causa do perigo que apresentam às pessoas, equipamentos e instalações. Na maioria das tempestades comuns o número de raios IN supera a número de raios NS por um fator entre 2 e 10. No entanto, as tempestades severas produzem uma taxa muito mais alta de raios IN que de raios NS, e algumas tempestades não produzem nenhum raio NS (CUMMINS et al., 2009).

### 2.1.1 Processos elétricos ativos

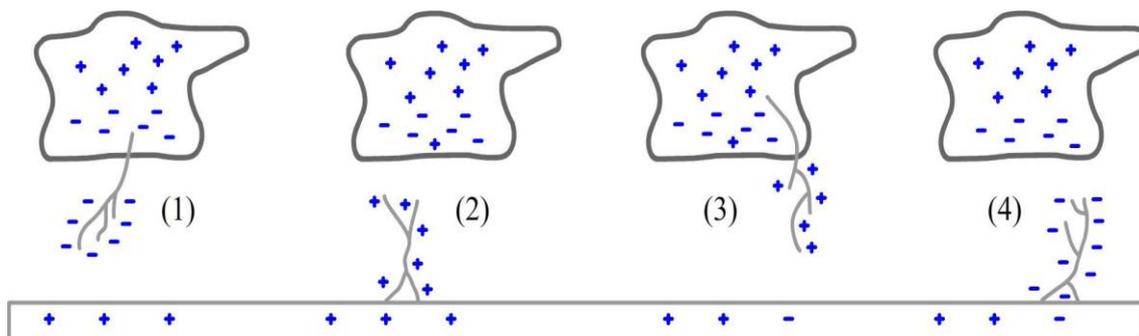
Em seguida, foram detalhados os processos elétricos atuando numa descarga atmosférica do tipo Nuvem-Solo. O raio NS é um fenômeno bastante complexo, composto por vários processos: (a) **Descarga Piloto**, (b) formação de um canal de carga chamado **Líder Escalonado**, (c) fechamento do canal chamado **Descarga Conectante**, (d) **Transferência de Carga**, (e) **Líder Contínuo** e (f) **Transferência de Carga subsequente**. Esses processos foram detalhadamente descritos por (UMAN, 1987).

- (a) **Descarga Piloto**: os raios nuvem-solo começam com pequenas descargas entre o centro positivo secundário, situado na base da nuvem e o centro negativo (descarga Piloto), causando uma liberação dos elétrons ligados às partículas de água ou gelo. Essas descargas geram variações do campo elétrico, observadas imediatamente antes do início do Líder entre a nuvem e o solo e são conhecidas como quebra da rigidez dielétrica preliminar ou inicial (*Preliminary Breakdown*).
- (b) **Líder Escalonado**: nesta fase uma frente de onda, emitindo uma intensidade luminosa fraca (geralmente não visível), se propaga em direção ao solo, criando um canal de carga ionizado (caminho condutor). Essa descarga é denominada Líder Escalonado (*Stepped Leader*). O Líder Escalonado propaga-se para baixo até chegar próximo do solo, a cerca de 5 até 100 m do solo, com uma velocidade média da ordem de  $2 \cdot 10^5$  m/s. O Líder Escalonado geralmente ramifica-se fortemente ao longo de vários caminhos e propaga-se de forma tortuosa, para buscar regiões condutoras na atmosfera. Contudo, a maioria dos ramos não atinge o solo. O Líder Escalonado transporta aproximadamente 10 C de carga no todo, com uma corrente entre 100 e 1000 A e uma duração média de 35 ms.
- (c) **Descarga Conectante**: uma Descarga Conectante (*Dart Leader*) surge com a intensificação do campo elétrico entre o solo e a parte frontal do Líder Escalonado. Tal Descarga Conectante surge geralmente de objetos pontiagudos existentes na

superfície como sistemas de para-raios, árvores ou edifícios, e se desloca em direção da parte frontal do Líder Escalonado.

(d) **Transferência de Carga:** quando ocorre a conexão entre a Descarga Conectante e o Líder Escalonado, fecha-se o circuito que permite uma **Transferência de Carga**. As descargas NS podem ser classificadas em **descargas ascendentes e descendentes** segundo a direção de propagação do Líder Escalonado. Elas podem também ser classificadas segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo, **negativas e positivas**. Deste modo, podem-se ter quatro tipos descargas NS (Figura 7): (1) descendentes negativas, (2) ascendentes negativas, (3) descendentes positivas e (4) ascendentes positivas. Cerca de 90% das descargas NS são de tipo (1) e cerca de 10% de tipo (3) de acordo com (UMAN, 1987). As descargas de tipo (2) e (4) ocorrem somente a partir de objetos altos, especialmente torres altas.

**Figura 7** - Classificação das descargas atmosféricas NS.



Fonte: adaptado de Uman (1987)

Depois, existem três processos de **Transferência de Carga** até o solo que são geralmente ilustrados no caso de uma descarga NS descendente negativa: (1) **Descarga de Retorno**, (2) **Corrente Contínua** e (3) **M Componente**. Esses processos descritos por Rakov e Uman (2003) estão apresentados na Figura 8.

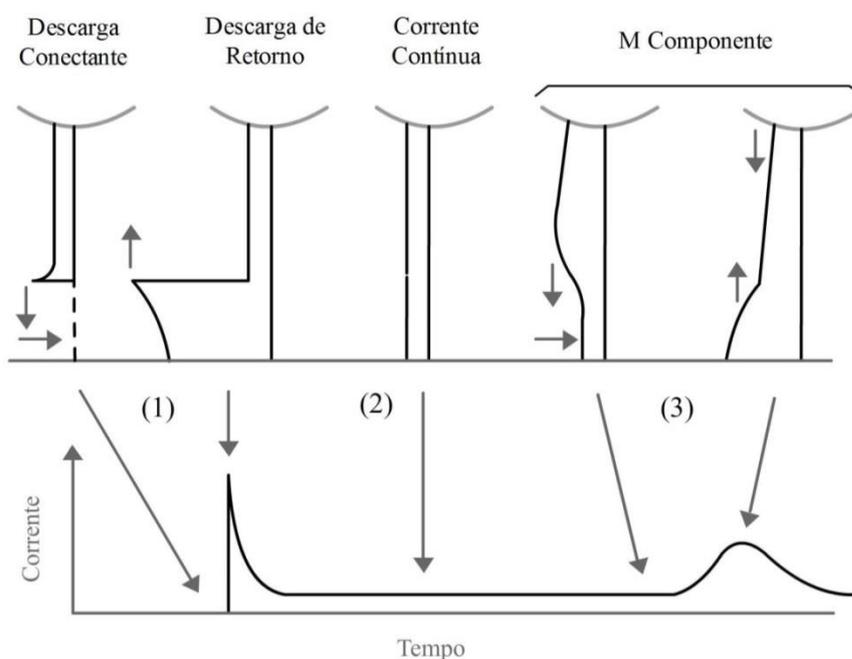
(1) **Descarga de Retorno:** na Descarga de Retorno (*Return Stroke*), o Líder Escalonado cria um canal condutor entre a fonte de carga na nuvem e o solo, deixando cargas negativas ao longo do canal já ionizado. Quando a Descarga de Retorno cruza o canal, as cargas negativas (elétrons) presentes no canal são aceleradas, criando uma corrente ascendente (os elétrons fluem da nuvem para o solo) que

neutraliza a carga do líder. A Descarga de Retorno propaga-se com uma velocidade entre 1 e  $2 \cdot 10^8$  m/s e tem uma duração média de cerca 70  $\mu$ s. O pico de corrente pode alcançar centenas de quiloamperes.

(2) **Corrente Contínua:** a Corrente Contínua ( $I_{cc}$ ) de descarga pode ser vista como um arco quase estacionário entre a fonte da carga na nuvem e o solo. O corrente do arco pode alcançar centenas de amperes (10 -1000 A) com uma duração de algumas centenas de milissegundos (1-500 ms). Em cerca de 30% das descargas atmosféricas, uma Descarga de Retorno é seguida por uma Corrente Contínua.

(3) **M Componente:** durante o período da Corrente Contínua, acontecem algumas descargas de tipo M Componente. A descarga M Componente pode ser vista como perturbação no Corrente Continua e nos canais luminosos associados. Ela implica a superposição de duas ondas que se propagam em direções opostas.

**Figura 8** - Processos de Transferência de Carga de um raio NS negativo, comparados à corrente elétrica medida no solo.



Fonte: adaptado de Rakov e Uman (2003)

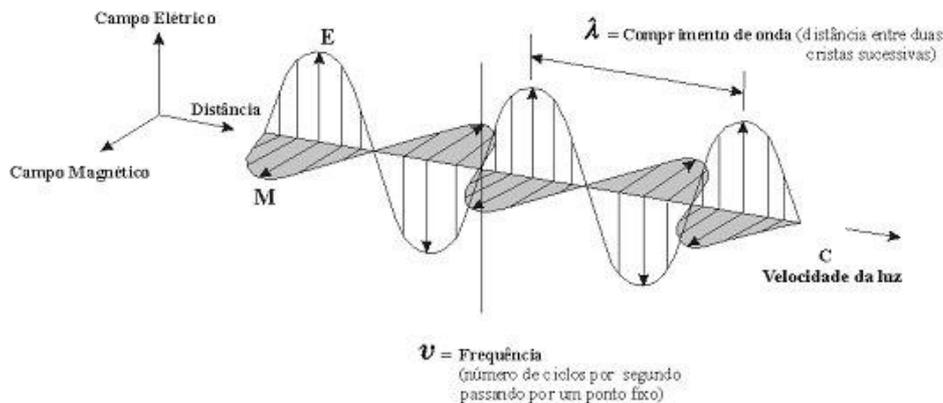
- (e) **Líder Contínuo:** quando o canal do raio está fracamente ionizado, pode iniciar o Líder Contínuo que ioniza novamente o canal. Esta etapa ocorre somente quando existem ainda centros de cargas disponíveis no interior da nuvem, próximo do canal feito anteriormente.
- (f) **Transferência de Carga subsequente:** depois da ionização do canal pelo Líder Contínuo, outras Transferências de Carga podem ocorrer. Elas são chamadas de Transferências de Carga subsequentes.

As etapas (e) e (f) podem ser repetidas várias vezes. Nesse caso a descarga atmosférica é chamada de **raio múltiplo**. O tempo entre duas Descargas de Retorno é tipicamente entre 20-100 ms. Uma descarga atmosférica usualmente contém de 2 até 4 Descargas de Retorno mas este número pode alcançar até 20 Descargas de Retorno. A corrente contínua pode persistir durante os intervalos entre as várias Descargas de Retorno. Entre 30% e 50% das descargas produzem transferência de carga até diferentes pontos do solo que podem ser separados por vários quilômetros. Por isso alguns pesquisadores definiram uma descarga atmosférica ou um evento de raio como o conjunto de todas as descargas NS que acontecem num distância <10 km e dentro de um intervalo de tempo de 1s (CUMMINS et al., 2009).

### 2.1.2 Radiação eletromagnética das descargas atmosféricas

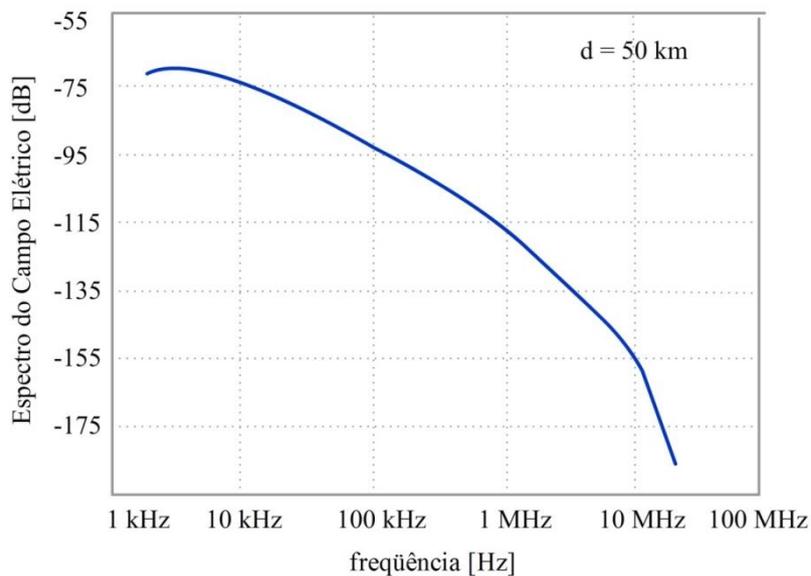
As descargas atmosféricas são geradas por vários processos elétricos complexos basicamente causados por movimento de elétrons (descritos previamente). Contudo, o movimento de elétrons provoca uma grande variedade de radiações eletromagnéticas em todo o espectro. A onda eletromagnética é formada por um campo elétrico e um campo magnético perpendicular entre si. Esses campos são descritos pelas equações de Maxwell e caracterizados pelo comprimento de onda  $\lambda$ , pela frequência  $f=c/\lambda$  (número de ciclos por segundo) e pelas amplitudes  $\mathbf{E}$  do campo elétrico e  $\mathbf{M}$  do campo magnético (ver Figura 9). No caso de uma descarga NS negativa o campo elétrico é orientado verticalmente para baixo. No caso de uma descarga NS positiva o campo elétrico é orientado verticalmente para cima e no caso de um raio IN a orientação pode ser qualquer, inclusive horizontal.

**Figura 9** - Esquema de propagação de uma onda eletromagnética.



O espectro das frequências medidas das descargas atmosféricas é apresentado Figura 10. Observa-se que a maioria da energia gerada pelas descargas é contida nas frequências altas. Essas emissões podem ser classificadas em tradicionais bandas de frequência que se relacionam com faixas comuns ao processamento do sinal. As principais radiações associadas às descargas atmosféricas são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 11.

**Figura 10** - Espectro das frequências medidas das descargas atmosféricas.



Fonte: adaptado de Uman (2001)

As Descargas de Retorno irradiam ondas eletromagnéticas nas faixas ELF (extremamente baixa frequência) de 300 Hz-3 kHz, VLF (Very Low Frequency) de 3-30 kHz e LF (Low Frequency) de 30-300 kHz, devido à transferência de uma grande quantidade de carga elétrica sobre uma grande distância. Essas emissões são as mais

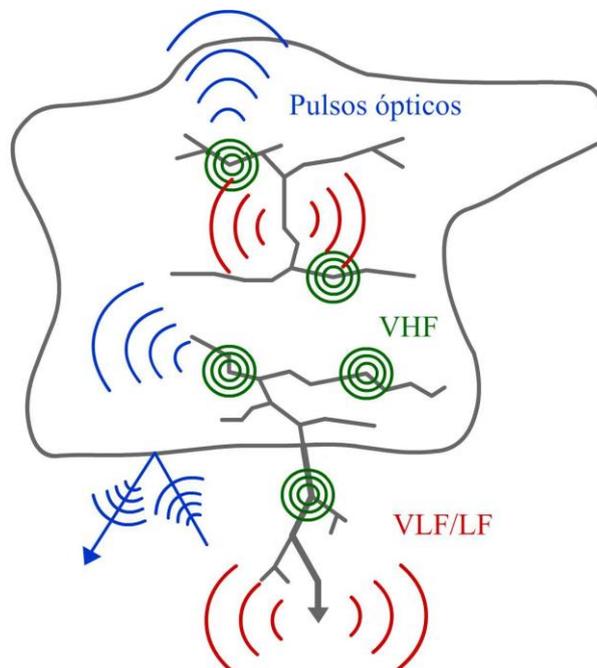
poderosas. As ondas eletromagnéticas nas faixas VHF (Very High Frequency) e UHF (Ultra High Frequency) acompanham o desenvolvimento do Líder Escalonado e do Líder Contínuo. As emissões ópticas, incluindo a radiação infravermelha e a luz visível, são irradiadas principalmente pela Descarga de Retorno. Contudo, a alta temperatura dos processos, mesmo com duração muito curta, gera radiações ópticas devido às emissões térmicas (YOSHIDA, 2008).

**Tabela 1** - Radiações associadas às descargas atmosféricas.

Banda de frequência	Processo de descarga	Processo de radiação
ELF ~ LF	Descarga de Retorno	Transferência de Carga
VHF ~ UHF	Líder Escalonado	Corrente Elétrica
IR e luz visível	Descarga de Retorno Líder Escalonado Corrente Contínua M Componente	Emissões Térmicas Transição de Elétrons
Raios-X	Líder Escalonado	Quebra fugitiva ( <i>Runaway breakdown</i> )

Fonte: adaptado de Yoshida (2008)

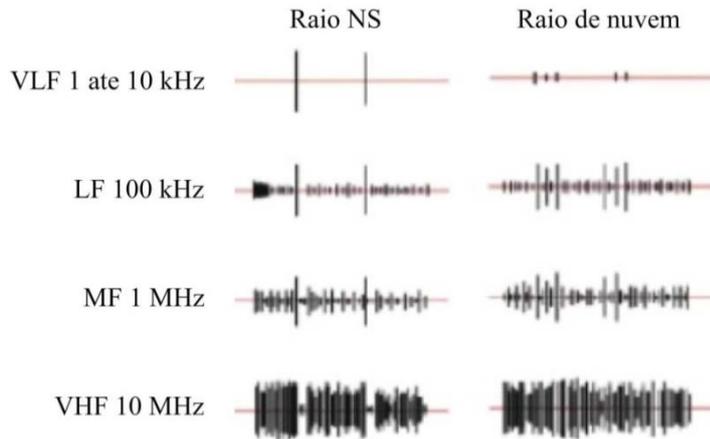
**Figura 11** - Esquema das radiações eletromagnéticas associadas às descargas atmosféricas: a descarga de retorno de um raio NS emite forte radiação LF/VLF; os processos Líder e Descarga Conectante dentro da nuvem geram radiação VHF; todas as descargas emitem radiação óptica (espectro visível).



Fonte: adaptado de Finke e Kreyer (2002)

As formas da radiação típicas de uma descarga NS e de uma descarga de nuvem, nas várias faixas de frequência (VLF, LF, MF, e VHF), estão apresentadas na Figura 12. As descargas de nuvem produzem de dezenas até centenas de pequenos pulsos com a maioria de sua energia na faixa LF ou maior (CUMMINS et al., 2009). As descargas de retorno dos raios NS emitem pulsos poderosos bem característicos nas faixas VLF e LF.

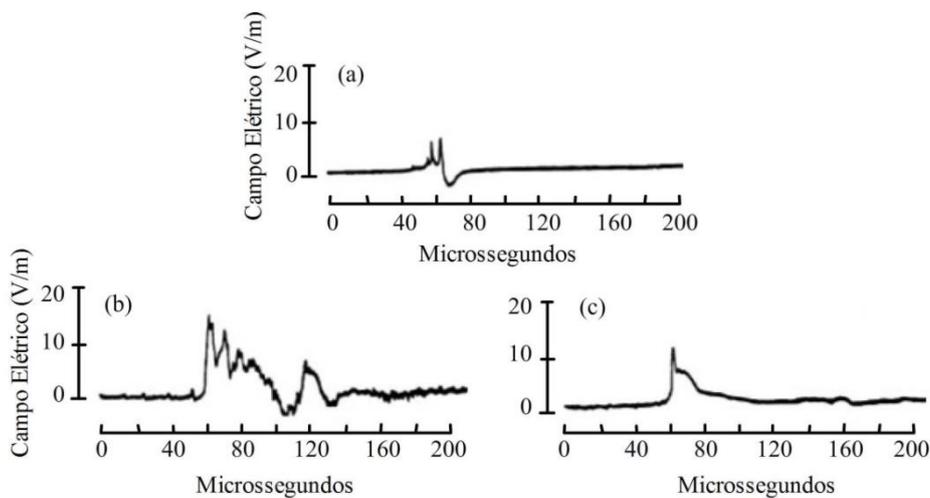
**Figura 12** - Radiação típica de uma descarga nuvem-solo e de nuvem.



Fonte: adaptado de Malan (1952)

Algumas formas de onda típicas do campo elétrico emitidos por um raio NS como quebra preliminar ou Descarga de Retorno (primeira e subsequente) são apresentadas na Figura 13.

**Figura 13** - Três pulsos de campo elétrico emitidos por um raio NS a uma distância de cerca de 60 km: (a) traço da quebra preliminar dentro da nuvem; (b) traço da primeira Descarga de Retorno; (c) traço de uma Descarga de Retorno subsequente.



Fonte: adaptado de Cummins e Murphy (2009)

### 2.1.3 Propagação das ondas na atmosfera

A radiação gerada pela descarga atmosférica se propaga na forma de onda na direção perpendicular aos Campos Elétrico e Magnético (Figura 9), a partir do canal em todas as direções, na velocidade da luz  $c$  (300.000 km/s no vácuo).

A propagação das ondas eletromagnéticas no meio atmosférico é afetada por vários fatores detalhados por (VOLLAND, 1995) que são principalmente a **atenuação da amplitude** da onda pela distância, as **reflexões no solo**, e as **reflexões ionosféricas**.

- 1) **Atenuação da amplitude** da onda: no caso das ondas emitidas pelas descargas atmosféricas, o principal efeito de propagação é a atenuação pela distância que reduz essencialmente a amplitude da onda. A atenuação é devida ao aumento da distância  $D$  a partir da fonte; A amplitude diminui proporcionalmente a  $1/D$ . As maiores frequências são atenuadas em primeiro lugar, enquanto que as frequências mais baixas viajam a grandes distâncias. De acordo com Pessi et al. (2009), a atenuação da amplitude (AA) pode ser aproximada pela equação seguinte:

$$\frac{\alpha_f}{D} \sqrt{\left[\frac{\theta}{\sin \theta}\right] \exp\left(-\frac{D}{\lambda_e}\right)} \quad (1)$$

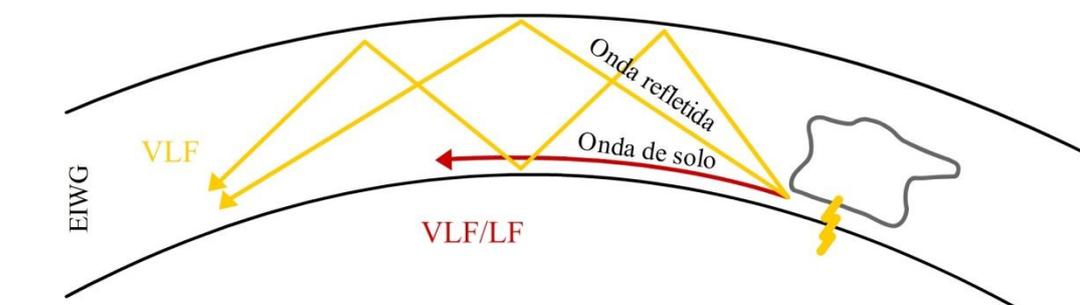
onde  $\alpha$  um fator de escala,  $D$  a distância ao longo da superfície da terra entre a descarga atmosférica e o sensor,  $\theta = D/D_e$  com  $D_e$  o raio da terra e  $\lambda_e$  a constante de espaço que depende da condutividade da terra.

- 2) **Reflexões no solo**: elas dependem das propriedades do solo e da água delimitadora do espaço de propagação; Os sinais são, por exemplo, mais atenuados sobre o oceano do que no solo devido à condutividade elétrica maior de água salgada. Na Amazônia, coberta por uma densa floresta tropical, a atenuação do sinal é maior, devido à vegetação, e aumenta com a frequência (ASSIS, 2012). A propagação também é afetada por grandes cadeias de montanhas, que atrasam o sinal de radiação.

- 3) **Reflexões ionosféricas:** as ondas eletromagnéticas interagem com a camada atmosférica superior de alta condução (chamada ionosfera). A ionosfera ( $\leq 750$  km) recebe constantemente radiação do espaço, produzindo pares de íons, resultando em pequeno excesso de carga positiva. Assim as ondas com frequências menores do que a frequência de corte ionosférico ( $f_c \approx 5$  MHz), refletem-se na direção do solo. Enquanto que as ondas com maior frequência podem penetrar a ionosfera.
- 4) Dispersão, refração, absorção causam distorção da frente de onda e mudam o espectro de frequência das descargas atmosféricas.

A distância atingida pela onda eletromagnética depende da frequência, da intensidade do corrente e do meio de propagação, isto é da a composição da atmosfera. Se as distâncias de propagação são menores do que 1000 km, uma energia significativa nas bandas VLF e LF pode propagar-se como uma onda de solo, chamada *Ground Wave* em inglês (PESSI et al., 2009). Neste caso a frente de onda propaga-se de maneira quase tangente a superfície da terra (Figura 14). Ondas longas, emitidas pelas descargas atmosféricas nas faixas VLF e ELF, são propagadas a partir de múltiplas reflexões no guia de onda formado pela Terra e a ionosfera (Figura 14). Esse guia de onda é chamado EIWG (*Earth-Ionosfere Wave Guide*). O pulso eletromagnético guiado é chamado de rádio atmosférico, ou *Sferics* como Sinal Rádio Atmosférico. A polaridade dos campos elétricos e magnéticos das Sferics se inverte a cada reflexão no EIWG. A atenuação das ondas na faixa VLF é relativamente baixa ( $\sim 3$  dB para cada 1000 km) e o sinal pode viajar a longas distâncias (mais de 5000 km) com baixa perda de energia.

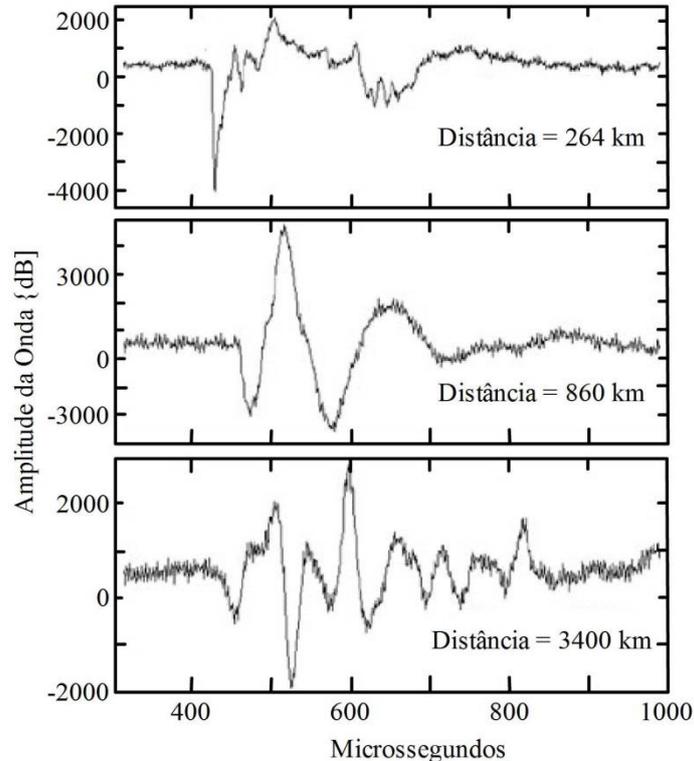
**Figura 14** – Esquema de propagação das ondas eletromagnéticas no meio atmosférico: onda de solo e onda refletida.



Fonte: do autor

A propagação das ondas no EIWG dispersa a forma inicial do pulso da Descarga de Retorno em um trem de ondas com duração de um milésimo de segundo ou mais. Um exemplo é apresentado na Figura 15, onde se podem observar diferentes formas do campo elétrico vertical, emitidas por Descargas de Retorno de raios NS negativos, detectadas por sensores localizados a três distâncias da descarga atmosférica (264 km, 860 km e 3.400 km). As reflexões no EIWG são afetadas pela espessura da ionosfera, a condutividade e permissividade do solo e do meio magnético (campo magnético terrestre e do sol). As ondas VLF refletem-se na ionosfera tipicamente a uma altura de 60-75 km durante o dia, quando uma densidade alta de elétrons na ionosfera estende-se em direção do solo na terra. Durante a noite, a alta densidade de elétrons migra para altitudes mais elevadas, e as reflexões ocorrem a uma altitude entre 75-90 km e os sinais VLF são menos atenuados (PESSI et al., 2009). As ondas emitidas pelas descargas atmosféricas na faixa ELF, são poucas atenuadas e conseguem se propagar em torno do mundo várias vezes antes de desaparecer no ruído de fundo.

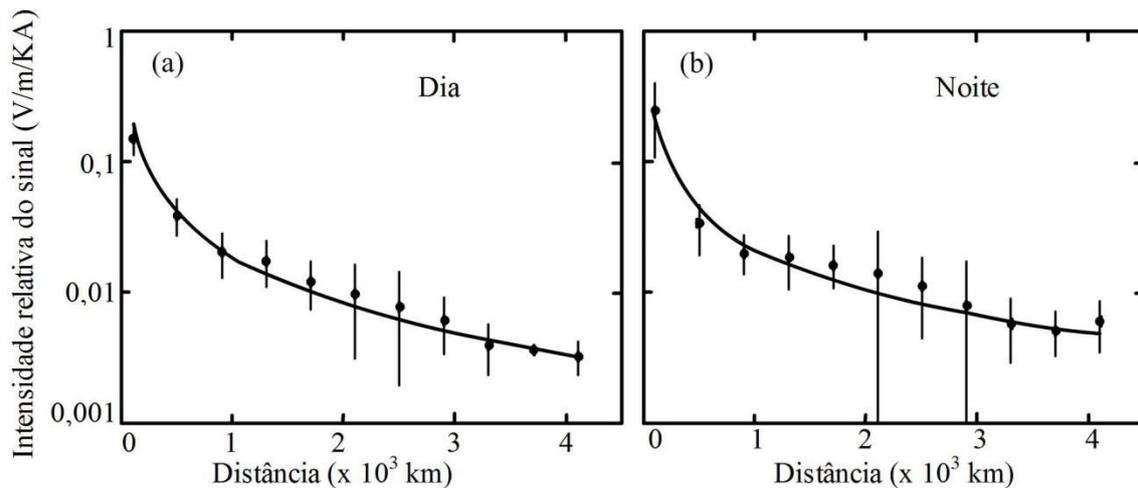
**Figura 15** - Campo elétrico vertical de formas de onda para 3 Descargas de Retorno de raios NS negativos detectadas por sensores localizados em 264, 860 e 3.400 km da descarga; a escala de amplitude é calibrada.



Fonte: adaptado de Pessi et al. (2009)

A análise da intensidade do sinal, realizada por Pessi et al. (2009), mostra uma perda exponencial da energia com a distância, observada na Figura 16. O desvio padrão caracterizado pelas barras de erro mostram um aumento dos erros na faixa de 2000-3500 km, onde a propagação envolve uma mistura de onda de solo e propagação ionosférica.

**Figura 16** - Intensidade relativa do sinal em função da distância entre a Descarga de Retorno e o sensor: (a) de dia; e (b) de noite.



Fonte: adaptado de Pessi et al. (2009)

## 2.2 Sistemas de detecção

As descargas atmosféricas são monitoradas no mundo inteiro por vários sistemas de detecção terrestre ou satelitais. Os sistemas de detecção de descargas atmosféricas são geralmente baseados na medição de algumas partes específicas do espectro eletromagnético emitido e propagado na atmosfera, tais como a luz visível, ELF, VLF, LF ou VHF. A maioria dos sistemas terrestres operam na banda LF e/ou VLF, enquanto que o sinal óptico é usado em sensores satelitais.

Todos os sistemas se decompõem em três etapas: medição dos componentes eléctricos e/ou magnéticos do campo de radiação em determinadas faixas de frequência; identificação de uma descarga atmosférica com registros e transmissão de parâmetros relevantes (ângulo de direção ou o tempo de chegada); localização da descarga usando os parâmetros transmitidos de um conjunto sensores; e se possível determinação das características da descarga. O tipo de informação que pode ser extraído a partir das medições depende do tipo de receptores e da faixa de frequência da radiação detectada.

Por exemplo, todo o canal de uma descarga pode ser mapeado a partir dos sinais VHF que caracterizam o processo de Líder Escalonado. Ademais, o sinal recebido nas faixas LF, VLF e ELF é geralmente usado para determinar a localização de uma Descarga de Retorno. De acordo com a faixa de frequência, as técnicas atuais oferecem a oportunidade de determinar várias características da descarga atmosférica como, por exemplo, a polaridade, a multiplicidade, a intensidade, e a discriminação do tipo de raio. Essas informações são processadas por componentes de software. A faixa de frequência de detecção (centro e largura de banda) determina também o alcance de detecção e a precisão da informação extraída. Por exemplo, na faixa VLF, os receptores podem detectar descargas a grandes distâncias porque o sinal se propaga a milhares de quilômetros devido a reflexões no EIWG.

### **2.2.1 Medidores de ondas eletromagnéticas**

Todos os processos de descarga atmosférica estão associados ao movimento de carga e, por conseguinte, podem ser estudados por meio de medições dos campos magnéticos e elétricos associados a esses movimentos. Existem dois tipos de receptores básicos: os que usam a detecção do campo elétrico; e os que usam a detecção do campo magnético (antenas em *loop*). Nesses receptores o sinal é digitalizado e depois processado para extrair a informação. A capacidade de detectar um raio depende da amplitude do sinal, o qual deve estar dentro da gama dinâmica do sistema de recepção. A amplitude do sinal de raio deve ser suficientemente elevada para ser perceptível dentro do ruído interno (equipamento) e externo (atmosfera).

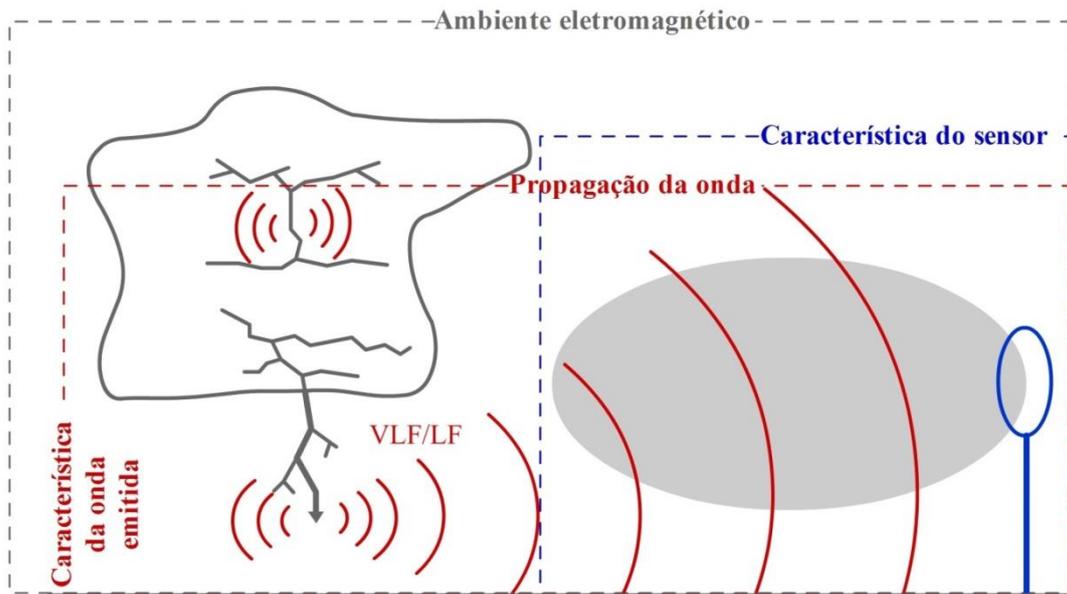
A maioria dos medidores de ondas eletromagnéticas são receptores que captam a forma da onda do campo elétrico emitida pela descarga atmosférica. Os receptores são de tipo AM (*Amplitude Modulation*) em que os pulsos eletromagnéticos são detectados através de processamento digital. Deles é extraída depois a forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo. Na faixa LF/VLF, os receptores recebem ondas de solo na baixa frequência (LF) e ondas refletidas de frequência muito baixa (VLF), chamadas Sferics; os impulsos transitórios, polarizados verticalmente no intervalo de LF/VLF, são utilizados para detectar as descargas de retorno dos raios NS. Os sensores podem também ser utilizados para detectar os pulsos produzidos pelas descargas atmosféricas de tipo Intra-Nuvem de maior intensidade. Os sensores medem o tempo e o azimute de chegada dos impulsos (CUMMINS et al., 2009).

Outros medidores de ondas eletromagnéticas usam antenas de tipo PLL (*Phase Locked Loop*) ou antenas de quadro verticais em *loop*. O sensor mede o ângulo entre a normal do circuito magnético da antena em *loop* e o campo magnético induzido pelo pulso eletromagnético emitido pela descarga atmosférica. Esse sensor permite medir a direção de chegada do sinal da descarga atmosférica.

A capacidade de um sensor em detectar uma descarga atmosférica depende de vários fatores (Figura 17):

- 1) A **característica da onda** eletromagnética emitida bem como a intensidade do campo eletromagnético associado a sua polaridade;
- 2) A **propagação da onda**: a intensidade da onda sofre atenuação na atmosfera em função da distância até que ela esteja confundida no ruído eletromagnético próprio da atmosfera; a forma de onda sofre dispersão devido a várias reflexões no EIWG, onde cada processo afeta diferentemente os vários componentes espectrais da onda.
- 3) A **característica do sensor** como seu ganho da antena que varia em função da distância de ocorrência da descarga atmosférica; do limite dinâmico de detecção do sensor, além de outros componentes como filtros e do ruído interno do equipamento;
- 4) **O ambiente eletromagnético** como o ruído eletromagnético e as interferências devido a ambiente de localização do sensor e de obstáculos próximos.

**Figura 17** - Esquema de detecção de uma descarga atmosférica.



Fonte: do autor

### 2.2.2 Localização de uma descarga atmosférica

O conceito básico de localização de uma descarga atmosférica é baseado em técnicas de triangulação a partir de um conjunto de receptores cuja posição é conhecida, sendo importante a distância entre eles. Os métodos de localização dependem do tipo de receptor usado e são apresentadas a seguir:

- (a) *MDF (Magnetic Direction Finding)*: o campo magnético gerado pela descarga é medido por antenas de quadro verticais e ortogonais (ou antena *loop*), orientadas ao longo da direção Norte-Sul e Leste-Oeste, nas faixas LF ou VLF. Depois o sensor calcula o azimute (ângulo do Norte verdadeiro) entre o sensor e o campo magnético. O cruzamento dos azimutes calculados por dois ou mais sensores determina a localização da descarga (Figura 18b). Este método de localização é referido como triangulação (HOLLE et al., 1993). Para a localização 2D apenas duas estações de recepção são necessárias, para a localização 3D, pelo menos, uma antena a mais deve determinar o ângulo de elevação. A incerteza na determinação de localização depende da diferença angular que é maior quando as diferenças são próximas a  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  (descargas atmosféricas ocorrendo alinhadas a dois sensores).
- (b) *TOA (Time-of-Arrival)*: o método mais utilizado atualmente baseia-se na determinação da Diferença de Tempo de Chegada dos pulsos eletromagnético de descargas atmosféricas até as diversas estações de um sistema de detecção de raios.

Essa técnica está relacionada a propagação das ondas de solo (*ground wave*). Após a ocorrência de uma descarga, o sinal eletromagnético emitido desloca-se até atingir as estações de monitoramento, que estão localizadas em diferentes pontos. A TOA usa apenas o componente impulsivo da descarga atmosférica, gerada pelo pico de corrente da Descarga de retorno. Admitindo-se uma propagação da onda a velocidade da luz  $c$ , o tempo de chegada até uma estação, partindo do local de incidência será:

$$t_i = \frac{D_i}{c} \quad (2)$$

onde:  $t_i$  = tempo de chegada do sinal na estação  $i$ ;  $D_i$  = distância da estação  $i$  ao local de incidência da descarga atmosférica;  $c$  = velocidade de propagação da onda eletromagnética (velocidade da luz  $c$ ).

Após a identificação da chegada, a diferença de tempo de chegada, entre pares de antenas, é usada para produzir um conjunto de localizações possíveis de incidência do raio que formam um hiperboloide (Figura 18a). A técnica de TOA usada nos sistema de detecção de descargas atmosféricas é detalhada por Lewis et al. (1960). Nesta técnica são necessárias pelo menos três estações para a localização de um evento. O método TOA precisa de uma sincronização temporal dos sensores de alta resolução com um GPS (*Global Positioning System*). Devido à ambiguidade da intersecção de duas hipérbolas, no caso geral, são necessários quatro medições de hora de chegada. Hoje, o método de TOA-3D na faixa VHF permite um mapeamento mais completo do desenvolvimento espacial e temporal dos canais de raios, tornando possível inferir as estruturas complexas de carga em nuvens (THOMAS et al., 2004).

(c) ATD (*Arrival-Time-Difference*): essa técnica é baseada na TOA, mas adaptada para uma rede de tipo VLF. No caso de uma rede de tipo LF/VLF o tempo de propagação da onda eletromagnética entre duas estações é inferior ao tempo médio entre duas Descargas de Retorno (de 10 até 100 ms). No caso de uma rede de tipo VLF as estações são separadas por milhares de quilômetros. Portanto, no método ATD utiliza-se uma correlação temporal das formas de ondas dos Sferics para se calcular a diferença entre o tempo de chegada, enquanto que no TOA calcula-se primeiro o

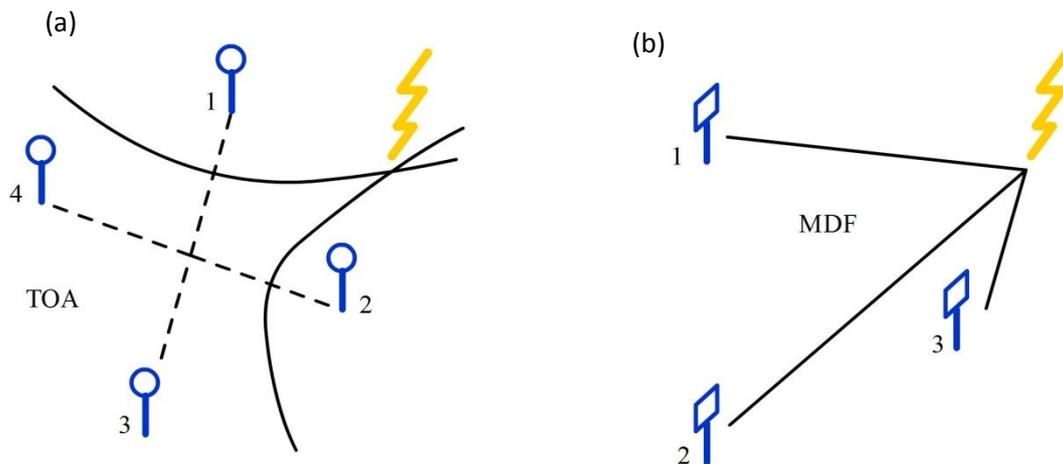
tempo de chegada a partir da identificação do tempo de subida e depois é feito a diferença entre os tempos de chegada observados nas outras estações. Pelo menos quatro estações são necessárias para uma localização inequívoca da descarga atmosférica. O método é detalhado por (Lee, 1986).

(d) TOGA (*Lightning Location by Time of Group Arrival*): essa técnica é também baseada na TOA adaptada para uma rede de tipo VLF. Para compensar a dispersão das Sferics devido à propagação no EIWG, ela mede, em cada estação, a taxa de variação da fase de uma Sferics, com relação à frequência no momento de disparo. Depois, ele calcula o tempo que a onda chega baseado na velocidade de grupo, obtido a partir da análise da decomposição do sinal em diversas frequências. Pelo menos quatro estações são necessárias para uma localização inequívoca da descarga atmosférica. O método é detalhado por Dowden et al. (2002).

(e) Interferometria: a técnica interferométrica é usada para uma rede de tipo VHF devido à dificuldade em identificar os pulsos individuais das ondas emitidas nessa faixa de frequência. Por isso a técnica é baseada nas medições das diferenças de fase da onda eletromagnética recebida pelas diferentes antenas de uma rede de antenas. Estas diferenças de fase estão diretamente relacionadas com a direção de chegada da onda. Utilizando a indicação de direção de pelo menos dois arranjos de antenas, é possível localizar o ponto de ocorrência da descarga através do método de triangulação. A técnica de localização interferométrica usada nos sistema de detecção de descargas atmosféricas é detalhada por Lojou et al. (2008).

Nas redes modernas, uma combinação de dois métodos de localização pode ser usada, minimizando, assim, a incerteza geométrica na precisão de localização.

**Figura 18** - Métodos de localização: (a) TOA (Time of Arrival); (b) MDF (Magnetic Direction Finding).



Fonte: adaptado de Macgorman e Rust (1998)

### 2.2.3 Discriminação do tipo de raios

A maioria das antenas está posicionada para receber a onda de polarização vertical, estando portanto focalizadas na detecção dos raios NS. Além disso, os raios NS são mais intensos, mascarando a detecção de raios IN. Na faixa LF/VLF a discriminação entre raios NS e IN é geralmente baseada na forma e na amplitude da onda medida pelo sensor através das alterações na intensidade do campo elétrico, onde o tempo de queda é o parâmetro mais importante ( $dE/dt$ ). As variações são maiores para as descargas NS que produzem maiores pico de corrente na Descarga de Retorno (UMAN, 1987). Os pulsos dos raios IN apresentam uma amplitude cerca de 10 dB abaixo do que as Descargas de Retorno dos raios NS na faixa de frequência entre 100 kHz e 1 MHz (WEIDMAN et al., 1981).

Além disso, discriminação do tipo de raios NS/IN pode ser realizada por meio de um algoritmo especial de TOA-3D na faixa LF/VLF que determina a altitude dos pulsos associados com IN ou NS (BETZ et al., 2009).

Os sensores que operam na faixa VHF são igualmente sensíveis às descargas NS e IN porque os processos de formação de Líder ocorrem em ambos os tipos de raios, mas a distancia de propagação dessa onda é curta (CUMMINS et al., 2009), limitando a recepção VHF a poucas dezenas de quilômetros em torno do ponto de emissão das radiações eletromagnéticas.

#### 2.2.4 Multiplicidade

Um evento de raio é formado por uma sequência de várias Descargas de Retorno (entre 2 até 20). As Descargas de Retorno têm uma duração nominal de dezenas de microssegundos, e estão separados no tempo por cerca de 20 até 100 ms e no espaço por até vários quilômetros (CUMMINS et al., 2009). O número de Descargas de Retorno num evento de raio é referido como a multiplicidade. Para identificar uma descarga de retorno única, um critério de distância e tempo é aplicado. Descargas de retorno que seguem um curto período de tempo (1 s) após a primeira ocorrência e localizada a menos de 10 km são atribuídos a um mesmo evento.

#### 2.2.5 Determinação da polaridade

A polaridade de uma descarga está relacionada aos raios do tipo NS. No caso de uma descarga NS negativa o Campo Elétrico é orientado verticalmente para baixo. No caso de uma descarga NS positiva o Campo Elétrico é orientado verticalmente para cima e no caso de um raio IN a orientação pode ser qualquer, inclusive horizontal. A maioria das antenas está posicionada para receber a onda de polarização vertical e permitem a medição do sinal da componente vertical do campo elétrico. Contudo, na faixa VLF os receptores não podem determinar diretamente a polaridade porque esse parâmetro é afetado pelas reflexões no guia de onda (EIWG).

#### 2.2.6 Estimação do pico de corrente

O pico de corrente de uma descarga de retorno de um raio NS pode ser estimado a partir da medição remota do campo elétrico ou magnético. De acordo com Uman, et al. (1975), o pico de corrente  $I_p$  de uma descarga de retorno (associado a um raio NS) está relacionado com a intensidade do pico do campo elétrico,  $E_p$ , medido pelo sensor e a velocidade da descarga de retorno  $v$  através da equação seguinte:

$$I_p = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{v} E_p \quad (3)$$

onde  $D$  é a distância entre o sensor e o ponto de contato no solo da descarga,  $c$  a velocidade da luz e  $\epsilon_0$  a constante dielétrica da atmosfera.

Da mesma maneira, o valor do pico de corrente pode ser avaliado a partir da componente horizontal do campo magnético. Em alguns sistemas de detecção, o valor do pico de corrente da descarga é estimado a partir do pico de intensidade do sinal chamado RNSS (*Range-Normalized Signal Strength*) usando uma relação linear empírica, relevante somente para as descargas NS (JERAULD et al., 2005):

$$I_p = 0,185 * RNSS \quad (4)$$

Essa relação empírica foi encontrada apenas para os raios de tipo NS cujo campo elétrico é orientado verticalmente. Os raios de tipo IN têm uma orientação qualquer, inclusive horizontal. Então, o valor do pico de corrente estimado no caso dos raios de tipo IN não é relevante porque a medição do campo elétrico vertical não é proporcional à amplitude da onda eletromagnética emitida.

## 2.3 Avaliação do desempenho de um sistema de detecção

### 2.3.1 Parâmetros de avaliação do desempenho

O desempenho de um sistema de detecção de descargas atmosféricas é avaliado por vários parâmetros que são a cobertura, a Eficiência de Detecção, o Erro de localização e Temporal, o Taxa de Falso Alarme, os Erros de Tipo de Raio, Polarização ou de Pico de Corrente. Essa avaliação se aplica a qualquer sistema de detecção terrestre ou espacial.

- (a) **Cobertura:** define-se como a área total onde a rede de detecção é capaz de localizar descargas atmosféricas. A Cobertura da rede pode também ser quantificada em termos do número de sensores que detectam raios numa zona geográfica.
  
- (b) **Eficiência de Detecção Absoluta:** dado um número de descargas atmosféricas define-se esse parâmetro como a relação percentual entre o número de descargas atmosféricas detectadas e o número total de descargas atmosféricas ocorridas no mesmo período. Como a amplitude do sinal cai com o aumento da distância a partir da fonte, a Eficiência de detecção é uma função da localização em relação à estação e da amplitude da onda emitida pelo raio. Para uma rede de estações receptoras a Eficiência de detecção é também uma função do espaçamento entre as antenas, e de

sua localização geográfica dado que fatores naturais como montanhas, lagos e florestas afetam a propagação do sinal.

- (c) **Eficiência de Detecção Relativa:** define-se como índice de desempenho obtido através da comparação entre a eficiência do sistema em investigação e algum valor de desempenho tomado como padrão. Esse padrão pode ser um desempenho do próprio sistema (auto índice) ou em relação a outro sistema. Por exemplo, pode ser tomada como padrão a eficiência máxima de detecção de um sistema, nesse caso tomado como 100%. A Eficiência de Detecção do sistema seria então considerada em relação ao desempenho máximo. Em geral isso é feito de forma a otimizar as curvas de eficiência de detecção. Outra possibilidade é assumir um dado sistema de eficiência de detecção verdadeira conhecida e estabelece-lo como padrão e comparar o desempenho do sistema investigado em relação a esse outro sistema tomado como padrão. A Eficiência de Detecção Relativa é uma função do pico de corrente e da distância ao evento de raio.
  
- (d) **Acurácia ou Erro de localização:** define-se como a diferença entre o local verdadeiro de ocorrência da descarga atmosférica e o local apontado pelo sistema de detecção. A localização é definida para raios nuvem-solo uma vez que os demais (NN, IN, NA) não atingem o solo. Falsas localizações ocorrem devido a ruídos de medição, e erros de calibração entre outros fatores.
  
- (e) **Acurácia ou Erro Temporal:** define-se como a diferença entre o tempo verdadeiro de ocorrência da descarga atmosférica e o tempo apontado pelo sistema de detecção.
  
- (f) **Taxa de Falso Alarme:** define-se como a taxa de eventos de raios registrados pelo sistema de detecção, mas que não correspondem a um evento real. Isso depende do valor do sinal/ruído e o limite de detecção do sistema. No caso de um evento de raio registrado a uma distância considerável de uma nuvem (em condições de céu claro), o evento pode ser excluído da base de dados.
  
- (g) **Erro de Tipo de Raio:** define-se dois tipos de erro, o primeiro como a taxa de raio IN classificada como raio NS e o segundo como a taxa de raios NS classificada como raio IN.

- (h) **Erro de Polarização:** define-se como a diferença entre a polarização verdadeira da descarga atmosférica e a polarização medida ou estimada pelo sistema de detecção;
- (i) **Acurácia ou Erro do Pico de Corrente:** define-se como a diferença entre o pico de corrente verdadeiro da descarga atmosférica e o pico de corrente medido ou estimado pelo sistema de detecção.

### 2.3.2 Métodos de avaliação do desempenho

Os métodos de avaliação de sistemas de detecção de descargas atmosféricas são baseados na busca de raios coincidentes entre o sistema a ser avaliado e um sistema de referência. A exploração das características dos raios coincidentes permite o cálculo dos parâmetros clássicos de avaliação de desempenho detalhados no Capítulo 2 como a Eficiência de Detecção Relativa, o Erro de Localização, o Erro Temporal, a Taxa de Falso Positivo, o Erro de tipo de raios, o Erro de Polarização, e o Erro do Pico de Corrente.

Alguns sistemas de detecção de alta precisão servem de **Referência Absoluta**, como as medidas em torres de observação instrumentadas, os experimentos de raios trigados, câmeras fotográficas de alta velocidade distribuídas no terreno a ser observado, ou arranjo de medidores de campo elétrico (Field Mill). Essas medidas de alta precisão servem de referência para avaliar as características das descargas atmosféricas encontradas pela rede de tipo LF/VLF como a localização da descarga, a determinação do tipo de raio e da polaridade e a estimação do pico de corrente. Os resultados de avaliação dos sistemas de detecção com referência absoluta são descritos a seguir na Tabela 2.

Por exemplo, Jerauld et al. (2005) avaliou o desempenho da rede NLDN (*National Lightning Detection Network*) de tipo LF/VLF em Camp Blanding, Florida (EUA) usando experimentos de raios trigados. Esse experimento consiste em lançar um pequeno foguete (cerca de 1 m de comprimento), estendido por um fio fino aterrado, a uma velocidade de cerca de 100 a 200 m/s. O foguete é lançado quando o campo elétrico quase estático no solo é suficientemente alto (-5 até -6 kV/m na Flórida). A presença do fio aumenta o campo elétrico produzido pela fonte de carga da nuvem. Se as condições forem adequadas, uma descarga elétrica, conhecida como Líder propaga-se para cima a partir da parte superior do cabo, resultando num fluxo de corrente no fio.

Quando esta corrente é suficientemente elevada (~100 A), por um período suficiente de tempo (~1 ms), o fio explode e é substituído por um canal de condução de plasma. Seguindo este processo, uma corrente constante (~100 A), conhecida como Corrente Contínua, flui para o solo durante várias centenas de milissegundos. Em seguida um Líder Contínuo carregado negativamente propaga-se para abaixo, através do canal entre a fonte de cargas da nuvem e o solo, abrindo a passagem para uma Descarga de Retorno com um pico de corrente típica entre 10-15 kA e uma duração de ~100 ns. A corrente da Descarga de Retorno é medida na base do lançador com um resistor não-indutivo.

**Tabela 2** - Avaliação de sistemas de detecção com referência absoluta.

Sistema avaliado	Sistema de Referência	Área	DE	LA	Referência
LF/VLF NLDN	Raios trigados	Camp Blanding, Florida, EUA	84%	0,6 km	(JERAULD et al., 2005)
LF/VLF NLDN	Torre	Toronto, Canadá	100%	0,4 km	(LAFKOVICI et al., 2008)

Fonte: do autor

Num outro exemplo, o desempenho da rede NALDN (*North American Lightning Detection Network*), união entre NLDN e CLDN (*Canadian Lightning Detection Network*), foi avaliado a partir de medições realizadas numa torre de observação instrumentada, instalada em Toronto no Canadá perto da fronteira com os EUA (LAFKOVICI et al., 2008). A torre tem uma altura de 553 m e recebe cerca de 10 raios por ano. A torre está equipada com: um sistema de medição de corrente derivado, incluindo duas bobinas de Rogowski; um sistema de medição da componente vertical do campo eléctrico e da componente azimutal do campo magnético da onda eletromagnética emitida; um sistema de temporização GPS com uma precisão de 1 µs; e uma câmara digital de alta velocidade (HSC) com uma amostragem de 1 ms.

Os outros sistemas, menos eficientes, servem de **Referência Relativa** como, por exemplo, as redes de tipo LF/VLF podem avaliar o desempenho de rede menos eficiente como as redes de tipo VLF. Esse método de avaliação de desempenho é chamado de inter-comparação de sistema. A avaliação se aplica unicamente aos raios de tipo NS porque o sistema de referencia está focalizado na detecção de raios NS. Os parâmetros geralmente calculados a partir dos raios coincidentes entre as duas redes são a

Eficiência de Detecção Relativa e o Erro de Localização. Em alguns estudos a Eficiência de Detecção Relativa é calculada por faixas de pico de corrente. Os resultados de avaliação dos sistemas de detecção com referência relativa são apresentados na Tabela 3.

Por exemplo, Rodger et al. (2004), Rodger et al., (2006), e Abarca et al. (2010) avaliaram o desempenho da rede global WWLL (*WorldWide Lightning Location*), do tipo VLF, em relação a redes de tipo LF/VLF: respectivamente na Austrália a partir da rede ALDIS (*Austrian Lightning Detection and Information System*); na Nova Zelândia a partir da rede NZLDN (*New Zealand Lightning Detection Network*); e nos EUA com a rede NLDN. Além disso, Gaffard et al., (2008), avaliou o desempenho da rede global ATDnet de tipo VLF na França e na Áustria em comparação as duas redes nacionais de tipo LF/VLF, respectivamente chamados Meteo-France e ALDIS. Ademais, Lagouvardos et al. (2009) comparou na Europa a rede ZEUS de tipo VLF (similar a STARNET) com a rede LF/VLF europeu LINET. Por fim, Said et al. (2011) avaliou a rede global VLF GLD360 com a NLDN nos EUA.

A rede STARNET foi avaliada recentemente no Brasil por Naccarato e Pinto Jr (2009) e Morales et al. (2011). Primeiro, Naccarato e Pinto Jr (2009) avaliou a Eficiência de Detecção Relativa e os Erros de Localização e Temporal de três redes de tipo VLF no Brasil, a STARNET, a WWLLN (*WorldWide Lightning Location Network*) e a ATDnet, usando as medidas da rede LF/VLF BrasilDat (*Brazilian lightning network*) de janeiro de 2008 como referência. Depois, Morales et al. (2011) avaliou a Eficiência de Detecção Relativa e o Erro de Localização da STARNET em 2009 em relação a 3 outros sistema de detecção: a rede LF/VLF RINDAT (*Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas*), parte da BrasilDat cobrindo o sudoeste do Brasil; a WWLL (*WorldWide Lightning Location*) de tipo VLF como a STARNET; e o sensor ótico LIS (*Lightning Imaging Sensor*) instalado a bordo do satélite de observação TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Os resultados de avaliação da STARNET desses dois estudos são apresentados na Tabela 3. A diferença entre os resultados de avaliação de Naccarato e Pinto Jr (2009) e de Morales et al. (2011) vem provavelmente do aumento do número de estações em operação da STARNET entre janeiro de 2008 (4 estações) e 2009 (de 5 até 7 estações), do conjunto de dados usados e da metodologia usada como os critérios de busca dos raios coincidentes. O estudo da

avaliação do desempenho da STARNET em relação a RINDAT de Morales et al. (2011) encontrou uma Eficiência de Detecção Relativa de 50%. Contudo este resultado é discutível dado que todas as outras redes de tipo VLF têm um valor <25%.

**Tabela 3** - Resultados de avaliação de sistemas de detecção com referência relativa.

Sistema avaliado	Sistema de Referência	Área	DE	LA	Referência
VLF WWLL	LF/VLF ALDIS	Austrália	1%	30 km	(RODGER et al., 2004)
VLF WWLL	LF/VLF NZLDN	Nova Zelândia	5,4%	-	(RODGER et al., 2006)
VLF WWLL	LF/VLF NLDN	EUA	>10% para Ip>35 KA	4-5 km	(ABARCA et al., 2010)
VLF ATDnet	LF/VLF Meteo-France ALDIS	França, Austrália	50%	-	(GAFFARD et al., 2008)
VLF ZEUS	LF/VLF LINET	Europa	25%	6,8 km	(LAGOUVARDOS et al., 2009)
VLF GLD360	LF/VLF NLDN	EUA	80% para Ip>20 kA	5-30 km	(SAID et al., 2011)
VLF WWLL	LF/VLF RINDAT	Brasil	10-14%	20 km	(NACCARATO et al., 2009)
VLF STARNET	LF/VLF RINDAT	Brasil	3-5%	20 km	(NACCARATO et al., 2009)
VLF ATDnet	LF/VLF RINDAT	Brasil	19-24%	50 km	(NACCARATO et al., 2009)
VLF STARNET	LF/VLF RINDAT	Brasil	50%	6-12 km	(MORALES et al., 2011)

Fonte: do autor

Um sistema de detecção pode ser também avaliado em referencia a um modelo como nos estudos de Cummins et al. (1998) e Rodger et al. (2004), Rodger et al. (2006). Nesses estudos, um modelo calcula o Erro de Localização de uma rede usando o método dos mínimos quadrados.

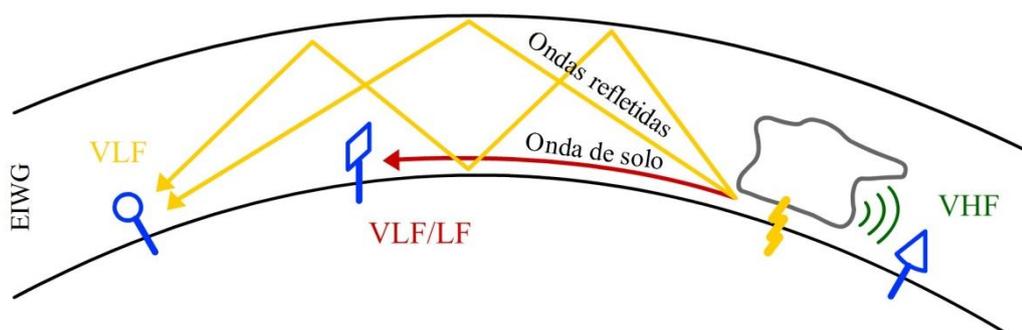
## 2.4 Redes terrestres em operação no mundo

Um conjunto de receptores terrestres, formando uma rede, permite a localização das ocorrências de descargas atmosféricas. A cada tipo de receptor correspondem um ou vários métodos de localização, uma escala de cobertura, uma ordem de grandeza do Erro de Localização (LA) e de Eficiência de Detecção (DE). Algumas redes maiores,

que foram desenvolvidas ao longo de muitos anos, consistem geralmente em diferentes tipos de sensores e usam diferentes técnicas de localização em combinação. As informações são depois integradas numa central de processamento que gera a base de dados de descargas atmosféricas como a localização, o tempo de ocorrência e outras características, bem como monitoram a qualidade das medições e estimações. Contudo cada rede se focaliza numa faixa de comprimento de onda específica.

Um esquema de funcionamento dos sensores LF/VLF (baseados nas ondas de solo), VLF (baseados nas ondas refletidas) e VHF é apresentado na Figura 19. Ademais, as principais características das redes terrestres, em função das faixas de frequência, são resumidas Tabela 4.

**Figura 19** - Esquema de funcionamento das redes terrestre de detecção eletromagnética LF/VLF, VLF e VHF.



Fonte: adaptado de Cummins et al. (2009).

**Tabela 4** - Características das redes terrestres de detecção.

Sensores	Métodos de localização	Cobertura	Erro de localização	Eficiência de detecção
LF/VLF	TOA, MDF	Local e regional	Metros	~90%
VLF	ATD, MDF e TOGA	Regional e Global	Kilometros	<25%
VHF	TOA, interferometria	Local	Metros	>90%
ELF	MDF	Global	Megametros	<5%

Fonte: do autor

#### 2.4.1 Redes terrestres de tipo LF/VLF

Diversas **redes de tipo LF/VLF** estão em operação no mundo inteiro atualmente. Usualmente essas redes usam dois tipos de sensores: o LPATS (*Lightning Position And Tracking Sensor*) fabricado inicialmente pela empresa Global Atmospheric e incorporado depois pela empresa Vaisala Inc., formado por uma Antena

elétrica *whip*, operando na faixa 2 - 500 kHz, usando a técnica TOA para localizar os raios NS (BENT et al., 1984); o IMPACT (*Improved Accuracy from Combined Technology*) da empresa Vaisala Inc., formando por 2 antenas loop ortogonais e 1 antena de placa operando na faixa 0.4 kHz – 400 kHz e usando uma combinação de TOA e MDF. A distância entre os sensores em geral é de algumas centenas de quilômetros. Os dados de descargas atmosféricas incluem geralmente informações sobre latitude e longitude, o tempo de ocorrência, o tipo de raio, a polaridade e estimação do pico de corrente. As principais redes LF/VLF são:

- 1) NALDN (*North American Lightning Detection Network*): ela foi criada em 1998, e traz a NLDN (*National Lightning Detection Network*) com mais de 100 sensores instalados nos Estados Unidos desde 1989 e a CLDN (*Canadian Lightning Detection Network*). A rede combina sensores de tipo LPATS e IMPACT; Todos os dados dos sensores são processados no Centro de Controle de Rede em Tucson (Estados Unidos); O cálculo da localização é otimizado usando os métodos de MDF e TOA (CUMMINS et al., 1998). A DE da NLDN foi estimada em torno de 84% com uma LA de 0,6 km (JERAULD et al., 2005).
- 2) LINET: ela consiste em uma rede de cerca de 100 sensores que detectam o campo magnético do sinal da descarga atmosférica, espalhados em 20 países europeus, com 30 sensores na Alemanha (<https://www.nowcast.de>). Esta rede realiza uma discriminação do tipo de raios NS/IN por meio de um algoritmo especial TOA-3D processada na estação central (BETZ et al., 2009).
- 3) BrasilDat (*Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas atmosféricas*): similar a NLDN, ela foi criada pelo ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica), no final da década de 80, em parceria com diversas instituições no Brasil. Essa rede integrou: a RINDAT (*Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas*) operada pelo INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*); BLDN (*Rede de Detecção de Raios do Brasil*), que cobre o estado de Rondônia; e a RDR-SIPAM (*Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia*), 12 sensores de tipo LPATS IV na Amazônia oriental (NACCARATO et al., 2009). A rede RDR-SIPAM, atualmente fora de operação, é detalhada no Capítulo 3.

- 4) Existem várias redes LF/VLF do mesmo tipo no mundo inteiro; entre as principais podemos citar a JLDN (*Japan Lightning Detection Network*), ALDIS (*Austrian Lightning Detection Network*), NZLDN (*New Zealand Lightning Detection Network*), e a Meteo-France.

#### **2.4.2 Redes terrestres de tipo VLF**

As radiações VLF podem viajar a grandes distâncias, ou seja, milhares de quilômetros, e são usadas para observações regionais ou globais. A distância entre os sensores deve ser de vários milhares de quilômetros. Os sistemas usam métodos baseado em TOA (ATD e TAGO) e/ou MDF para localizar os raios. Os dados de descargas atmosféricas incluem geralmente informações sobre latitude e longitude, e o tempo de ocorrência. Por causa das múltiplas reflexões na EIWG não se pode determinar diretamente a polaridade, o pico de corrente ou discriminar o tipo de raio. Contudo a polaridade pode ser inferida com a variação do campo elétrico e a distância de ocorrência da descarga atmosférica (MORALES et al., 2007). O pico de corrente pode ser estimado a partir do campo magnético (SAID et al., 2010). As principais **redes de tipo VLF** no mundo são:

- 1) WWLLN (World Wide Lightning Location Network): a rede experimental é operada pela Universidade de Washington em Seattle com cerca de 50 sensores em todo o mundo operando entre 1 e 24 kHz. A rede foi construída através da colaboração com vários institutos de pesquisa no mundo inteiro. Ela usa o método do TOGA; De acordo com Abarca et al. (2010) a Eficiência de Detecção Relativa foi estimada >10% para  $I_p > 35$  KA e a LA em torno de 6,8 km.
- 2) GLD360: a rede é operada pela empresa Vaisala Inc. com uma cobertura global. A eficiência de detecção é superior a 70% na maioria das áreas do hemisfério norte e entre 10-50% no resto do hemisfério sul; Nos Estados Unidos a Eficiência de Detecção Relativa foi estimada a 80% para  $I_p > 20$  kA com uma LA entre 5 e 30 km (SAID et al., 2011)
- 3) ATDnet: a rede é operada pelo UK Met Office (Inglaterra) e iniciou operação em junho de 1988, usando um método de localização ATD. A rede opera hoje em uma faixa de frequência estreita (2,5 kHz) em torno de 13,733 kHz e cobre toda a Europa, Norte da África, o Atlântico Norte e a América do Sul com cerca de 30

sensores. A Eficiência de Detecção Relativa foi estimada a 50% (GAFFARD et al., 2008). As antenas usadas são de tipo *wipe* com polarização vertical.

- 4) ZEUS: a rede é operada pela Universidade de Connecticut e o Observatório Nacional de Atenas, consiste em 10 sensores da empresa Resolution Displays, Inc. operando na faixa de frequência 7 até 15 kHz em e usa o método de localização ADT. A rede funciona desde 2001 e cobre Europa e África com uma Eficiência de Detecção Relativa de 25% e um LA de 6,8 km (LAGOUVARDOS et al., 2009);
- 5) STARNET: a rede, similar a ZEUS, é operada pela USP (Universidade de São Paulo) com 9 sensores da empresa Resolution Displays, Inc. e cobre a América do Sul. A rede STARNET é detalhada no Capítulo 3.

### 2.4.3 Redes terrestres de tipo VHF

Os sensores que operam em VHF provêm uma visualização detalhada de processos elétricos ocorrendo no interior das nuvens como a formação dos líderes. Os tipos de sensores mais comuns usados nas redes de tipo VHF são o SAFIR (*Surveillance et Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique*) desenvolvido pela ONERA, formado por um conjunto de 5 antenas de dipolos elétricos operando na faixa 110 – 118 MHz (RICHARD et al., 1989) e o DIFT (*VHF Broadband Digital Interferometer*). Para localizar os raios, os sistemas usam métodos de interferometria ou TOA os quais permitem realizar o mapeamento 3D das descargas atmosféricas. A distância entre os sensores é de algumas dezenas de quilômetros, As principais **redes do tipo VHF** atualmente são:

- 1) LMA (*Lightning Mapping Array*): ela é operada pelo NMT (*New Mexico Institute of Mining and Technology*). O sistema permite realizar o mapeamento 3D da estrutura do Líder Escalonado com o método de TOA-3D. A LA no sentido vertical e horizontal é <100m (THOMAS et al., 2004).
- 2) SIDDEM (*Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos*): ela é operada pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com 5 sensores SAFIR e 2 IMPACT cobrindo o sul do Brasil.

## 2.5 Sensores ópticos em satélites de observação

Satélites que orbitam em torno da Terra têm a possibilidade de detectar a atividade elétrica através da detecção da luz emitida. Os sensores ópticos registram os pulsos na faixa da luz visível emitidas no sentido ascendente pelas descargas atmosféricas. Os principais são:

- 1) OTD (*Optical Transient Detector*) de tipo câmera vídeo incorporados no satélite polar MicroLab-1 em operação de 1995 até 1997; numa órbita baixa (740 km) e uma inclinação de 70 °; o sensor óptico fornece uma resolução espacial de ~10 km e uma eficiência de detecção de ~ 50% (CHRISTIAN et al., 2003);
- 2) LIS (*Lightning Imaging Sensor*) de tipo CDD (*Charge-Coupled Device*) com telescópio (Figura 20) incorporado no satélite polar TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) lançado em 1997. O sensor LIS detecta as emissões no comprimento de onda  $\lambda = 777,4$  nm. O gerador de imagens ópticas tem uma taxa de amostragem ligeiramente superior a 500 quadros por segundo (600 km  $\times$  600 km com uma resolução espacial de 3 km), que permite localizar os raios através das mudanças momentâneas no brilho das nuvens causadas pelas descargas elétricas. O sensor registra o tempo de ocorrência, mede a energia radiante, e determina a localização dos eventos de raios dentro do seu campo de visão. O sensor detecta todos os tipos de raios (NS, IN, NN, e NA). Entretanto, segundo Thomas et. al. 2000, apenas 60% dos raios nuvem-solo são detectados pelo LIS. Os sensores OTD e LIS não são capazes de detectar grandes frações da atividade elétrica devido à sua órbita baixa e o tempo curto de passagem sobre uma tempestade.

**Figura 20 - Sensor LIS**



Fonte: <http://trmm.gsfc.nasa.gov>

- 3) GLM (*Geostationary Lightning Mapper*) de tipo CDD com um telescópio pequeno e duplo (sensor ótico) será instalado em 2014 a bordo de um satélite geoestacionário chamado GOES-R para medir a atividade elétrica global de maneira contínua acima da América do Norte e do Sul e com uma resolução de cerca 10 km. O GLM detecta as emissões na largura de onda  $\lambda = 777,4$  nm com uma resolução temporal de 2 ms e espacial de 8 x14 km com imagem de 1372 x 1300 pixels. Isto levará esses sistemas a uma eficiência de detecção dos raios NN e NS entre 70 e 90%.

## **Capítulo 3 - BASE DE DADOS**

A rede STARNET é atualmente o único sistema de detecção de raios gratuito e contínuo cobrindo toda a Região Amazônica. O capítulo 3 descreve em detalhe a rede STARNET do tipo VLF e analisa a base de dados de descargas atmosféricas associada.

Nesse contexto foram, primeiramente, descritas as duas redes de detecção atuando na Amazônia que são a rede LF/VLF RDR-SIPAM e a rede VLF STARNET. Depois foi analisado, em detalhe, a partir da base de dados histórica entre 2008 e 2011, o comportamento temporal e espacial da rede STARNET modelizando os Diagramas Operacionais e simulando a Cobertura Teórica da rede em função da localização das estações ativas. Por fim, o desempenho da rede STARNET foi avaliado em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF com o cálculo da Diferença Temporal, Erro de Localização, e Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente. Apesar da RDR-SIPAM, do tipo LF/VLF, ser até agora o único sistema de detecção de alta resolução, ela só cobriu parcialmente a Amazônia oriental e parou o seu funcionamento desde 2009.

### **3.1 Descrição das redes de detecção**

Nesta secção foram detalhados: a instalação (localização dos sensores, período de operação), o funcionamento (tipo de sensores, método de localização) e os conjuntos de dados de descargas atmosféricas derivados das redes de detecção RDR-SIPAM de tipo LF/VLF e STARNET de tipo VLF.

#### **3.1.1 RDR-SIPAM**

Em 2004, o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) inicia, na Amazônia Oriental, a operação de um conjunto de 12 sensores do tipo LPATS-IV, desenvolvidos pela empresa Global Atmospheric (atualmente incorporado pela empresa Vaisala Inc.) que passam a compor a denominada RDR-SIPAM como Rede de Detecção de Raios do SIPAM. A rede possuía uma central de processamento (modelo CP 8000) situada na cidade de Belém e os sensores foram dispostos nas cidades de Belém, Breves, Tucuruí, Paragominas, São Luís, Imperatriz, Barra do Corda, Parauapebas, Carolina, Redenção, São Félix do Araguaia e Natividade (Figura 21). Estes sensores foram distribuídos a

uma distância que varia entre 160 e 320 km. A rede ficou em operação de maio de 2004 até maio de 2009. Ela permitiu o monitoramento dos eventos de raio ao longo das linhas de transmissão de energia elétrica norte-sul das empresas de geração transmissão e distribuição de energia elétrica, CELPA e ELETRONORTE, assim como a caracterização das descargas na região (densidade, polaridade, intensidade de corrente). A localização dos sensores está mostrada na Figura 21.

Cada estação da rede é formada por uma antena de recepção LF/VLF vertical, uma antena de comunicação VSAT, e uma sala de operações incluindo um sensor LPATS-IV, um receptor da VSAT e um computador (Figura 22). A antena de recepção de tipo helicoidal vertical com uma polarização circular é conectada a um sensor LPATS-IV que discrimina a forma de onda da Descarga de Retorno na faixa de frequência 1-350 kHz. O sensor mede a amplitude e o sinal da componente vertical do Campo Elétrico da onda. O sinal está sincronizado com o relógio de um GPS, de 5 MHz com uma precisão de 50 ns, que permite a determinação do tempo de chegada da descarga. As informações são enviadas para a central de processamento através um sistema de comunicação VSAT. A central de processamento calcula a localização da descarga com o método TOA baseado na diferença de tempo de chegada da onda entre pares de estações detalhada por Lewis et al. (1960). Precisa-se pelo menos de 4 estações para localizar a descarga.

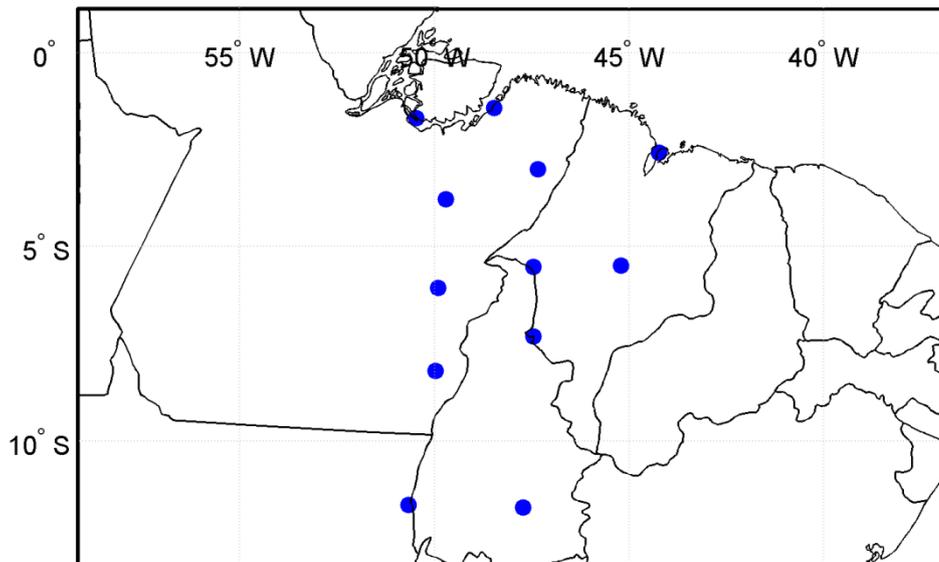
O sistema de detecção (Figura 22) está focalizado nas descargas NS porque a maior parte dos raios IN tem uma componente vertical do campo elétrico quase nula ou com amplitude abaixo do nível de ruído (CUMMINS et al., 2009). De acordo com Bent e Lyons (1984), a Eficiência de Detecção Absoluta dos sensores LPATS é somente de 1% para as descargas IN e 70% para as descargas NS. Comparando o LPATS com um sensor de tipo VHF, Théry (2001), conseguiu validar 75% das descargas NS negativas, mas apenas 25% das descargas NS positivas registradas pelo LPATS. A base de dados da RDR-SIPAM forneceu, entre outros parâmetros, o tempo e a posição das descargas atmosféricas identificadas ao nível do solo; o tipo de raio (NS ou IN); a polaridade e o valor do pico de corrente. Essa base constitui o conjunto de dados explorado neste estudo e a lista completa dos parâmetros medidos é apresentada no Anexo A. O sensor LPATS discrimina os raios NS e IN por reconhecimento de padrão da forma de onda. A polaridade é dada pelo sinal da componente vertical do campo eletromagnético que

depende da carga transferida da nuvem até o solo. O valor do pico de corrente da descarga NS é estimado a partir do pico de intensidade do campo magnético chamado RNSS (*Range-Normalized Signal Strength*) usando uma relação linear empírica, relevante somente para as descargas NS (JERAULD et al., 2005), dada pela equação 5:

$$I_p = 0,185 * RNSS \quad (5)$$

A RDR-SIPAM foi integrada em 2006 na Rede Brasileira chamada BrasilDAT. Neste contexto, Naccarato e Pinto Jr (2009) estimou a Eficiência de Detecção Absoluta da RDR-SIPAM entre 35% e 70% dentro da fronteira formada pelos sensores. O erro de localização das redes LF/VLF é geralmente < 1 km (CUMMINS et al., 2009). De acordo com Jerauld et al. (2005), o Erro médio do Pico de Corrente foi estimado em 18% para a NLDN, uma rede similar a RDR-SIPAM.

**Figura 21** - Localização geográfica dos sensores LPATS-IV da Rede de Detecção RDR-SIPAM.



Fonte: do autor

**Figura 22** - Fotos de uma estação da RDR-SDIPAM: (a) Antena recepção; (b) Antena da VSAT; (c) Sala de operação.



Fonte: SIPAM

### 3.1.2 STARNET

O sistema de detecção de descargas atmosférica "*Sferics Timing And Ranging Network*" (chamada STARNET) iniciou em 1997 com uma rede experimental de 5 antenas rádio receptoras, na faixa de frequência VLF, entre 7 e 15 kHz, instaladas ao longo da costa leste dos EUA e em Porto Rico. As antenas foram desenvolvidas pela empresa Resolution Display Inc. Esta rede experimental operou até 1998 e foi estudada em detalhe por (MORALES, 2001).

Em 2003, 4 antenas rádio da Resolution Display Inc. foram instaladas no continente Africano formando uma rede chamada ZEUS, do Observatório Nacional de Atenas (NOA). Esta rede possibilitou o monitoramento das tempestades sobre os continentes, Europeu e Africano, até 2005 (CHRONIS et al., 2006).

Em 2006 foi implantada a rede STARNET (*Sferics Timing and Ranging Network*) na América do Sul, a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Coelce (Companhia Energética do Ceará) com a UECE (Universidade

Estadual do Ceará) e a USP (Universidade de São Paulo) com a instalação de 2 sensores no Brasil (em Fortaleza e Cachoeira Paulista), 1 no Caribe (em Guadalupe, França) e um sensor de teste em São Paulo. Depois 6 novos sensores foram instalados no Brasil: Campo Grande em 2007; Curitiba e São Martinho da Serra em 2008 em parceria com o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR); Brasília e Manaus em 2009 (Manaus em parceria com o SIPAM); São Paulo em 2010; e Belém em 2012 também em parceria com o SIPAM. O sensor de Curitiba foi deslocado para Brasília durante o ano 2009. De modo que a rede STARNET está operando final de 2012 com um total de 9 sensores desenvolvidos pela Resolution Displays Inc. Em 2013 foram instalados dois outros sensores: um no Cabo Verde e o outro em Ilhéus. A cobertura da rede STARNET é hoje global na América do Sul. A localização dos sensores operando final de 2013 é apresentada Figura 23.

Cada estação da STARNET é formada por uma antena rádio receptora do tipo vertical similar a um monopolo acompanhada de um pré-amplificador, uma sala de operação incluindo um sistema de aquisição (conversor Analógico/Digital) e um computador conectado à rede Internet (Figura 24). Os sensores medem continuamente o campo elétrico vertical emitido pelas descargas atmosféricas na faixa de frequência entre 7 e 15 kHz usando um filtro-impulsivo-finito (FIR) e identifica no sinal as formas de onda das Sferics. Cada forma de onda dos *Sferics* é capturada em janelas de 4,4 milissegundos. As *Sferics* fracas e distantes são discriminadas do ruído e das interferências pelos algoritmos de processamento do sinal. O software é capaz de detectar 130 *Sferics* por segundo.

A faixa de frequência (7-15 kHz) é centrada no pico do espectro de energia emitido pela Descarga de Retorno das descargas NS (CHRONIS et al., 2003). Portanto, os sensores são mais sensíveis às descargas atmosféricas de tipo NS. Os sensores enviam, por internet, ao centro de processamento, situado na Universidade de São Paulo (USP), cada forma de onda de Sferics identificada, cujo sinal está sincronizado por um GPS (Sistema de Posicionamento Global) com uma precisão de 1 $\mu$ s.

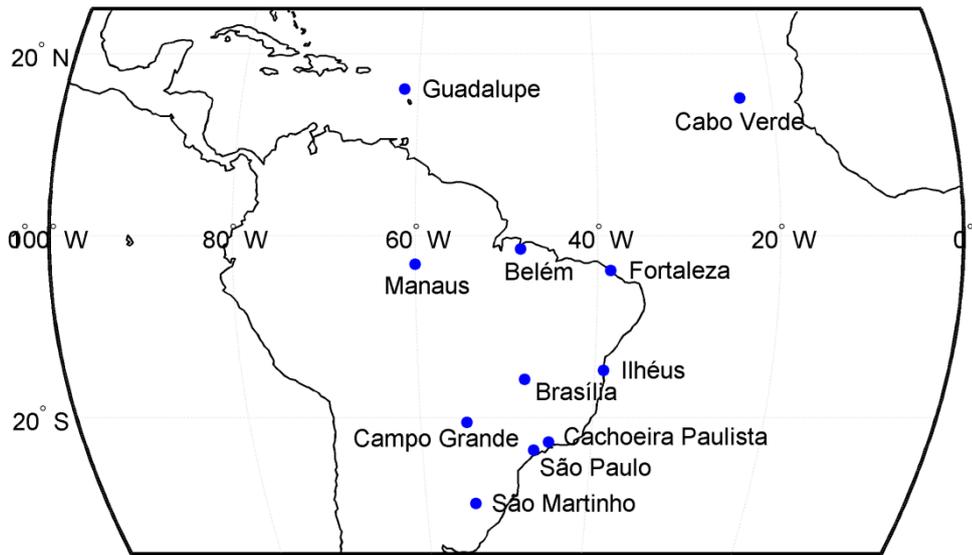
São necessários um mínimo de detecção de 4 formas de onda de Sferics para calcular a localização da descarga atmosférica usando um método de diferença de tempo de chegada detalhada por Lee (1986). Uma correlação temporal cruzada entre duas

formas de onda medidas por duas estações define uma ATD. Então para 4 estações se pode calcular no máximo 6 ATDs, para 5 estações 10 ATDs. Um algoritmo seleciona depois as melhores correlações ( $> 0,98$ ) e combinações. O valor da ATD representa a posição entre duas estações com uma determinada diferença de tempo de chegada do sinal. A intersecção entre as ATDs determina o local da descarga atmosférica por triangulação.

A base de dados histórica da STARNET foi reprocessada para incorporar os sensores que não estavam disponíveis em tempo real. Essa base constitui o conjunto de dados explorado neste estudo. A base de dados da STARNET, disponível no site internet da USP <http://www.zeus.iag.usp.br> fornece, entre outros, o tempo de ocorrência e a localização da descarga atmosférica. A lista completa dos parâmetros medidos é apresentada no Anexo B. Além disso, MORALES et al. (2011) avaliou a Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em relação à BrasilDAT entre 50-60% com uma Acurácia de Localização entre 6 e 12 km, no Centro e Sul do Brasil.

A rede STARNET é similar à rede ZEUS, instalada na Europa e África (CHRONIS et al., 2006), e a seu protótipo, uma rede experimental operando no Nordeste do Atlântico e na costa leste dos Estados Unidos entre 1997 e 1998 (MORALES, 2001). Essa rede experimental era capaz de detectar cerca de 80% dos raios NS ocorridos dentro das fronteiras da rede e somente 15% dos raios IN (MORALES, 2001).

**Figura 23** - Localização dos receptores VLF da rede STARNET operando final de 2013.



Fonte: do autor

**Figura 24** - Estação da STARNET instalada no SIPAM de Belém em Agosto 2012: (a) e (b) antena rádio; (c) sala de operação com o conversor A/C e o computador ligado a Internet.



Fonte: do autor

## 3.2 Diagramas de Operação da STARNET

Foi observado que o número de sensores operando da rede STARNET variava ao longo do tempo. Nesta secção foi analisado o comportamento temporal da rede STARNET calculando os Diagramas Operacionais. Depois foram apresentados os resultados de uma análise estatística dos Diagramas Operacionais por ano de funcionamento. O estudo foi baseado em quatro anos de dados reprocessadas da rede STARNET, de janeiro de 2008 até dezembro de 2011.

### 3.2.1 Construção dos Diagramas Operacionais

A base de dados da rede STARNET não fornece informação sobre o status dos sensores em função do tempo. Por isso, o Diagrama Operacional da rede foi construído a partir dos *flags* de participação dos sensores na solução de localização de cada descarga atmosférica detectada pela rede. A participação do sensor na solução depende da qualidade das ATDs calculadas (LEE, 1986). Portanto, o número de sensores participando pode ser inferior ao número de sensores disponíveis. O status de cada sensor foi classificado a cada 10 minutos em função de dois critérios:

- 1) *Sensor Detection* (SD): quando o sensor participa na solução de localização, pelo menos, de uma descarga no intervalo de 10 minutos em toda a cobertura da rede, ou seja, toda América do Sul;
- 2) *Without Sensor Detection* (SWD): quando o sensor não participa na solução de localização de pelo menos uma descarga no intervalo de 10 minutos em toda a cobertura da rede, ou seja, toda América do Sul.

Os diagramas obtidos chamados de **Diagrama Operacional da rede** são apresentados nas Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, e correspondentem a um ano de operação. Contudo, a não participação de um sensor na solução de localização das Sferics durante 10 minutos, não significa que o sensor não funciona. No entanto, uma série temporal com o critério SWD permitiu identificar uma falha do sensor > 24 horas. As abreviaturas usadas para o nome das estações são apresentadas Tabela 5.

**Tabela 5** - Abreviaturas usadas para cada estação.

<b>Nome da estação</b>	<b>Abreviatura</b>
<b>São Paulo</b>	Sp
<b>Brasília</b>	Ba
<b>Manaus</b>	Ma
<b>Curitiba</b>	Cu
<b>São Paulo-Teste</b>	St
<b>Campo Grande</b>	Cg
<b>São Martinho da Serra</b>	Sm
<b>Guadalupe</b>	Gl
<b>Fortaleza</b>	Ft
<b>Cachoeira Paulista</b>	Cp

Fonte: do autor

Observam-se, nos Diagramas de Operação, as datas de instalação bem como os períodos de falhas de cada estação da rede. A rede STARNET apresentou dois períodos de funcionamento:

- 1) Entre 01/01/2008 e 31/08/2009 a rede funcionou com um máximo de 7 estações: Curitiba, mais a estação de teste de São Paulo ou Manaus, Campo Grande, São Martinho, Guadalupe, Fortaleza e Cachoeira Paulista.
- 2) Entre 01/09/2009 e 31/12/2011 a rede funcionou com um máximo de 8 estações: São Paulo, Brasília, Manaus, Campo Grande, São Martinho, Guadalupe, Fortaleza e Cachoeira Paulista.

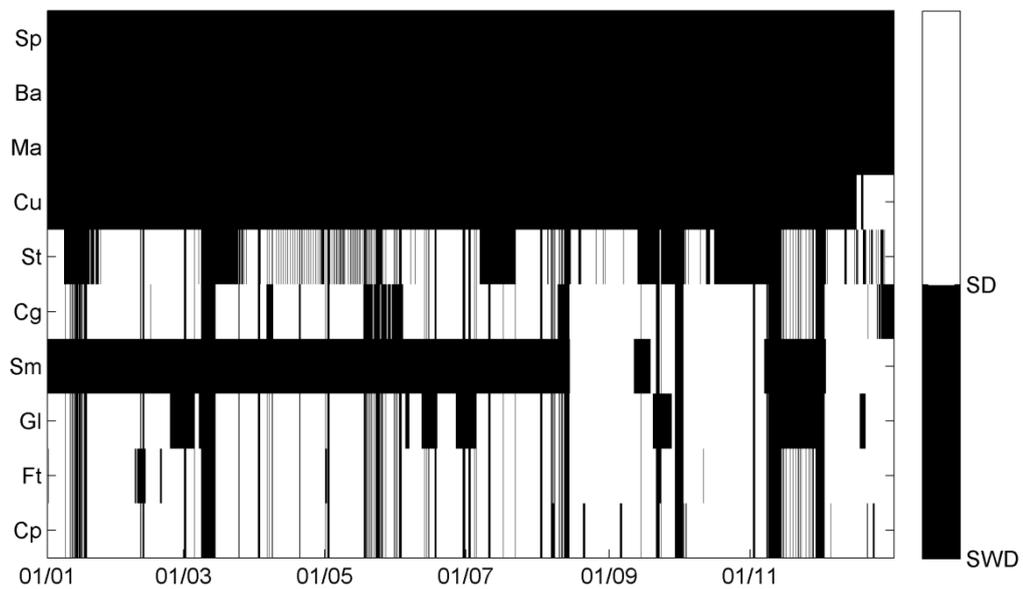
Em 2008 a rede esteve numa fase de desenvolvimento e de teste por isso o funcionamento aparece bastante intermitente e as falhas simultâneas de dois sensores tornam a rede cega em várias ocasiões. Neste ano, a rede operava com 5 sensores (Campo Grande, Guadalupe, Fortaleza e Cachoeira Paulista mais um sensor de teste em São Paulo) até a instalação do sensor de São Martinho, no dia 15 de agosto 2008. Depois a rede operava com 6 sensores até a instalação do sensor de Curitiba, no dia 16 de dezembro 2008. Durante o mês de novembro, observa-se uma falha quase simultânea de cerca 25 dias, dos sensores de São Martinho e Guadalupe.

Em 2009 a rede apareceu muito mais estável com 6 até 7 sensores funcionando. Neste contexto, precisa-se de 2 até 3 estações com falha simultânea para tornar a rede

cega. Observa-se no diagrama de 2009 que o sensor de teste parou de funcionar no dia 10 de março, enquanto que o sensor de Manaus inicia o funcionamento no final de maio. Ademais, o sensor de Curitiba foi deslocado para Brasília no dia primeiro de setembro. Observa-se também que o sensor de Guadalupe ficou parado durante dois meses, entre setembro e outubro de 2009.

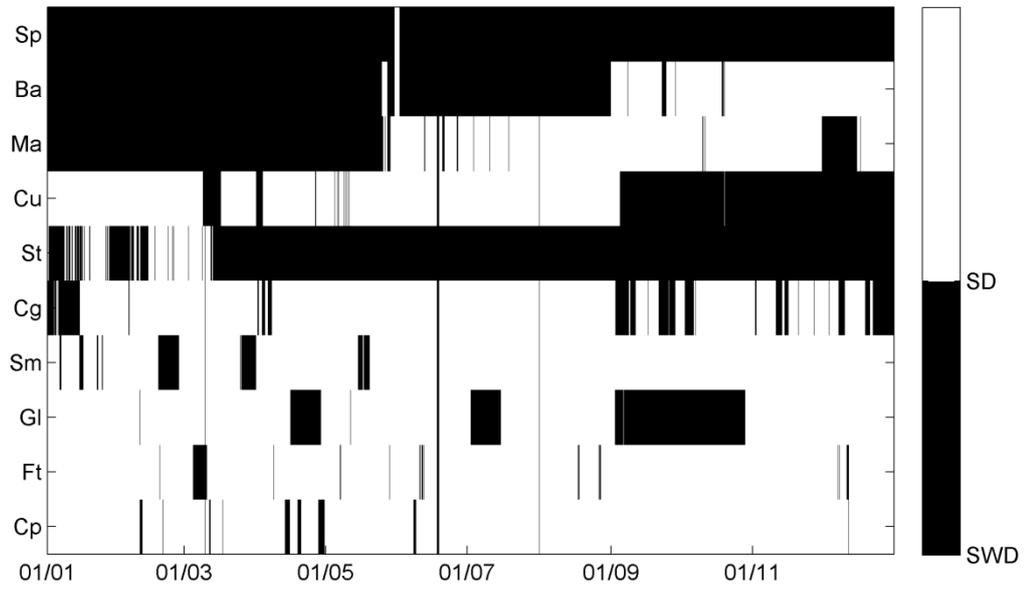
Em 2010 e 2011 a rede apareceu de novo mais instável com um máximo de 7 estações funcionando e muitas falhas alongadas. Mesmo com a entrada de um novo sensor em São Paulo, no início de novembro 2010, a maior parte do tempo, a rede funcionou com menos estações do que o máximo disponível (8 estações). A estação de Brasília apresentou uma falha de longo prazo a partir de abril de 2010 até fevereiro de 2011. A estação de Fortaleza ficou parada ao longo do ano 2011 e Guadalupe, de julho a dezembro de 2010. As estações mais estáveis foram Cachoeira Paulista, São Paulo e Campo Grande. A rede ficou cega durante vários dias consecutivos, especialmente no final de junho de 2010 e durante a metade do mês de julho de 2011.

**Figura 25** - Diagrama de operação de STARNET 2008.



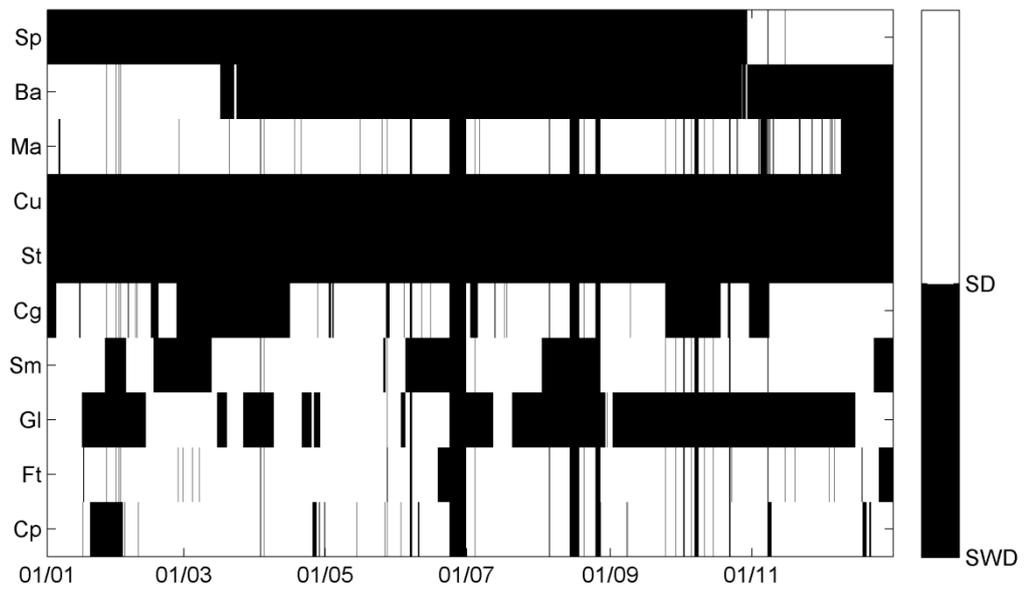
Fonte: do autor

**Figura 26** - Diagrama de operação de STARNET 2009.



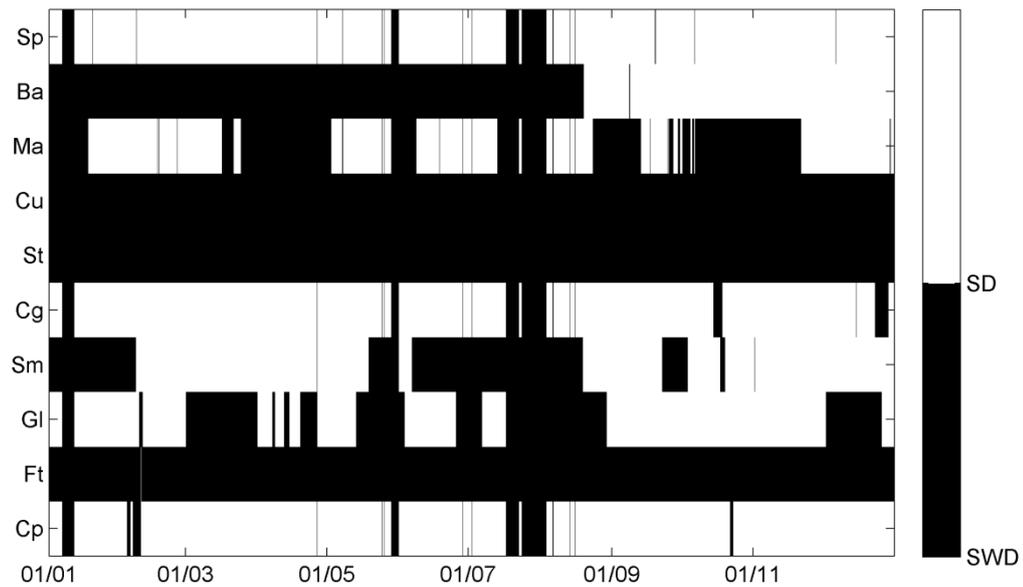
Fonte: do autor

**Figura 27** - Diagrama de operação de STARNET 2010.



Fonte: do autor

**Figura 28** - Diagrama de operação de STARNET 2011.



Fonte: do autor

### 3.2.2 Análise estatística

Realiza-se uma análise estatística dos Diagramas de Operação sobre cada ano. Mesmo se 8 estações podem ser disponíveis para detectar as descargas atmosféricas, o software de localização utiliza apenas 7 sensores (selecionados através das melhores ATDs). A Tabela 6 apresenta a percentagem do tempo de funcionamento da rede, para cada número de estações ativas (no mínimo 4 e no máximo 8), para cada ano. Observa-se nos resultados estatísticos que na maioria do tempo, a rede estava operando com 6 ou menos sensores ativos (acumulando um total de 99% do tempo em 2008, 96,6% do tempo em 2010 e 92,3% do tempo em 2011). Contudo, em 2009 a rede operou durante 33% do tempo com 7 estações ativas.

**Tabela 6** - Percentagem do tempo de funcionamento da rede para cada número de estações ativas.

	Número de estações ativas				
	4	5	6	7	8
<b>2008</b>	35,3	45,0	18,7	1,0	0
<b>2009</b>	2,6	21,5	41,3	33,1	1,5
<b>2010</b>	25,4	40,3	30,9	3,4	0
<b>2011</b>	25,5	33,2	34,6	6,7	0,006

Fonte: do autor

Em seguida, as Tabela 7 e Tabela 8 apresentam a percentagem de Sferics detectados para cada número de estações ativas e cada número de estações participando

no cálculo de localização, para cada ano. Os resultados mostram que a maior parte das *Sferics* foi detectada por apenas 4 estações (o mínimo necessário) mesmo que 6 ou 7 estações estivessem disponíveis. Por exemplo, em 2010, a rede estava operando cerca de 40% do tempo com 5 estações ativas, contudo, cerca de 74% destas *Sferics* foram medidas por apenas 4 estações. Em 2011, a rede estava operando cerca de 33% do tempo com 6 estações ativas, contudo, cerca de 52% destas *Sferics* foram medidas por apenas 4 estações.

**Tabela 7** - Percentagem de raios detectados para cada número de estações ativas e cada número de estações participando no cálculo de localização (2008-2009).

Número de estações ativas	Número de estações participando na localização							
	2008				2009			
	4	5	6	7	4	5	6	7
4	100	-	-	-	100	-	-	-
5	75,5	24,5	-	-	74,5	28,5	-	-
6	64,7	29,3	6,0	-	52,3	36,3	11,4	-
7	50,4	35,8	12,2	1,6	21,3	41,5	25,1	12,1

Fonte: do autor

**Tabela 8** - Percentagem de raios detectados para cada número de estações ativas e cada número de estações participando no cálculo de localização (2010-2011).

Número de estações ativas	Número de estações participando na localização							
	2010				2011			
	4	5	6	7	4	5	6	7
4	100	-	-	-	100	-	-	-
5	73,9	26,1	-	-	65,7	34,3	-	-
6	51,2	38,1	10,7	-	51,7	36,0	12,3	-
7	36,9	36,5	20,8	5,8	46,6	32,0	16,7	4,7

Fonte: do autor

### 3.3 Simulação da cobertura da rede STARNET

A Cobertura da rede define-se como a área total onde a rede é capaz de localizar descargas atmosféricas. A Cobertura da rede pode ser quantificada em termos do número de sensores que detectam raios numa zona geográfica.

A cobertura da rede STARNET foi simulada, para várias etapas de seu desenvolvimento, a partir de um algoritmo baseado num modelo de distribuição

geográfica do desempenho do sistema seguindo a metodologia desenvolvida por Souza et al. (2008) e usada previamente para simular a cobertura da rede RDR-SIPAM na Amazônia oriental. Os resultados dessa simulação permitem seguir a evolução da cobertura da rede em função da instalação de novos sensores. O modelo permite também analisar o comportamento da rede e a otimização da instalação de novos sensores como para o planejamento do sensor em Belém, instalado em Agosto de 2012.

### 3.3.1 Descrição do modelo

Os receptores rádios da STARNET são equipados de antenas quadráticas verticais similares a monopolos. Na teoria, o padrão de radiação é omnidirecional: o sinal é recebido em todas as direções com uma potencia igual e com uma diminuição para os ângulos mais altos e baixos (chamado cone cego da antena) (STUTZMAN et al., 1998). Assim a Figura 30 apresenta o perfil de ganho teórico da antena em função da distância com um cone estreito e um decaimento a partir de 5000 km. Este perfil, apresentado na Figura 29, é descrito por duas funções de distribuição acumulada normal:

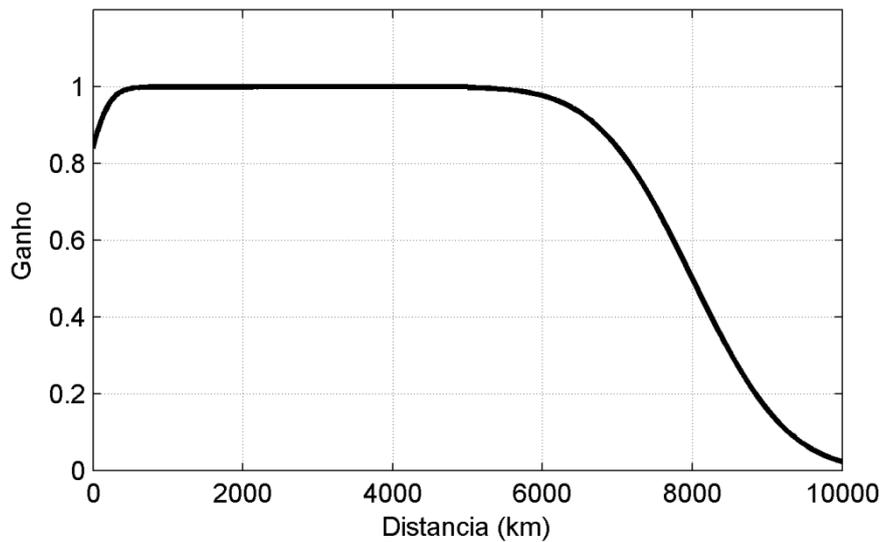
$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt - 300 \quad (6)$$

Onde  $\sigma=300$   $\mu=1$  entre para as distâncias entre 0 e 5.000 km;

$$1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt + 5000 \quad (7)$$

Onde  $\sigma=1000$   $\mu=3000$  para as distâncias entre 5.000 e 10.000 km.

**Figura 29** - Perfil de ganho teórico da antena em função da distância.



Fonte: do autor

A cobertura da rede foi calculada como a soma dos ganhos teóricos de cada antena em cada pixel de uma grade quadrática limitada entre  $-60^{\circ}\text{S}$  e  $40^{\circ}\text{N}$  em latitude,  $-100^{\circ}\text{W}$  e  $0^{\circ}\text{W}$  em longitude, com uma resolução de  $0,2 \times 0,2$  graus ( $22,24 \times 22,24$  km). Se a soma dos ganhos calculada for inferior estritamente a 4 sensores, a cobertura da rede é nula. A escala de cor dos gráficos relaciona-se ao número de sensores que detectam descargas atmosféricas numa zona geográfica dada. Essa simulação supõe que cada sensor da rede tem o mesmo padrão de detecção.

### 3.3.2 Resultados da simulação

A simulação da cobertura foi calculada para as várias configurações da rede com:

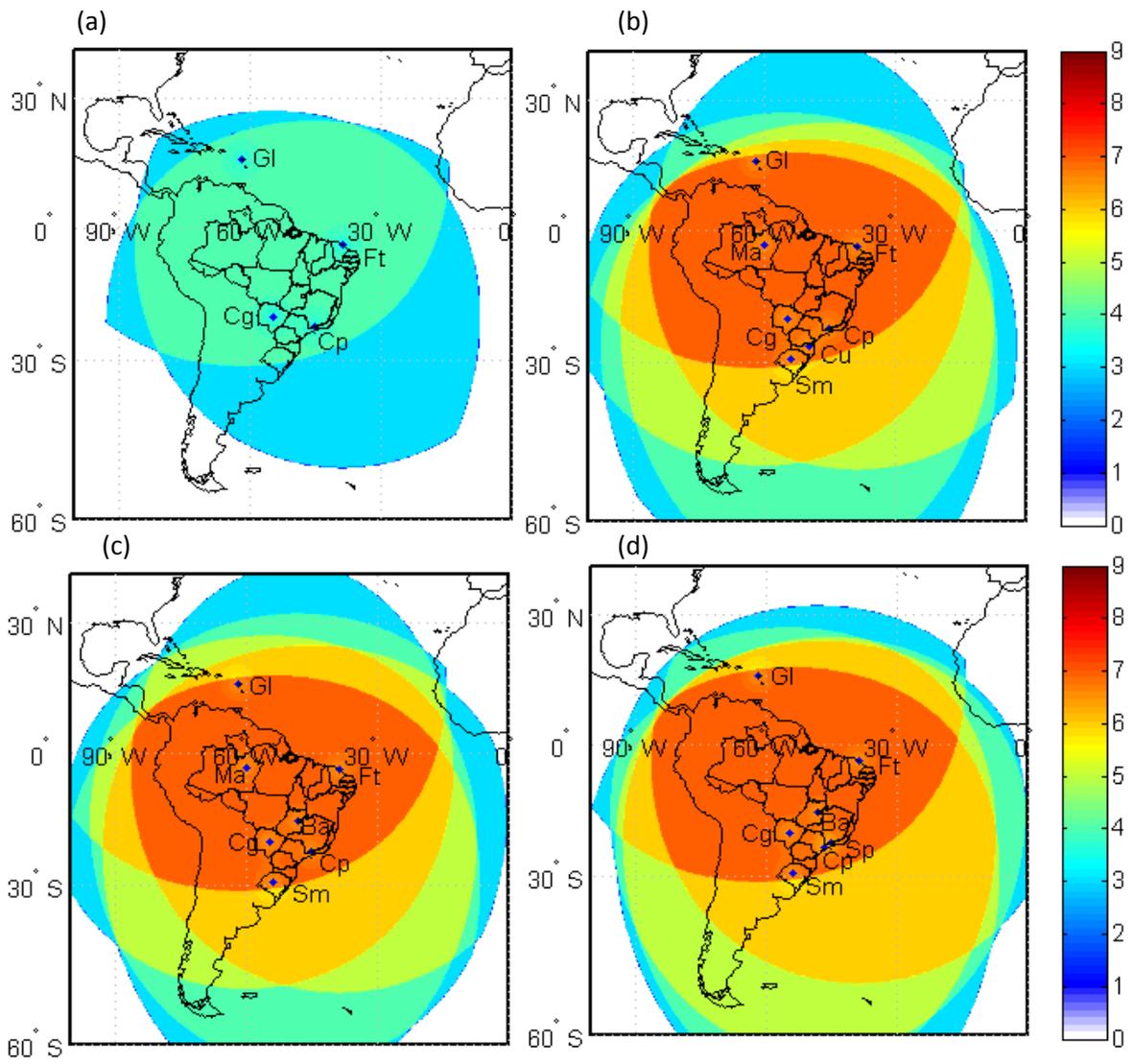
1. Cobertura no dia 7 de julho de 2008 com 4 sensores ativos: Campo Grande, Guadalupe, Fortaleza, e Cachoeira Paulista (Figura 30 - a);
2. Cobertura no dia 1 de agosto de 2009 com 7 sensores: Manaus, Curitiba, Campo Grande, São Martinho da Serra, Guadalupe, Fortaleza, e Cachoeira Paulista (Figura 30 - b);
3. Cobertura no dia 1 de novembro de 2009 com 7 sensores: Brasília, Manaus, Campo Grande, São Martinho da Serra, Guadalupe, Fortaleza, e Cachoeira Paulista (Figura 30 - c);

4. Cobertura no dia 12 de novembro de 2010 com 6 sensores: São Paulo, Brasília, Campo Grande, São Martinho da Serra, Guadalupe, e Cachoeira Paulista (Figura 30 - d);
5. Cobertura teórica com um máximo de sensores disponíveis em 2011, 8 sensores: São Paulo, Brasília, Manaus, Campo Grande, São Martinho da Serra, Guadalupe, fortaleza, Cachoeira Paulista (Figura 31 - a); Esses 8 sensores são normalmente disponíveis desde novembro de 2010;
6. Cobertura com um máximo de sensores disponíveis em 2012, 9 sensores: São Paulo, Brasília, Manaus, Campo Grande, São Martinho da Serra, Guadalupe, fortaleza, Cachoeira Paulista, e Belém (Figura 31 - b); Esses 8 sensores são normalmente disponíveis desde agosto de 2012;

Os resultados mostram primeiro que, qualquer que seja o número de sensores em operação, a região da Amazônia fica sempre na zona de cobertura máxima. Essa zona se estende sobre todo o norte e o centro da América do Sul. Qualquer que seja o número de sensores, a rede STARNET tem uma cobertura global e uniforme devido à distribuição dos sensores (localização e espaçamento). A distância máxima entre dois sensores da rede é de 5.140 km correspondendo a distancia entre os sensores de Guadalupe e São Martino.

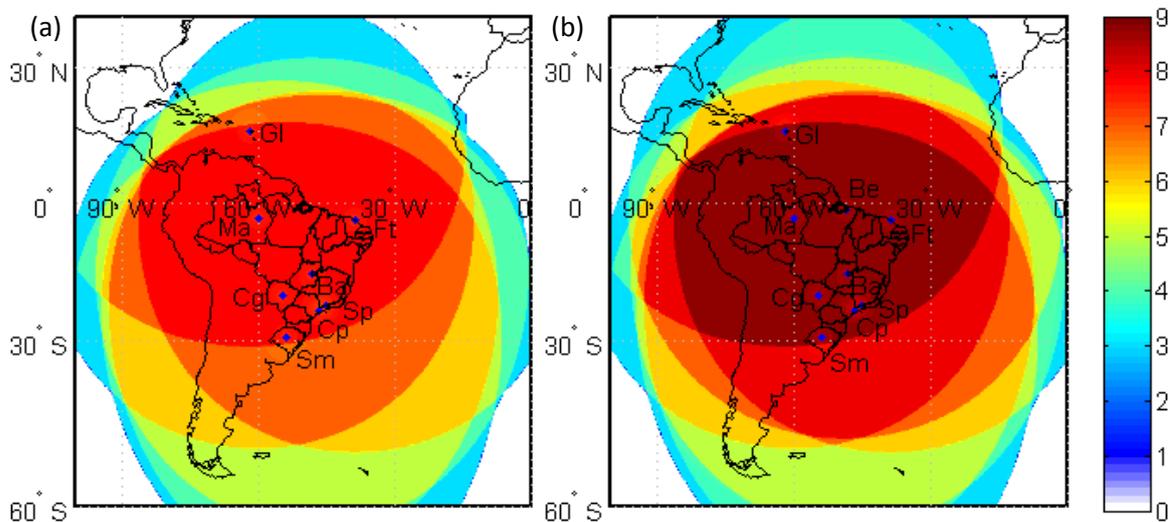
Depois, os resultados mostram que a cobertura das 3 configurações da redes, operando com 6 sensores ativos, têm quase o mesmo padrão: o deslocamento do sensor de Curitiba para Brasília (Figura 30b e Figura 30c), assim como o funcionamento do sensor de São Paulo em vez do sensor de Manaus (Figura 30c e Figura 30d) quase não mudam a cobertura da rede. Se todos os sensores têm o mesmo padrão de detecção, qualquer localização de um sensor no Brasil tem a mesma contribuição na rede. Assim dois sensores podem ser localizados muito próximos como os sensores de São Paulo e Cachoeira Paulista (a distancia entre os dois sensores é cerca de 200 km) sem impacto na cobertura global da rede. Da mesma maneira, o padrão da cobertura com um máximo de 8 sensores disponíveis desde novembro 2010 (Figura 31a) é similar ao padrão da cobertura com um máximo de 9 sensores disponíveis desde agosto de 2012 (Figura 31 - b), o aumento do número de sensores só aumenta a escala do número de sensores no mapa da cobertura.

**Figura 30** - Cobertura da rede STARNET: (a) dia 7 de julho de 2008; (b) 1 de agosto de 2009; (c) dia 1 de novembro de 2009; (d) dia 12 de novembro de 2010.



Fonte: do autor

**Figura 31** - Cobertura da rede STARNET: (a) máxima em 2010; (b) máximo em 2012.



Fonte: do autor

### **3.4 Avaliação do desempenho da rede STARNET em relação à rede RDR-SIPAM**

Neste trabalho se avalia o desempenho da rede STARNET em comparação a RDR-SIPAM. A rede RDR-SIPAM serve de referência na detecção de raios de tipo NS devido a sua alta eficiência de detecção e seu baixo Erro de Localização.

#### **3.4.1 Contribuição**

O objetivo deste estudo é a avaliação do desempenho da rede STARNET de tipo VLF em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF na Amazônia oriental, numa zona de referência com eficiência de detecção uniforme e alta. A RDR-SIPAM está equipada de forma semelhante à rede NLDN nos EUA, que foi já usada como referência em diversos estudos de avaliação de rede VLF. Este sistema foi usado como referência, porque a identificação dos raios coincidentes de tipo NS permite a discriminação dos parâmetros de desempenho como a Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente. De um lado, a RDR-SIPAM é até agora o único sistema de detecção de alta resolução, que cobre parcialmente a Amazônia oriental. Por outro lado, o STARNET é atualmente o único sistema de detecção de raios gratuito e contínuo cobrindo toda a Região Amazônica. O presente estudo contribui para referenciar os dados da rede STARNET a fim de validar as aplicações estatísticas resultantes.

Os estudos anteriores de avaliação da rede STARNET, realizadas por Naccarato e Pinto Jr (2009) e Morales et al. (2011), não discriminam a Eficiência de Detecção em função do pico de corrente. O estudo de avaliação do desempenho da rede STARNET de Naccarato e Pinto Jr (2009) usou apenas eventos de raios do mês de janeiro de 2008, quando a STARNET estava operando com apenas quatro estações em serviços intermitentes (a rede era cega em torno de 18% do tempo neste mês). O estudo de Morales et al. (2011) está limitado ao Sudeste brasileiro, usando apenas as medidas da RINDAT, devida à falha da RDR-SIPAM a partir de maio de 2009. Além disso, Naccarato e Pinto Jr (2009) restringiu a área do estudo na região entre 0 ° N e 30 ° S em latitude e 40 ° W a 60 ° W em longitude. Entretanto, a eficiência de detecção do BrasilDAT entre 0 ° N e 10 ° S de latitude e 40 ° W a 60 ° W de longitude (correspondente ao RDR-SIPAM) apresentou algumas fortes variações de 0% até 80% de acordo com um outro estudo de Naccarato e Pinto Jr (2009). Além disso, Naccarato e Pinto Jr (2009) utilizou um intervalo de tempo de 1 segundo para a busca dos raios coincidentes, sendo este critério muito elevado considerando a precisão da medição do tempo com GPS usado pelas duas redes (1  $\mu$ s). Este critério temporal aumenta o número de raios coincidentes errados entre as duas redes nas áreas onde a Eficiência de Detecção da RDR-SIPAM foi baixa.

### **3.4.2 Método e critérios usados**

Primeiro existem algumas similaridades no funcionamento das duas redes. A rede a ser avaliada (STARNET) e a rede de referencia (RDR-SIPAM) são focalizadas na detecção de descargas do tipo NS. As duas redes usam também um sistema GPS para determinar o tempo de ocorrência das descargas com uma precisão de 1  $\mu$ s e uma metodologia similar de localização das descargas. No caso da rede RDR-SIPAM a fonte do sinal é localizada pela intersecção das hipérbolas que resultam da diferença de tempo de chegada do sinal em pares de estações. Esse método é chamado de TOA por LEWIS et al. (1960). No caso de rede de tipo LF/VLF o tempo de propagação da onda eletromagnética entre duas estações é inferior ao tempo médio entre duas Descargas de Retorno (de 10 até 100 ms). No caso da rede STARNET, a técnica de localização é similar exceto que as estações são separadas por milhares de quilômetros. Portanto, as ATDs são calculadas a partir da correlação temporal cruzada entre as diferentes formas

de onda medidas por cada sensor. Uma comparação das características das duas redes é apresentada Tabela 9.

**Tabela 9** - Comparação das características das redes RDR-SIPAM e STARNET.

	<b>RDR-SIPAM</b>	<b>STARNET</b>
<b>Tipo de sistema</b>	Rede LF/VLF	Rede VLF
<b>Tipo de sensor</b>	LPATS-IV, Vaisala Inc.	Resolution Display Inc.
<b>Faixa de frequência</b>	1-350 kHz	7-15 kHz
<b>Alcance</b>	400 km	5000 km
<b>Número de sensores</b>	12	7
<b>Cobertura</b>	Amazônia oriental	América do Sul
<b>Central de processamento</b>	Belém, PA	São Paulo, SP
<b>Período de operação</b>	05/2004-05/2009	01/2008 até hoje
<b>Tipo de raios</b>	Focalizado NS e discriminação NS/IN	Focalizado NS sem discriminação NS/IN
<b>Tipo de dados</b>	Data e hora (UTC), latitude e longitude, tipo de raio, pico de amplitude, polaridade	Data e hora (UTC), latitude e longitude
<b>Eficiência de detecção</b>	35-70%	< 25%
<b>Erro de localização</b>	< 1 km	10-20 km
<b>Diferença Temporal</b>	1 $\mu$ s	1 $\mu$ s
<b>Problema principal</b>	Homogeneidade geográfica da eficiência Cobertura pequena Período de operação curto Status de operação dos sensores não disponível	Intermitência de funcionamento Baixo DE e alto LA Estimação da polaridade e pico de corrente impossível
<b>Qualidade Principal</b>	Alta DE e baixo LA Dados de polaridade e pico de corrente	Homogeneidade geográfica da eficiência Status de operação dos sensores Diagrama de operação disponível

Fonte: do autor

A metodologia do trabalho é baseada na identificação dos raios NS coincidentes entre as bases de dados das duas redes. Foram excluídos do conjunto de dados da RDR-SIPAM, todos os raios classificados como IN porque os valores associados de pico de corrente não são relevantes. O método de estimação do pico de corrente se relaciona unicamente aos raios de tipo NS cujo campo elétrico é orientado verticalmente. Os raios

de tipo IN têm uma orientação qualquer, inclusive horizontal. Então, o valor do pico de corrente estimado no caso dos raios de tipo IN não são relevantes porque a medição do campo elétrico vertical não é proporcional à amplitude da onda eletromagnética emitida.

Para cada descarga registrada pela rede RDR-SIPAM, o modelo procura a diferença mínima de tempo com as descargas registradas pela STARNET dentro de uma janela de 1 ms e uma faixa de distância máxima de 50 km. O tamanho específico da janela temporal e da faixa de distancia depende das características dos dados. Na literatura os valores usadas por este tipo de redes são entre 0,5 e 25 ms para a janela temporal e entre 15 e 100 km para a faixa de distância (ABARCA et al., 2010). Contudo a RDR-SIPAM pode servir de referencia para os raios de tipo NS somente na área onde a sua Eficiência de Detecção é alta e uniforme.

Depois, o desempenho da rede STARNET em relação à RDR-SIPAM foi avaliado pelos parâmetros seguintes:

- 1) A Diferença Temporal, definido como a diferença de tempo em milissegundo entre as duas descargas coincidentes;
- 2) O erro de localização, definido como a distância entre a localização das duas descargas coincidentes;
- 3) O pico de corrente da descarga coincidente correspondente àquela registrada pela RDR-SIPAM;
- 4) A Eficiência de Detecção Relativa, definida como a porcentagem de descargas coincidentes relativa ao número de raios NS detectado pela RDR-SIPAM em função do pico de corrente.

#### 3.4.2.1 Escala de tempo da comparação

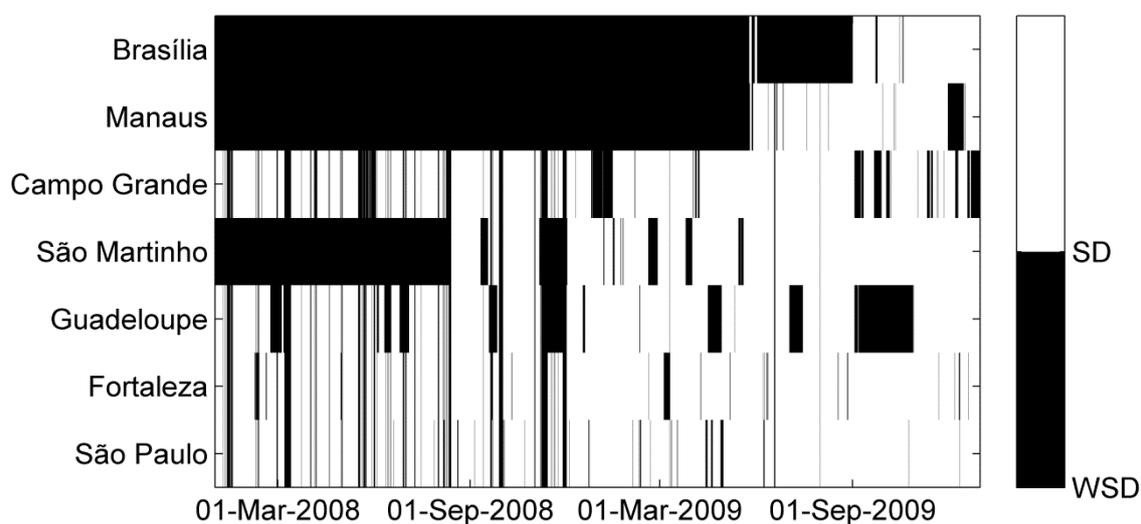
O período de funcionamento comum das duas redes é curto: entre janeiro de 2008 e maio de 2009. Nessa época a STARNET estava em fase de desenvolvimento e o funcionamento dos sensores era muito intermitente. Por isso, os dias de comparação foram escolhidos de acordo com os Diagramas de Operação da STARNET descritos no Capítulo 3. O sensor de teste instalado em São Paulo foi excluído deste estudo por causa

de disfunção no período estudado. Um Diagrama de Operação, restrito ao período de funcionamento comum das duas redes, é apresentado na Figura 32.

Observa-se no diagrama da Figura 32 que a rede STARNET ficou operando com somente 4 sensores até o mês de agosto de 2008, correspondendo à instalação de um novo sensor em São Martinho (Brasil). Os sensores de Brasília e Manaus foram instalados somente em julho de 2009 após a falha permanente da RDR-SIPAM. Apesar das novas instalações, o funcionamento dos sensores da rede STARNET ficou muito intermitente ao longo do tempo. Contudo, durante os meses de agosto, setembro, outubro e dezembro, se podem identificar períodos onde a rede ficou estável com 5 sensores operando.

Como o funcionamento da RDR-SIPAM começou a decair em abril de 2009, a escala de tempo de comparação foi reduzida para os melhores períodos simultaneamente estáveis, com cinco sensores da STARNET em operação: de 14/08/2008 até 09/09/2008; de 07/10/2008 até 31/10/2008; de 03/12/2008 até 06/12/2008; de 17/01/2009 até o 17/02/2009; e de 13/03/2009 até o 25/03/2009. Estes cinco períodos representam cerca de 110 dias completos de coleta de dados de descargas atmosféricas comuns aos dois sistemas estudados.

**Figura 32** - Diagrama de Operação da rede STARNET de 01/03/2008 até 31/06/2009.

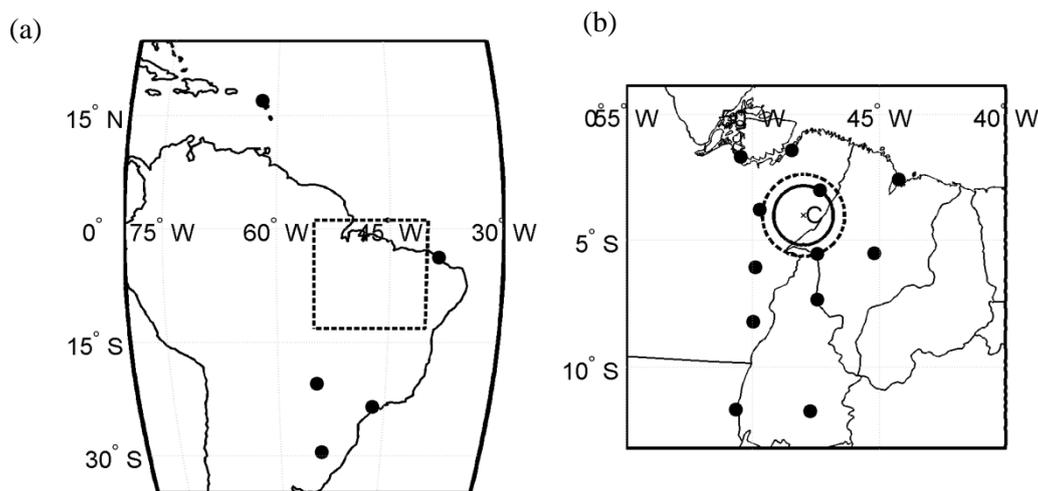


Fonte: do autor

### 3.4.2.2 Escala espacial da comparação

Uma simulação realizada por Souza et al. (2008) mostrou que a cobertura da RDR-SIPAM não é homogênea devido à localização dos sensores que apresenta uma distribuição longitudinal orientada norte-sul. O estudo identificou o centro geográfico da melhor eficiência da rede no ponto  $-4^{\circ}\text{S}$ ,  $-48^{\circ}\text{W}$ . Por isso o conjunto de dados da RDR-SIPAM foi limitado a uma área geográfica definida por um círculo de 130 km de raio em torno deste centro, chamado C na Figura 33. Nesta área a Eficiência de Detecção da RDR-SIPAM fica quase estável entre 80 e 85% de acordo com Naccarato e Pinto Jr (2009). Posteriormente, devido aos critérios de pesquisa espacial (50 km em torno do evento flash), o raio coincidente, na base de dados da STARNET, foi procurado dentro de um círculo de raio de 180 km centrado em C.

**Figura 33** - Escala espacial da comparação: (a) localização dos sensores da rede STARNET com o quadro de zoom; (b) localização dos sensores da RDR-SIPAM.



Fonte: do autor

### 3.4.3 Resultados

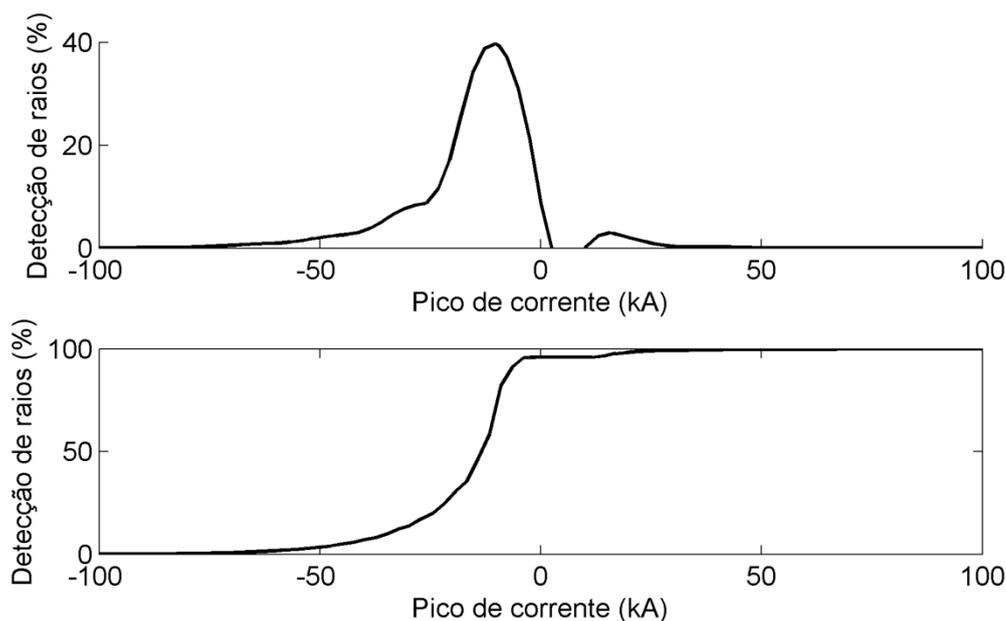
Essa parte apresenta os resultados da avaliação do desempenho da rede STARNET em relação à rede RDR-SIPAM. Os resultados dividem-se em duas partes: uma análise das coleções de dados das redes STARNET e RDR-SIPAM usadas com uma comparação espaço-temporal dos eventos de raios registrados pelas duas redes; e análise das descargas coincidentes com o cálculo da Diferença Temporal, Erro de Localização, Picos de corrente e Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente da rede STARNET.

### 3.4.3.1 Análise da coleção de dados

O número de descargas coletado pela STARNET (74.658) foi cerca de 0,94 vezes o número de descargas NS coletado pela RDR-SIPAM sem outra discriminação (70.087), para o mesmo período e mesma área (um círculo de 130 km de raios centrado no ponto geográfico de melhor eficiência de detecção da RDR-SIPAM). Como a rede ZEUS, a STARNET é mais sensível a descargas NS mas essas descargas não podem ser diretamente discriminadas pelo sistema (CHRONIS et al., 2006). Então, o número de eventos de raios em ambos os conjuntos de dados (STARNET e RDR-SIPAM) foi muito semelhante, porque de um lado a rede do SIPAM-LDN tinha uma melhor Eficiência de Detecção (detectando mais raios NS com pico de corrente fracos), e, por outro lado, o conjunto de dados STARNET inclui um parte de raios IN cuja forma da onda e amplitude é similar a um NS.

A RDR-SIPAM classificou cerca de 64% do conjunto de descargas NS detectadas como negativas e 36% como positivas. Contudo durante a avaliação do desempenho da NLDN, Cummins e Murphy (2009) achou que a maioria (~90%) das pequenas descargas (<10 kA) classificadas como NS foram finalmente descargas de tipo IN. A partir dessa observação esse estudo sugere que todos os raios NS positivos com correntes de pico menores que 15 kA sejam classificadas como IN. Aplicando este critério ao conjunto de dados da RDR-SIPAM, o número de raios NS detectados pela RDR-SIPAM foi reduzido a 46.860. Esse número de raios NS divide-se depois em uma taxa de 96% de raios NS negativos e até 4% de raios NS positivos. A Figura 34 apresenta as funções de distribuição e acumulação de pico de corrente do conjunto de dados da RDR-SIPAM. Os resultados estatísticos mostram que cerca de 25% dos raios NS detectados tem um pico de corrente <-20 kA, e 71% estão na faixa entre -20 e 0 kA. Assim, os valores de pico de corrente das descargas NS negativas apresentam uma mediana global em torno de -12 kA e uma média global em torno de -17 kA. Além disso, neste conjunto de dados, o valor mais alto de pico de corrente registrado alcança 147 kA para os NS negativos e 111 KA para os NS positivos.

**Figura 34** - Funções de distribuição (a) e acumulação (b) de pico de corrente do conjunto de dados da RDR-SIPAM.

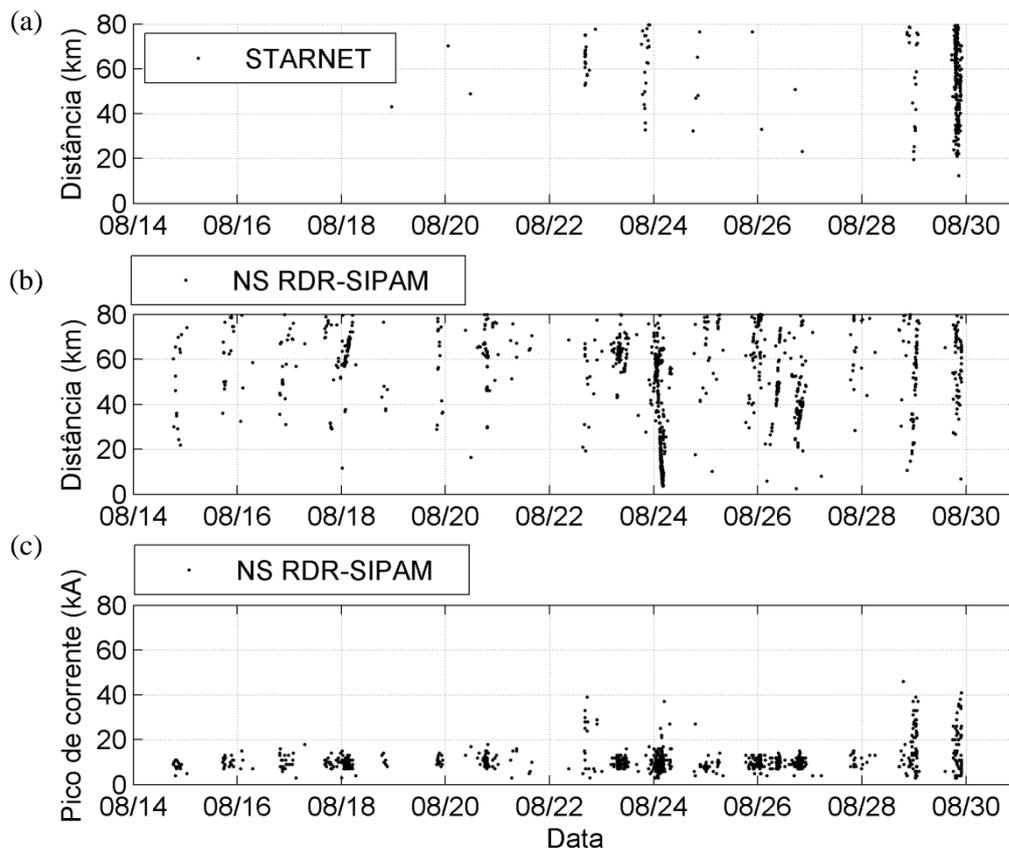


Fonte: do autor

Depois os eventos de raios registrados pelas duas redes são comparados de maneira gráfica na escala espaço-temporal. No objetivo de realizar uma comparação espaço-temporal dos dados de descargas atmosféricas detectadas pelas duas redes, as distâncias, entre as descargas e o ponto central da área do estudo, são apresentadas em função do tempo de ocorrência da descarga (em UTC). O período observado na Figura 35 estende-se sobre 17 dias (de 14/08/2008 até 31/08/2008). Subsequentemente, estes dois gráficos foram comparados com os valores correspondentes de pico de corrente estimados pela RDR-SIPAM.

Observa-se primeiro uma boa coerência entre os eventos de raios registrados pelas duas redes, especialmente durante os eventos mais intensos e com os picos de correntes mais fortes ( $> 20$  kA), correspondente aos dias 29 e 31 do mês de agosto. Observa-se também, que os eventos são agrupados cada dia por faixas horárias, correspondentes ao padrão de distribuição diária média na região calculada por Almeida et al. (2012). Esse estudo identificou um pico de atividade de raios entre 14:00 e 22:00 UTC. Além disso, os eventos mais fracos, entre os dias 14 e 22 de Agosto, e com correntes de pico  $< 20$  kA, foram muito poucos ou não detectados pela rede STARNET.

**Figura 35** - Comparação espaço-temporal sobre o período 14-31/08/2008: (a) STARNET; (b) NS RDR-SIPAM; (c) corrente de pico dos NS da RDR-SIPAM.



Fonte: do autor

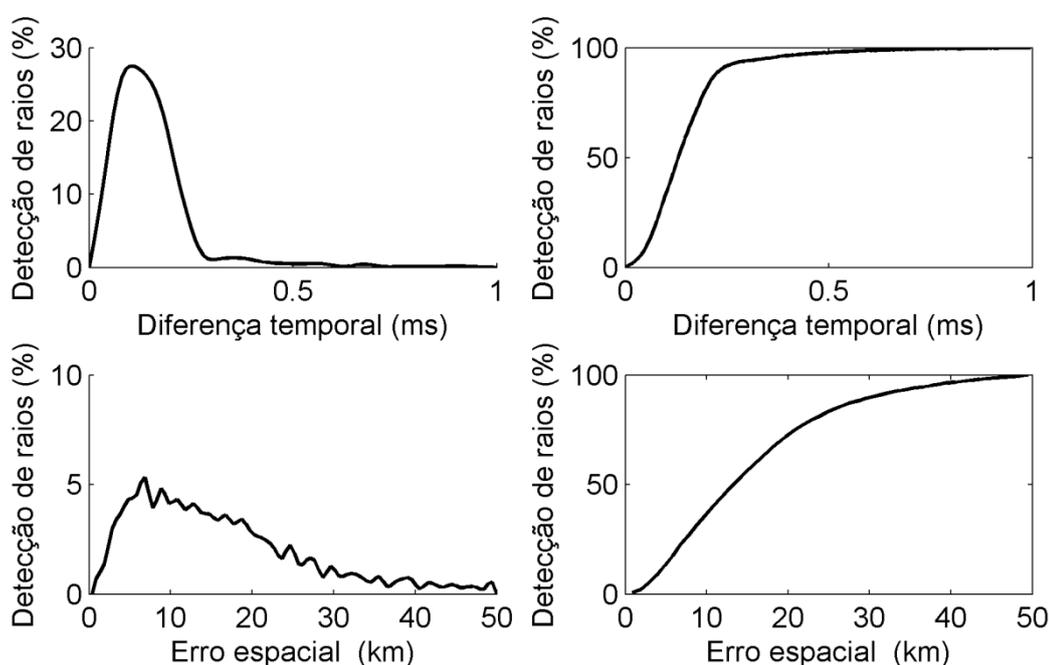
#### 3.4.3.2 Análise das descargas coincidentes

O número total de **raios coincidentes** identificados pelo modelo entre os dois conjuntos de dados (5.780) representa cerca de 6,1% do conjunto da STARNET e 9,7% do conjunto de raios NS da RDR-SIPAM. Este valor (9,7%) é associado à Eficiência de Detecção Relativa global da rede STARNET. Em comparação Naccarato e Pinto Jr (2009) achou um valor de 4,6% para a rede STARNET, operando apenas com 4 estações, em relação a BrasilDAT e usando um critério temporal de 1 ms e um critério espacial de 1 grau (~112 km). Além disso, a maior parte das descargas atmosféricas não identificadas pelo modelo corresponde provavelmente aos raios IN registrados pela rede STARNET e não discriminados pelo sistema ou descargas subsequentes. Outras descargas não identificadas vêm provavelmente da falha de reconhecimento da forma de onda de *Sferics* pelos sensores da STARNET, devido à dispersão da forma de onda durante a propagação e reflexões na Zona de Ressonância de Schumann.

### 3.4.3.2.1 Diferença Temporal e Erro Espacial

Além disso, as funções de distribuição e de acumulação da Diferença Temporal e Erro Espacial dos raios coincidentes são apresentadas na Figura 36. A função de distribuição do **Erro Temporal** dos raios coincidentes entre os dois sistemas de detecção apresenta um máximo cerca de 0,1 ms com uma mediana global de 0,13 ms e uma média global de 0,15 ms (Figura 36). A função de acumulação do Erro Temporal cresce de maneira logarítmica. Pode ser observado nesta curva que cerca de 32% dos raios coincidentes tem uma Diferença Temporal menor que 100  $\mu$ s e cerca de 94% dos raios coincidentes tem uma Diferença Temporal que 300  $\mu$ s. Esses resultados mostram uma boa confiabilidade do método de identificação dos raios coincidentes. A função de distribuição do **Erro de Localização** dos raios coincidentes entre os dois sistemas de detecção apresenta um pico em torno de 7 km com uma mediana global de 14 km e uma média global de 16 km (Figura 36). Observa-se na função de acumulação que cerca de 89% dos raios coincidentes tem um Erro Espacial <30 km.

**Figura 36** - Função de distribuição (a) e acumulação (b) da Diferença Temporal e erro espacial dos raios coincidentes.



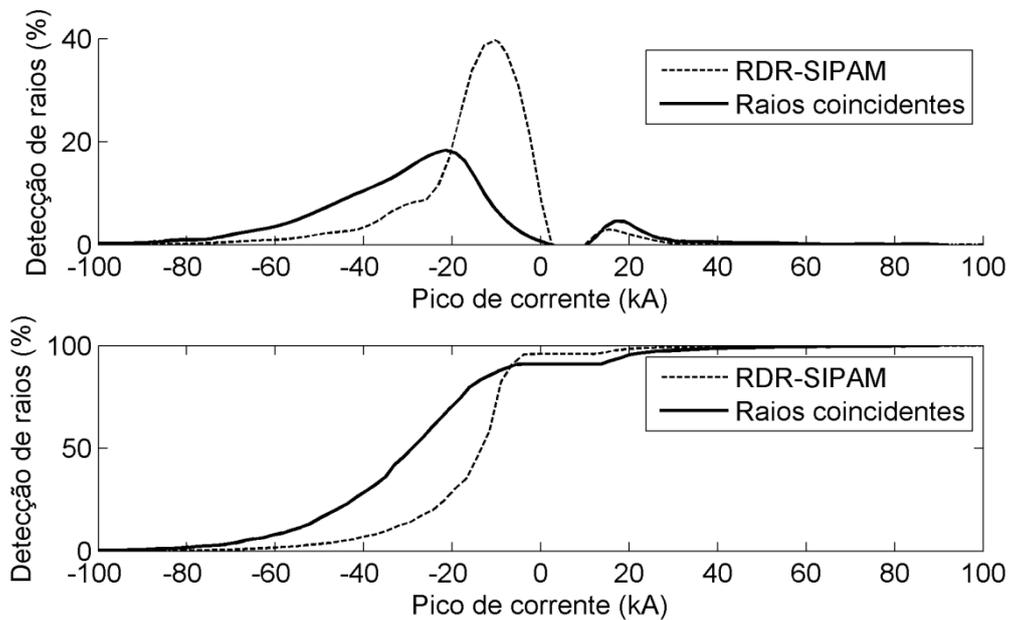
Fonte: do autor

#### 3.4.3.2.2 Pico de corrente

As funções de distribuição e acumulação do **pico de corrente** dos raios coincidentes foram comparadas àqueles do conjunto de dados da RDR-SIPAM na Figura 37. Os resultados mostram que:

- 1) Os raios coincidentes negativos com um pico de corrente alto ( $<-20$  kA) foram melhor identificados que os fracos ( $>-20$  kA);
- 2) Os raios coincidentes negativos com um pico de corrente alto ( $<-20$  kA) representam cerca de 68% dos raios coincidentes identificados, enquanto que no conjunto de dados da RDR-SIPAM este tipo de raios representa somente 25% dos raios NS;
- 3) Os raios coincidentes negativos com um pico de corrente fraco ( $>-20$  kA) representam somente 23% dos raios coincidentes identificados, enquanto que no conjunto de dados da RDR-SIPAM este tipo de raios representa cerca de 71% dos eventos de raios do tipo NS;
- 4) A média global de pico de corrente dos raios negativos foi de cerca de -33 kA para os raios coincidentes, em contraste a -17 kA no o conjunto de dados da RDR-SIPAM;
- 5) Os raios coincidentes positivos com um pico de corrente alto ( $>20$  kA) representam cerca 5% dos raios coincidentes identificados, enquanto que no conjunto de dados da RDR-SIPAM este tipo de raios representa somente 1,7% dos eventos de raios tipo NS;
- 6) Os raios coincidentes positivos com um pico de corrente fraco ( $<20$  kA) representam cerca 4% dos raios coincidentes identificados, enquanto que no conjunto de dados da RDR-SIPAM este tipo de raios representa somente 2,4% dos NS.

**Figura 37** - Função de distribuição (acima) e acumulação (abaixo) de corrente de pico dos raios coincidentes.



Fonte: do autor

#### 3.4.3.2.3 Eficiência de Detecção Relativa

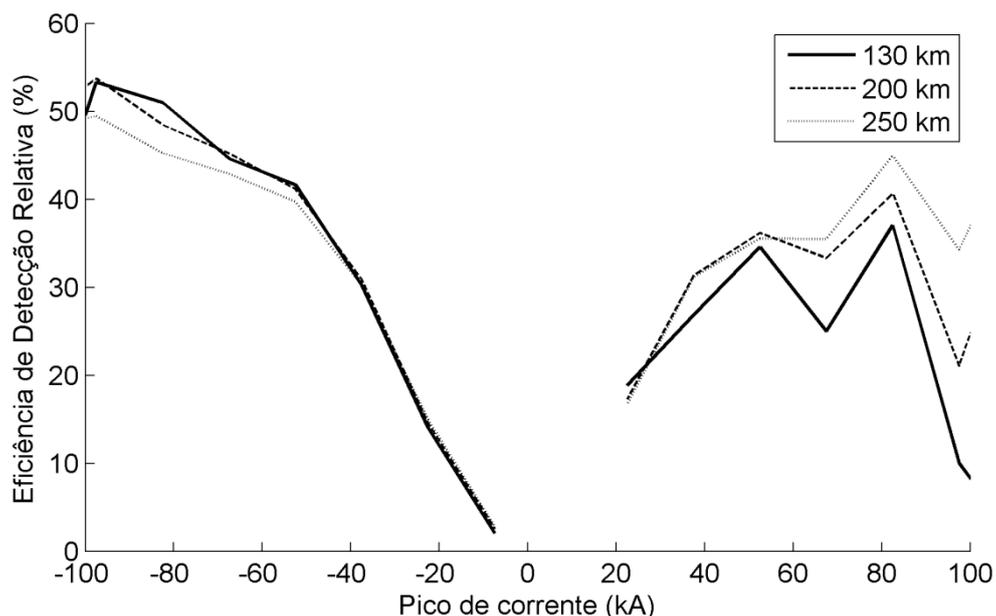
Depois, se calcula a **Eficiência de Detecção Relativa**, ou seja, a porcentagem de raios coincidentes entre a rede STARNET e RDR-SIPAM, em função do corrente de pico dos raios coincidentes. Observa-se, na Figura 38, que a Eficiência de Detecção Relativa dos raios NS diminuiu com o valor do pio de corrente para as duas polaridades. Assim, os raios com pico de corrente alto são mais bem detectados pela STARNET que os raios fracos, como apareceram na comparação espaço-temporal. Observa-se também na Figura 38 que os raios com pico de corrente entre -20 e 20 kA têm a Eficiência de Detecção Relativa <10%, enquanto que este tipo de raios representa cerca 72% do conjunto de dados da RDR-SIPAM. Ademais, têm muito poucos raios NS com pico de corrente <- 40 kA no conjunto de dados da RDR-SIPAM (<6% dos raios NS detectado), mas a Eficiência de Detecção Relativa da STARNET deste tipo de raios é alta, entre 30% e 55%. Uma instabilidade pode ser observada também nos resultados dos raios positivos com alto pico de corrente (>50 kA), devido ao número baixo de raios nessa faixa de pico da corrente observado pela DRD-SIPAM.

Depois, a porcentagem de raios coincidentes em função do pico de corrente também foi calculado, seguindo a mesma metodologia, para outros conjuntos de dados da RDR-SIPAM e da STARNET: selecionando o mesmo período e duas áreas limitados

por círculo de 200 km e 250 km de raio, centrado no ponto geográfico de melhor eficiência da rede RDR-SIPAM. Observa-se, na Figura 38, que os resultados convergem para a mesma solução, mas, mais estáveis, devido ao aumento do tamanho dos conjuntos de dados (ver Tabela 10). Mesmo que a taxa entre os conjuntos de dados das redes RDR-SIPAM e STARNET diminuí, porque a Eficiência de Detecção da RDR-SIPAM diminui afastando-se do ponto geográfico da melhor eficiência da rede, a dependência da Eficiência de Detecção Relativa da STARNET ao pico de correntes é estabilizado. Na verdade, o pico de corrente mínimo detectável pela rede aumenta com o aumento da distância a partir do sensor (SHAO et al., 2006). Assim, a diminuição da Eficiência de Detecção da RDR-SIPAM a 200 ou 250 km do centro, diz respeito apenas aos eventos de descargas atmosféricas fracos, já filtrados pela rede STARNET. Finalmente, a Eficiência de Detecção Relativa da STARNET para os raios NS positivos de alta intensidade tende a aumentar de 10% até 45%, quando o pico de corrente aumenta de 20 até 100 kA.

Em comparação, a mesma metodologia aplicada a outras redes VLF mostrou também uma forte dependência de Eficiência de Detecção com o valor de pico de corrente das descargas. Todos os resultados apresentam um DE baixo para os raios fracos. Contudo, os resultados variam de uma rede a outra. Por exemplo, comparando a WWLLN a NLDN, Abarca et al. (2010) achou valores menores que 4% para os raios entre 0 e -20 kA, enquanto que a Eficiência de Detecção Relativa alcança valores superiores a 10% para os raios com pico de corrente maiores do que 35 kA e valores de EDR maiores que 35% para os raio com corrente de pico de intensidade acima de 130 kA. Da mesma maneira, Said et al. (2011) mostrou que a Eficiência de Detecção Relativa dos raios NS negativos é  $> 80\%$  por os raios  $> 20$  kA, avaliando o desempenho da rede VFL GLD360 em relação a NLDN. Depois a Eficiência de Detecção Relativa diminui de 80% até 0% para os raios negativos quando o valor absoluto da corrente de pico diminui de 20 kA até 0 kA.

**Figura 38** - Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente para três círculos de raio diferente do conjunto de dados da RDR-SIPAM (130 km, 200 km e 250 km).



Fonte: do autor

**Tabela 10** - Comparação do conjunto de dados da STARNET e da RDR-SIPAM para diversas áreas.

Raio do círculo (km)	Número de raios na STARNET	Número de raios NS na SIPAM-LDN (sem os NS positivos <15 kA)	Taxa de raios (SIPAM-LDN/STARNET)
130	74.658	46.860	0,63
200	188.531	104.670	0,56
250	300.757	147.890	0.49

Fonte: do autor

### 3.5 Conclusão

A rede STARNET, único sistema terrestre, gratuito, e contínuo, cobrindo toda a Região Amazônica, foi escolhida para a geração desses produtos climáticos relacionados a ocorrência de descargas atmosféricas. O seu comportamento temporal e espacial foi analisado modelizando os Diagramas Operacionais e simulando a Cobertura Teórica da rede em função da localização das estações ativas.

De um lado, a simulação da cobertura mostrou que a rede STARNET possui uma cobertura global e uniforme sobre toda a região Amazônica devido à distribuição dos sensores. Contudo, essa simulação supõe que cada sensor da rede tem o mesmo padrão de detecção, estável e contínuo no espaço o que precisa ser verificado.

De outro lado, a rede STARNET sofreu desde o início de um funcionamento intermitente e opera geralmente com menos sensores do que o número de sensores disponíveis. De uma hora a outra a rede muda de número de sensores ativos. A rede atravessou também vários períodos de falhas onde nenhuma descarga foi registrada, quando o número de sensores disponíveis é inferior ao mínimo necessário para o método ATD de localização de descargas atmosféricas que seja 4 sensores. Porém, o desempenho de uma rede terrestre de detecção de raios (a cobertura, a Eficiência de Detecção e o Erro de Localização) depende do número e do espaçamento entre as várias estações. Observa-se um impacto do número de sensores ativos na Eficiência de Detecção da rede.

Então, a rede STARNET tem uma cobertura global na Amazônia, mas sua Eficiência de Detecção não é constante devido ao funcionamento intermitente dos sensores. Nesse contexto, o desempenho da rede STARNET precisa ser avaliado na Amazônia em função da configuração dos sensores em operação para uniformizar a base de dados de raios em relação a uma configuração de Referência e realizar cálculos estatísticos dos padrões de descargas atmosféricas confiáveis.

Depois, o desempenho da rede STARNET foi avaliado em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF com o cálculo da Diferença Temporal, Erro de Localização, e Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente.

O desempenho da rede STARNET, operando com cinco estações ativas e cobrindo toda a Região Amazônica foi avaliado em relação à rede RDR-SIPAM, o único sistema de alta resolução cobrindo parcialmente a Amazônia oriental. Os critérios do método usado de inter-comparação de rede (uma janela temporal de 1 ms e uma faixa espacial de 50 km) foram validados através da distribuição de Diferença Temporal e de Localização: 94% dos raios NS coincidentes teve uma Diferença Temporal  $< 300 \mu\text{s}$  e 89% dos raios NS coincidentes teve um Erro Espacial  $< 30 \text{ km}$ .

Além da Eficiência de Detecção global (em torno de 10%) e do Erro de Localização (em torno de 16 km), que usualmente caracterizam o desempenho de um sistema, a dependência entre a Eficiência de Detecção e os valores de pico de correntes deve também ser considerada na análise de dados. Os resultados mostraram uma forte

dependência da eficiência de detecção das descargas atmosféricas do tipo NS da rede STARNET em função do pico de corrente: os raios com pico de corrente entre 0 e 20 kA têm a Eficiência de Detecção Relativa baixa (<10%) e os raios com pico de corrente > 40 kA têm uma Eficiência de Detecção Relativa alta (entre 30% e 55%).

A dependência da Eficiência de Detecção em função do pico de corrente é uma informação relevante para a análise de dados de descargas atmosféricas em regiões tropicais úmidas, como a Amazônia. Os valores dos parâmetros médios resultantes são importantes (entre outros) para a proteção dos sistemas elétricos e das linhas de transmissão de energia de longa distância que atualmente estão sendo instalados na região.

## Capítulo 4 - EXPLORAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ESTÁVEIS

As estações receptoras da STARNET sofrem de serviço intermitente observados nos Diagramas de Operação (Capítulo 3). O monitoramento diário, no SIPAM, das descargas atmosféricas na região de Belém (Pará, Brasil) com os dados da STARNET mostrou variações do nível de detecção com o número de sensores em operação a partir da comparação dos eventos de tempestades observados no radar ou nas imagens de satélite com os eventos de raios registrados pela rede STARNET. A capacidade de uma rede de sensores para localizar uma descarga atmosférica depende da Eficiência de Detecção de cada um dos sensores ativos, bem como da Eficiência de uma combinação de sensores.

O capítulo 4 apresenta uma avaliação estatística do desempenho da rede STARNET em função da configuração (definida como a combinação das estações em operação) através o cálculo de vários parâmetros:

- a densidade de raios para comparar o nível de detecção das configurações da rede em função do número de sensores ativos;
- a Taxa de Participação dos sensores ativos para avaliar a eficiência relativa de um sensor dentro de uma configuração da rede;
- o número médio de sensores que participam na solução de localização para avaliar o comportamento de uma configuração de sensor da rede;
- e a Taxa de Localização das combinações de sensores para avaliar a eficiência relativa de uma combinação de sensores dentro de uma configuração da rede.

Esses parâmetros podem ser calculados estatisticamente nos conjuntos de dados das configurações estáveis identificadas na base da STARNET. As várias configurações estáveis da rede STARNET são identificadas a partir dos Diagramas de Operação calculados no Capítulo 3 para o período da base de dados reprocessada: de janeiro 2008 até dezembro 2011. Os novos sensores instalados em 2012 e 2013 em Belém, Cabo Verde e Ilhéus, ainda não podem ser integrados neste estudo por falta de base histórica.

O capítulo divide-se em 6 partes:

- A primeira parte trata de definição das variáveis (como as **Taxa de Participação** de um sensor e a **Taxa de Localização** de uma combinação de sensores);
- A segunda parte apresenta a lista das várias configurações estáveis identificadas nos Diagrama de Operação da rede STARNET;
- As 4 partes seguintes aparentam os resultados de exploração estatística das configurações estáveis identificadas na base de dados: os mapas de **Densidade de Raios**; Os mapas de **Taxa de Participação**; os mapas de **Número Médio de Sensores** que participam na solução de localização; E os mapas de **Taxa de Localização** de cada combinação de sensores.

## 4.1 Definições das variáveis

### 4.1.1 Configuração da rede

Uma configuração da rede é definida como a combinação das estações em operação, o número e a localização (Figura 39).

Figura 39 - configuração da rede.



Fonte: do autor

Define-se primeiro  $K_0$ , o conjunto dos  $n_k$ , número de **sensores disponíveis**  $k_n$  da rede:  $K_0 = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_k}\}$ . Um sensor é definido por sua posição geográfica em

latitude e longitude; Define-se também uma configuração de sensores ativos da rede,  $\mathbf{K}$  como um conjunto de  $na_K$ , número sensores ativos:  $\mathbf{K}=\{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_{na_K}\}$ .

Depois, se define  $\mathbf{S}$ , o conjunto de  $ns$ , número de **configurações possíveis**  $\mathbf{K}$  da rede, incluindo  $\mathbf{K}_0$  como a configuração que tem todos os sensores disponíveis da rede ativos:  $\mathbf{S}=\{\mathbf{K}_0, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_{ns}\}$ ; A matriz  $\mathbf{a}_k(\mathbf{K}, \mathbf{k}_n)$  de dimensão  $(ns \times nk)$  é formada pelos **Flags de ativação** dos sensores disponíveis  $\mathbf{k}_n$  da rede:

- Se o sensor  $k_n$  é ativo  $\Rightarrow a_k(K, k_n) = 1$ ;
- Se o sensor  $k_n$  não ativo  $\Rightarrow a_k(K, k_n) = 0$ ;

Então,

$$K = \{k_n / a_k(K, k_n) = 1\} \text{ e } na_K = \sum_n a_k(K, k_n)$$

Em seguida, a identificação das várias configurações da rede é baseada nos Diagramas de Operação apresentados no Capítulo 3 e em uma **hipótese**: uma estação é assumida não ativa (ou sem participação na solução de localização) se, somente ela, não registra *Sferics* durante um período de 10 minutos sobre toda a cobertura da rede STARNET. Contudo, a não participação de um sensor na solução de localização das *Sferics* durante 10 minutos, não significa que o sensor não funciona. No entanto, uma série temporal com o critério SWD permitiu identificar uma falha do sensor > 24 horas. Então se o estado de cada sensor permanece sobre 24 horas (ou seja, um dia inteiro), a configuração é considerada como estável. Depois os dados dos dias com exatamente a mesma configuração estável são agrupados para os cálculos estatísticos. Escolhe-se um mínimo de 10 dias inteiros de coleta de dados para realizar os cálculos estatísticos. As configurações da rede que respondem a estes critérios são chamadas de **Configurações Estáveis**.

#### 4.1.2 Eficiência de Detecção de um sensor

Define-se  $\mathbf{R}$ , o conjunto de  $nr$ , número de **descargas reais**  $\mathbf{r}_i$  que ocorrem dentro de uma área definida por um pixel de uma grade:  $\mathbf{R}=\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{nr}\}$ ;  $nr = \sum_i r_i$ .

A detecção de uma descarga  $\mathbf{r}_i \in \mathbf{R}$  por um sensor ativo  $\mathbf{k}_n$  depende da intensidade e da forma da onda registrada pela antena;

Define-se  $\mathbf{D}_{kn}$ , o conjunto de  $\mathbf{nd}_{kn}$ , número de **descargas detectadas** por um sensor  $\mathbf{k}_n$ . A **Eficiência de Detecção** do sensor  $\mathbf{k}_n$  é definida como sua capacidade a detectar as descargas numa zona geográfica quadrática de largura  $\delta$  centrada na posição (lat,lon):

$$DE_{kn}(lat, lon) = nd_{kn}(lat, lon)/nr(lat, lon) \quad (8)$$

Em seguida, se define a matriz  $\mathbf{d}_{rk}(\mathbf{r}_i, \mathbf{k}_n)$  de dimensão ( $\mathbf{nr} \times \mathbf{nk}$ ) formada pelos **Flags de detecção** da descarga  $\mathbf{r}_i$  por cada um dos sensores disponíveis  $\mathbf{k}_n$  da rede:

- Se  $a_k(K, k_n) = 0 \Rightarrow \forall r_i, d_{rk}(r_i, k_n) = 0$
- Se  $a_k(K, k_n) = 1$  e detecta a descarga  $r_i \Rightarrow d_{rk}(r_i, k_n) = 1$
- Se  $a_k(K, k_n) = 1$  e não detecta a descarga  $r_i \Rightarrow d_{rk}(r_i, k_n) = 0$

#### 4.1.3 Eficiência de Localização de uma configuração

Para que uma descarga seja localizada, se precisa no mínimo de 4 detecções de forma de onda de Sferics. Define-se  $\mathbf{X}_K$  é o conjunto de  $\mathbf{nx}_K$  número de **descargas atmosféricas localizadas** pela rede na configuração  $\mathbf{K}$ ; Se não tem falso positivo de detecção  $\mathbf{X}_K \subseteq \mathbf{R}$ ; e  $X_K = \{r_i \in R / \sum_{n=1}^{Nk} d_{rk}(r_i, k_n) \geq 4\}$ ; Quando a descarga  $\mathbf{r}_i$  é localizada pela rede ela é chamada  $\mathbf{x}_j$ ;  $\mathbf{X}_K = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{nx}\}$ ; e  $nx_K = \sum_j x_j$ .

A **Eficiência de Localização**  $LE_K$  da rede na configuração  $\mathbf{K}$  é definida como sua capacidade de localizar as descargas numa zona geográfica:

$$LE_K(lat, lon) = nx_K(lat, lon)/nr(lat, lon) \quad (9)$$

#### 4.1.4 Taxa de Participação de um sensor

O desempenho relativo de uma estação da rede  $\mathbf{k}_n$ , entre outras dentro de uma configuração  $\mathbf{K}$ , pode ser avaliado a partir da sua **Taxa de Participação** na solução de localização de cada uma das descargas atmosféricas registradas pela rede. A participação de uma estação na medição de um *Sferics* é identificada na base de dados da STARNET por um *Flag*.

Define-se a matriz  $\mathbf{p}_{\mathbf{x}_k}(\mathbf{x}_j, \mathbf{k}_n)$ , de dimensão  $(n_{\mathbf{x}_K} \times n_{\mathbf{k}})$  formada pelos **Flag de participação** do sensor  $\mathbf{k}_n$  na localização da descarga localizada pela rede  $\mathbf{x}_j \in n_{\mathbf{x}_K}$ :

- Se  $a_k(K, k_n) = 0 \Rightarrow \forall x_j, p_{xk}(x_j, k_n) = 0$ ;
- Se  $a_k(K, k_n) = 1$  e  $k_n$  participa na localização da descarga localizada  $x_j \Rightarrow p_{xk}(x_j, k_n) = 1$ ;
- Se  $a_k(K, kn) = 1$  e  $k_n$  não participa na localização da descarga localizada  $x_j \Rightarrow p_{xk}(x_j, k_n) = 0$ ;

Depois se define  $\mathbf{X}_{K_{kn}}$ , o conjunto de  $n_{\mathbf{x}_{K_{kn}}}$  número de **descargas localizadas** pela rede, na configuração  $\mathbf{K}$ , onde o sensor  $\mathbf{k}_n$  participou na localização  $X_{K_{kn}} = \{x_j \in X_K / p_{xk}(x_j, k_n) = 1\}$ ;  $\mathbf{X}_{K_{kn}} \subseteq \mathbf{X}$ ;  $n_{X_{K_{kn}}} = \sum_x p_{xk}(x_j, k_n)$ ;  $\sum_n n_{X_{K_{kn}}} \leq n_x$ .

A **Taxa de Participação**  $\mathbf{P}_{kn_K}$  de um sensor  $\mathbf{k}_n$  numa configuração da rede  $\mathbf{K}$  e numa zona geográfica é calculada por:

$$P_{kn_K}(lat, lon) = n_{X_{K_{kn}}}(lat, lon) / n_{X_K}(lat, lon) \quad (10)$$

Em seguida,  $\sum_{kn} L_{kn_K} \leq na_K$

As Taxas de Participação podem ser calculadas para todas as configurações estáveis identificadas na base de dados. Cada **Mapa de Taxa de Participação** é calculado para uma grade quadrática de 10.000 quilômetros quadrados, com uma resolução de 100 x 100 km, centrada na posição geográfica de cada estação. Finalmente, a taxa de participação é calculada somente se:  $n_{\mathbf{x}_K}(\mathbf{lat}, \mathbf{lon}) > 100$ .

#### 4.1.4.1 Caso especial: 4 sensores ativos

Na pior configuração, a rede esta funcionando com apenas 4 estações (o mínimo necessário), então cada descarga registrada pela rede é detectada por 4 estações ativas. Em seguida, as Taxas de Participações destas estações nestas configurações são iguais a 1 sobre toda a cobertura da rede.

Seja a configuração  $\mathbf{K}=\{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_{na_K}\}$  com 4 sensores ativos;  $na_K = \sum_n a_k(K, k_n) = 4$ ;

$$(\forall x_j \in X_K) \wedge (\forall k_n \in K), p_{xk}(x_j, k_n) = 1 \Rightarrow (\forall k_n \in K), P_{kn\_K} = 1$$

#### 4.1.4.2 Caso ideal A

Se todos os sensores tem a mesma Eficiência de Detecção numa zona geográfica, sem limite de detecção dinâmica, então, cada descarga atmosférica que ocorre nesta área seria detectada da mesma maneira por todos os sensores ativos.

Seja a configuração  $K=\{k_1, k_2, \dots, k_{n_{ak}}\}$  com mais de 4 sensores ativos  $n_{aK} \geq 4$ ; e se supõe que  $DE_{k_1}(lat, lon) = DE_{k_2}(lat, lon) = \dots = DE_{k_{n_{ak}}}(lat, lon)$ ;

Se a descarga  $r_i$  é localizada pela rede na configuração  $K$  então  $r_i \in X_K$ , em seguida  $(\forall k_n \in K), d_{rk}(r_i, k_n) = 1 \Rightarrow (\forall x_j \in X_K) \wedge (\forall k_n \in K), p_{xk}(x_j, k_n) = 1 \Rightarrow (\forall k_n \in K), P_{kn\_K} = 1$

Então, a resposta da rede é a mesma para qualquer número de sensores ativos  $n_{aK} \geq 4$ .

#### 4.1.4.3 Caso ideal B

Se existe uma hierarquia entre as Eficiências de Detecção dos sensores numa zona geográfica, em seguida, cada descarga que ocorre nesta área é detectada da mesma maneira pelos 4 melhores sensores.

Seja a configuração  $K=\{k_1, k_2, \dots, k_{n_{ak}}\}$  com  $n_{aK} \geq 4$  sensores ativos; se supõe que  $DE_{k_1}(lat, lon) > DE_{k_2}(lat, lon) > \dots > DE_{k_{n_{ak}}}(lat, lon)$  e no mínimo  $a_{k_1} = a_{k_2} = a_{k_3} = a_{k_4} = 1$ ;

Se a descarga  $r_i$  é localizada pela rede, no mínimo  $d_{rk}(r_i, k_1) = d_{rk}(r_i, k_2) = d_{rk}(r_i, k_3) = d_{rk}(r_i, k_4) = 1$ ; então:

- ✓  $d_{rk}(r_i, k_4) = 1 \Rightarrow d_{rk}(r_i, k_1) = d_{rk}(r_i, k_2) = d_{rk}(r_i, k_3) = 1 \Rightarrow r_i \in X_K$ ;
- ✓  $d_{rk}(r_i, k_4) = 0 \Rightarrow d_{rk}(r_i, k_5) = \dots = d_{rk}(r_i, k_{Nk}) = 0 \Rightarrow r_i \notin X_K$ ;

Conformemente,  $n_{xK} = n_{x_{K\_k4}}$ ; A Eficiência de Localização da rede na configuração  $K$  depende da Eficiência de Detecção do quarto melhor sensor  $k_4$  chamado de **Sensor Chave**.

#### 4.1.5 Taxa de Localização de uma combinação de sensores

A Eficiência de Localização de uma configuração  $\mathbf{K}$  da rede, com  $n\mathbf{k}$  sensores disponíveis e  $na_K$  sensores ativos, se decompõe em Taxas de Localização de cada combinação de sensores ativos da configuração. O número de combinações de sensores possíveis  $nc_K$  da configuração  $\mathbf{K}$  se calcula em função do número de sensores ativos com:

$$nc_K = \sum_{i=4}^{na_K} C_{na_K}^i = \sum_{i=4}^{na_K} \frac{na_K!}{i!(na_K - i)!} \quad (11)$$

Assim uma configuração com 4 sensores ativos tem só 1 combinação de sensores; uma configuração com 5 sensores ativos tem 6 combinações de sensores; uma configuração com 6 sensores ativos tem 22 combinações de sensores; e uma configuração com 7 sensores ativos tem 64 combinações de sensores;

Define-se  $\mathbf{C}_K$ , o conjunto de  $nc_K$ , número de combinações de sensores ativos da configuração  $\mathbf{K}$ :  $\mathbf{C}_K = \{\mathbf{c}_{1_K}, \mathbf{c}_{2_K}, \dots, \mathbf{c}_{nc_K_K}\}$ ;  $\mathbf{c}_{m_K} \in \mathbf{C}_K$  seja um conjunto de sensores formando uma combinação de sensores  $\mathbf{k}_n$  ativos da configuração  $\mathbf{K}$ . Depois se define a matriz  $\mathbf{f}_{xc}(\mathbf{x}_j, \mathbf{c}_{m_K})$  de dimensão  $(n\mathbf{x} \times nc_K)$ , formada pelos **Flags de Localização** da descarga localizada  $\mathbf{x}_j \in \mathbf{X}_K$  pela combinação de sensores  $\mathbf{c}_{m_K} \in \mathbf{C}_K$ :

- Se  $\forall k_n \in c_{m_K}, p_{xk}(x_j, k_n) = 1 \wedge \forall k_n \notin c_{m_K}, p_{xk}(x_j, k_n) = 0 \Rightarrow f_{xc}(x_j, c_{m_K}) = 1$
- Se  $\exists k_n \in c_{m_K} / p_{xk}(x_j, k_n) = 0 \vee \exists k_n \notin c_{m_K} / p_{xk}(x_j, k_n) = 1 \Rightarrow f_{xc}(x_j, c_{m_K}) = 0$

$\mathbf{X}_{K_{Cm}}$  è o conjunto de  $n\mathbf{x}_{K_{Cm}}$  número de **descargas localizadas** pela rede na configuração  $\mathbf{K}$  com a combinação de sensores  $\mathbf{c}_m$ ,  $X_{K_{Cm}} = \{x_j \in X_K / f_{xc}(x_j, c_{m_K}) = 1\}$ ;  $\mathbf{X}_{K_{Cm}} \subseteq \mathbf{X}$ ;  $n\mathbf{x}_{K_{Cm}} = \sum_x f_{xc}(x_j, c_{m_K})$ ;  $\sum_n n\mathbf{x}_{K_{Cm}} = n\mathbf{x}$ .

A **Taxa de Localização**  $\mathbf{L}_{Cm_K}$  de uma combinação de sensores  $\mathbf{c}_m$  numa configuração da rede  $\mathbf{K}$  e numa zona geográfica é calculada por:

$$L_{Cm_K}(lat, lon) = nx_{K_{Cm}}(lat, lon)/nx_K(lat, lon) \quad (12)$$

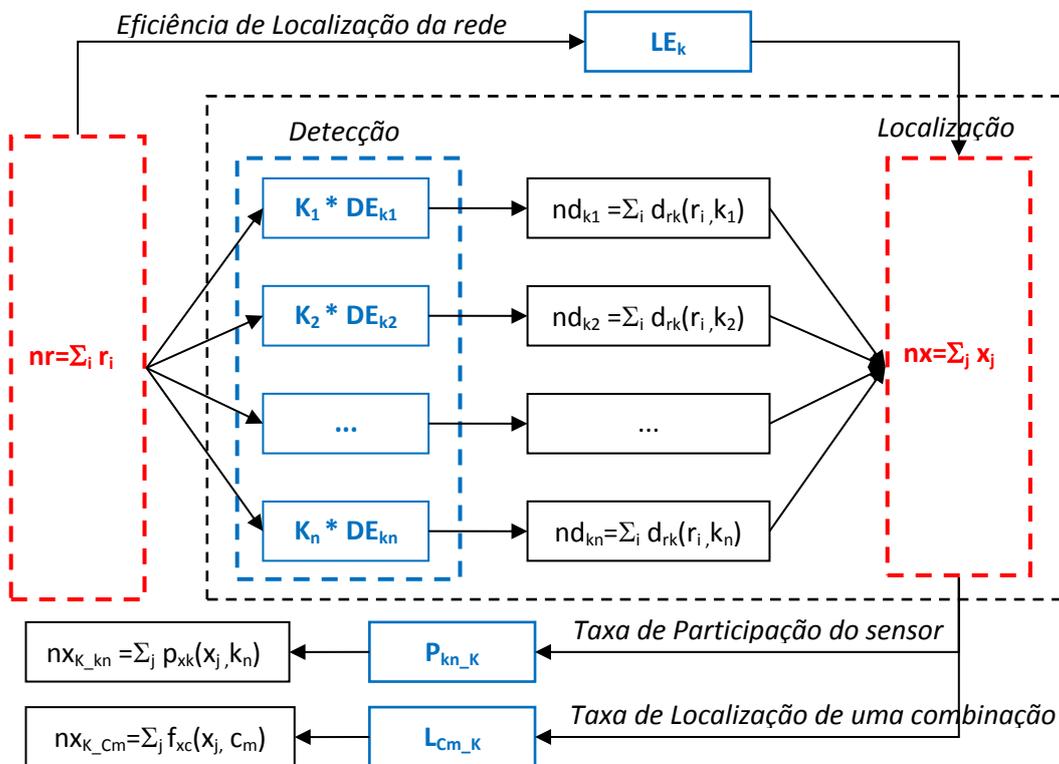
Em seguida,  $\sum_m L_{Cm_K} = 1$ ;

As Taxas de Localização podem ser calculadas para todas as configurações estáveis identificadas na base de dados. Os **Mapas de Taxa de Localização** das combinações são calculados para uma grade quadrática de 10.000 quilômetros quadrados, com uma resolução de 100 x 100 km, centrada na posição geográfica do sensor de Brasília. Finalmente, as Taxas de Localização são calculadas somente se:  $nx_K(lat,lon) > 100$ .

#### 4.1.6 Resumo da relação entre variáveis

A relação entre todas as variáveis descritas é apresentada Figura 40 com  $DE_{kn}$  a Eficiência de Detecção de um sensor  $k_n$ ,  $LE_k$  a Eficiência de Localização da rede na configuração  $K$ ,  $P_{kn_K}$  a Taxa de Participação de um sensor  $k_n$  na configuração  $K$  e  $L_{Cm_K}$  a Taxa de Localização de uma combinação de sensores  $c_m_K$  da configuração  $K$ .

Figura 40 - Esquema da relação entre variáveis do modelo de uniformização.



Fonte: do autor

## 4.2 Identificação das configurações estáveis

A partir dos Diagramas de Operação da rede, **136** configurações foram identificadas automaticamente pelo modelo: **3** com 8 estações ativas; **9** com 7 estações ativas; **28** com 6 estações ativas; **49** com 5 estações ativas; e **47** com 4 estações ativas. Contudo, a maioria destas configurações aparece sobre períodos curtos e não consecutivos. As configurações são nomeadas da forma ‘X.Y’: X seja o número de sensores ativos ( $n_{aK}$ ) e Y o número da configuração na ordem de encontro na base de dados: por exemplo, ‘7.1’ é a primeira configuração com 7 sensores ativos encontrada na base de dados. As configurações podem ser também nomeadas pela lista das abreviaturas dos sensores ativas definidas no Capítulo 4 e separadas por um ponto: por exemplo, ‘Ba.Ma.Sm.Gl.Ft.Cp’ é a configuração formado pelos sensores ativos de Brasília, Manaus, São Martinho, Guadalupe, Fortaleza e Cachoeira Paulista (os outros sensores estão parados por causa de falha).

**Tabela 11** - Configurações estáveis com 7 estações ativas.

Número estações ativas	Nome conf.	Lista das estações ativas	Dias da configuração	Número de dias total
7	‘7.3’	‘Ma.Cu.Cg.Sm. Gl.Ft.Cp’	2, 4-5, 13-16, 22, 23, 25 /06/2009 16, 19-21, 23-26, 29-30 /07/2009 2-7, 9-16, 19, 21-23, 25, 29-30 /08/2009	41
7	‘7.6’	‘Ba.Ma.Cg.Sm. Gl.Ft.Cp’	30/10/2009 1, 3-9, 17, 19, 23-24, 26, 28-29 /11/2009 18/12/2009 7-13/01/2010 13/02/2010	24
7	‘7.9’	‘Sp.Ba.Ma.Cg. Sm.Gl.Cp’	14, 18, 20-21 /09/ 2011 23-24, 26-27, 29-30 /11/2011 1, 31/12/2011	13

Fonte: do autor

Algumas configurações satisfazem os critérios de configuração estável para realizar cálculos estatísticos: a configuração precisa manter-se durante um mínimo de 24 horas e para um mínimo de 10 dias inteiro acumulados. Nenhuma das configurações com 8 estações ativas satisfazem estes critérios. Contudo 3 configurações com 7 sensores ativos, 8 configurações com 6 sensores ativos e 5 configurações com 5 sensores ativos satisfazem os critérios. Os dias identificados, com o nome atribuído á

cada configuração estável identificada, e a lista das estações ativas, são apresentados na Tabela 11 para as configurações com 7 sensores ativos ; Tabela 12 para as configurações com 6 sensores ativos e Tabela 13 para as configurações com 5 sensores ativos.

**Tabela 12** - Configurações estáveis com 6 estações ativas.

Número estações ativas	Nome conf.	Lista das estações ativas	Dias da configuração	Número de dias total
6	'6.1'	'St.Cg.Sm.Gl.Ft.Cp'	15-16, 21-24, 26 /08/2008 1, 3, 7-9 /09/2008 5-7 /10/2008 6-9 /12/2008	19
6	'6.2'	'Cu.Cg.Sm.Gl.Ft.Cp'	28-30 /01/2009 1, 11-12 /02/2009 18-24 /03/2009 12 /04/2009 12-13, 20-23 /05/2009	20
6	'6.14'	'Ba.Ma.Sm.Gl.Ft.Cp'	12, 15 /11/2009 23-27, 29, 30 /12/2009 1-3 /01/2010 13-14 /03/2010	14
6	'6.15'	'Ba.Ma.Cg.Sm. Ft.Cp'	12-13,17-20 /09/2009 1,9, 12-14, 16, 17, 20, 21, 25, 27 /10/2009 18 /01/2010 6, 10, 11 /02/2010	21
6	'6.21'	'Sp.Ma.Cg.Sm.Ft.Cp'	12-13, 17-18, 22, 24-25, 28-30 /11/2010 7-8 /12/2010	12
6	'6.24'	'Sp.Ma.Cg.Sm. Gl.Cp'	11, 13, 15, 19-21, 23-24 /02/2011 4-5, 9-10, 12 /05/2011	13
6	'6.26'	'Sp.Ba.Cg.Sm.Gl.Cp'	30-31 /08/2011 1-7, 9-12 /09/2011 7-13, 20, 24-31 /10/2011 2, 4-12, 14-20 /11/2011	46
56	'6.25'	'Sp.Ba.Ma.Cg. Sm.Cp'	20-22/08/2011 3, 5, 7, 10,11, 13-14, 16-20, 22/12/2011	16

Fonte: do autor

**Tabela 13** - Configurações estáveis com 5 estações ativas.

Número estações ativas	Nome conf.	Lista das estações ativas	Dias da configuração	Número de dias total
5	'5.2'	'Cg.Sm.Gl.Ft.Cp'	16-17, 19-21, 24-30 /10/2008 2-4 /11/2008 14-15 /03/2009	18
5	'5.1'	'St.Cg.Gl.Ft.Cp'	2, 4, 7, 25-31 /01/2008 1-3, 5-6, 13, 15, 17, 20-21 /02/2008 20-21 /06/2008 22, 24-27, 29-30 /07/2008	36
5	'5.21'	'Ma.Cg.Sm.Ft. Cp'	22, 23 /04/2010 10-11, 22-27, 29 /07/2010 28 /08/2010 2-5, 10-12, 16-21 /09/2010	26
5	'5.40'	'Sp.Cg.Sm.Gl.Cp'	2-6, 15-18, 27-30 /04/2011 4-5 /06/2011	15
5	'5.42'	'Sp.Ma.Cg.Gl.Cp'	18, 22-31 /01/2011 9, 11-17, 20, 22, 23 /06/2011 9-12 /07/2011	26
5	'5.38'	'Sp.Ma.Cg.Sm. Cp'	1-15, 22-23 /03/2011 14-16 /05/2011	20

Fonte: do autor

### 4.3 Densidade de raios das configurações estáveis

Os Mapas **de Densidade de Raios** foram calculados, para cada configuração estável (de 5 até 7 sensores ativos) identificada na base de dados da STARNET, com uma resolução de 100 x 100 km e nos pixels onde o número de raios detectados pela rede foi maior do que 100. Seguindo este critério, as densidades de raios poderiam ser calculadas sobre quase toda a América do Sul, mas também, sobre uma parte do Oceano Atlântico correspondente à posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ou da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) definidas por Garreaud et al. (2009), onde a atividade elétrica atmosférica era intensa. Essas zonas são definidas como a cobertura da rede por um período dado.

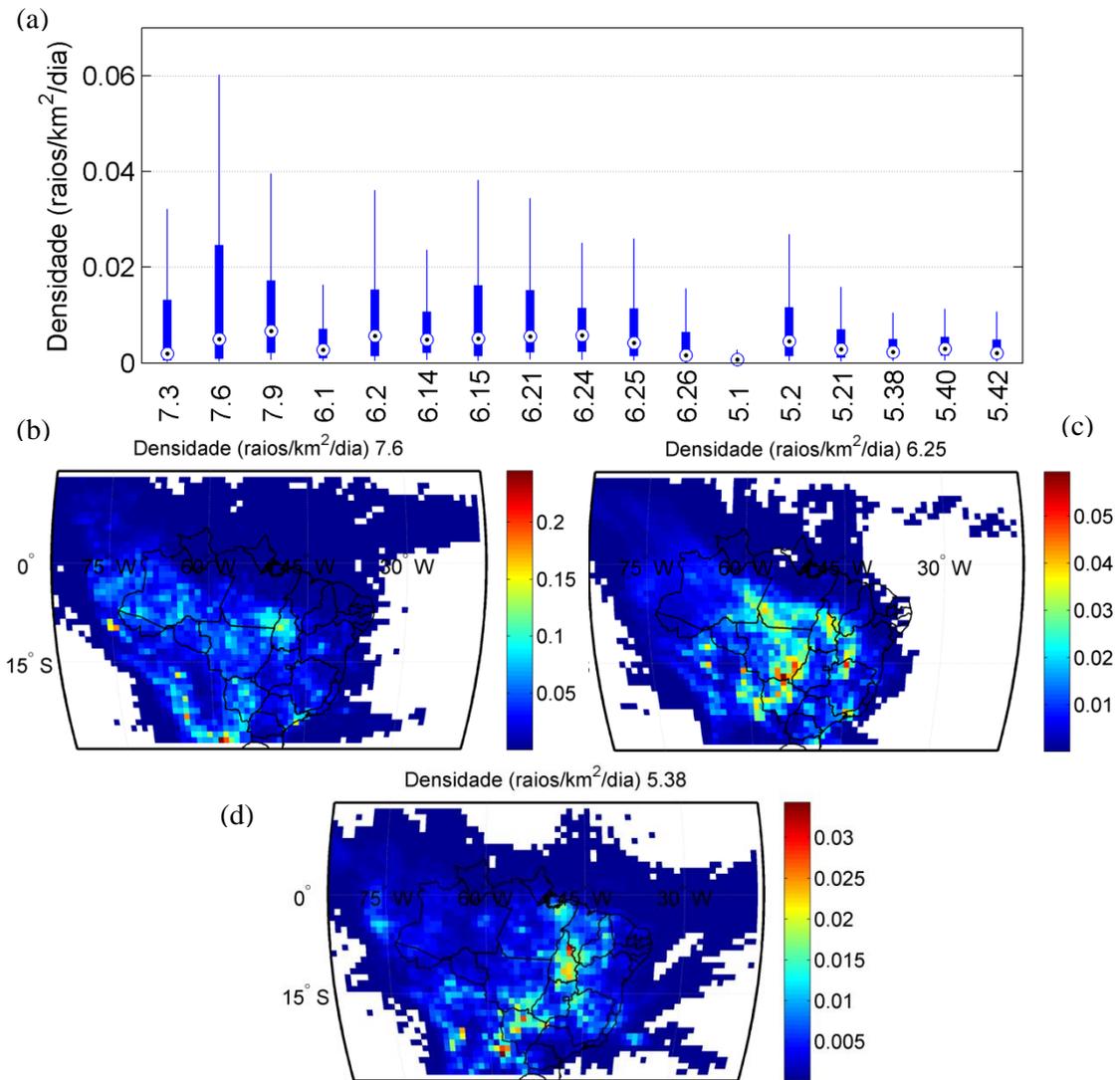
A Figura 41 apresenta uma comparação estatística dos **Mapas de densidade de Raios** de todas as configurações estáveis na forma de Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983), junto com três exemplos de mapas: um para uma configuração com 7 sensores ativos ('7.6'); um com 6 sensores ativos ('6.25'); e um com 5 sensores ativos

(‘5.38’). Mesmo considerando que as densidades de raios não foram calculadas sobre o mesmo período, pode ser observado de maneira geral no diagrama de caixa que as maiores densidades de raios foram registradas para uma configuração da rede com 7 sensores ativos (a ‘7.6’). Além disso, as menores densidades de raios foram registradas por uma configuração da rede com 5 sensores ativos (a ‘5.1’). Em seguida, um teste de comparação múltipla de uma análise da variância em uma dimensão (HOCHBERG et al., 1987) foi realizado para testar a hipótese, se dois mapas de densidade de raios são as mesmas, com uma probabilidade de 95%. Os resultados dos testes de comparação múltipla mostram que:

1. Alguns mapas com 6 estações ativas foram significativamente semelhantes a outros mapas com 7 estações ativas: ‘6.15’, ‘6.21’, e ‘6.2’ são semelhantes a ‘7.9’;
2. Alguns mapas com 5 estações ativas foram significativamente semelhantes a outros mapas com 6 estações ativas: ‘5.2’ é semelhante a ‘6.14’, ‘6.24’ e ‘6.25; ‘5.21’, ‘5.40’, ‘5.42’ e ‘5.38’ são semelhantes a ‘6.1’ e ‘6.26’;
3. Os mapas das configurações ‘7.6’ e ‘5.1’ tinham nenhuma semelhança com os outros mapas; e nenhum mapa com 5 sensores ativos têm qualquer semelhança com os mapas com 7 sensores ativos.

Estes resultados confirmam que aparece uma degradação da detecção de descargas atmosféricas em função do número de sensores ativos da rede e então, que a Eficiência de Localização da rede depende do número de sensores ativos.

**Figura 41** - Comparação estatística entre os Mapas de Densidades de Raios das configurações estáveis.



Fonte: do autor

#### 4.4 Taxa de Participação dos sensores

Os **Mapas de Taxa de Participação** são características da **Eficiência de Detecção Relativa** de cada sensor numa configuração de sensores ativos da rede. Os mapas de Taxa de Participação foram apresentados na área comum de cálculo das diferentes estações, limitado em latitude entre -28,23°S e 14,03°N e em longitude entre -83,72°W e -18,07°W. Além disso, eles foram calculados onde a densidade de raios foi maior que 0,01 Sferics/km<sup>2</sup> (>100 Sferics por pixel de 100 x 100 km). Também, foi verificado, para cada estação, que os valores de Taxa de Participação não foram correlacionados com a densidade de raios (os coeficientes de correlação linear estavam todos dentro do intervalo [-0,1; 0,2]).

No caso das configurações com apenas quatro estações ativas, os mapas de Taxa de Participação de todos os sensores ativos foram uniformes e iguais a um, como previsto na metodologia (Capítulo 4). Na verdade, todos os *Sferics* foram detectados pelas quatro estações ativas, o mínimo necessário e todos os sensores ativos foram de tipo Sensor Chave (definido na metodologia) sobre toda a cobertura da rede.

Nos outros casos (com mais de 4 sensores ativos), apareceu para cada zona geográfica (cada pixel do mapa), uma hierarquia de detecção entre os sensores: alguns sensores tinham uma Taxa de Participação mais alta que outras, significando que suas Eficiência de Detecção foram maiores. Aumentando o número de descargas atmosféricas localizadas pela rede, mais apareceram as limites de detecção dos vários sensores. Então mais havia sensores ativos, mais as Taxas de Participação estavam características das Eficiências de Detecção relativa entre os sensores. Neste contexto, as Taxas de Participações das configurações estáveis com 7 sensores ativos (as configurações estáveis com um máximo de sensores ativos) foram as mais características da Eficiência de Detecção relativa entre os sensores da rede.

Nessa parte apresentam-se primeiro os resultados das 3 configurações estáveis com 7 sensores ativos. Depois, os resultados de todas as configurações estáveis com 7, 6 e 5 sensores ativos foram comparados estatisticamente na forma de Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983).

#### **4.4.1 Configurações com 7 sensores ativos**

As Figura 42, Figura 43 e Figura 44 apresentam os **Mapas de Taxa de Participação** de cada estação da STARNET nas três configurações estáveis com 7 estações ativas, respectivamente ‘7.3’, ‘7.6’ e ‘7.9’.

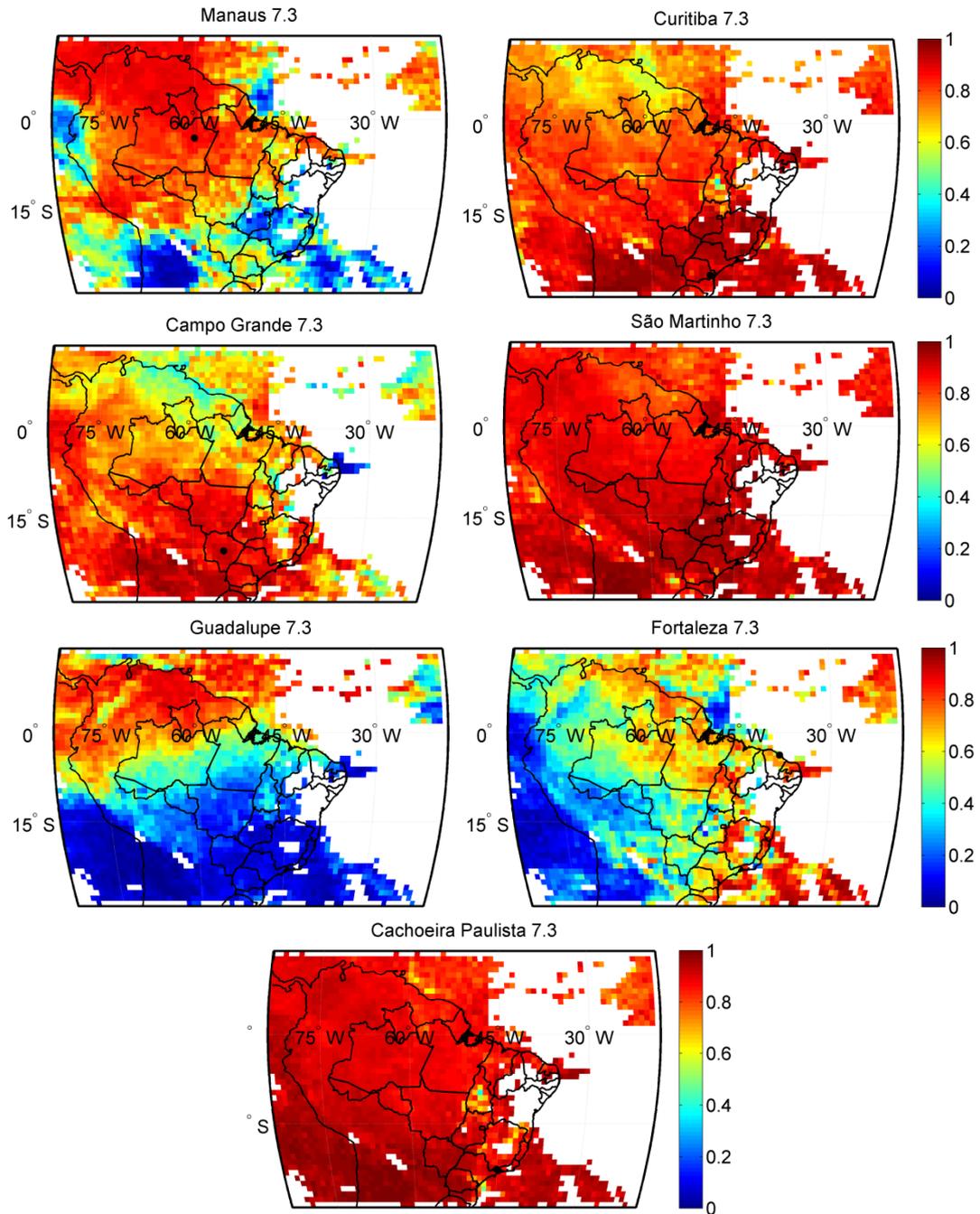
Observe-se que a rede não respondeu como os casos ideais A e B descritos na metodologia: no caso ideal A (todos os sensores têm a mesma Eficiência de Detecção numa zona geográfica, sem limite dinâmico) as Taxas de Participação de todos os sensores ativos são uniforme e iguais a 1; e no caso ideal B (existe uma hierarquia entre as Eficiências de Detecção dos sensores numa zona geográfica, sem limite dinâmico) as Taxas de Participação dos 4 melhores sensores ativos são uniforme e iguais a 1. Observa-se depois que todos os mapas de Taxa de Participação das diferentes estações ativas apresentavam variações em termos de valores e de distribuição espacial. Isto

significa que os sensores não tiveram Eficiências de Detecção similares mas que houve uma hierarquia de Eficiências de Detecção entre os vários sensores em função das zonas geográficas. Os valores de Taxas de Participação foram raramente iguais a um. Isto significa que todos os sensores sofrem de um limite dinâmico, impedindo a participação de um sensor em todas as localizações de descargas atmosféricas. Contudo as áreas, onde a Taxa de Participação estava alta, correspondem às áreas onde a Eficiência de Detecção do sensor era parte dos 4 melhores.

A estação localizada em **São Martinho** tinha nas três configurações com 7 sensores ativos, médias de participação elevadas (0,89 na '7.3'; 0,84 na '7.6'; e 0,88 na '7.9'), e distribuições espaciais geograficamente uniformes com baixos valores de desvio padrão (0,07 na '7.3'; e 0,1 na '7.6'; e 0,11 na '7.9'). Pode-se concluir que a estação de São Martinho tinha a maior Eficiência de Detecção da rede sobre toda a cobertura porque a sua participação era alta independentemente da distancia e da configuração. Ela foi também um Sensor Chave sobre toda a cobertura da rede. Ao contrario, as estações de **Brasília** e **Fortaleza** tinham médias de participação muito baixas (0,46 na '7.6' e 0,52 na '7.9' para Brasília; 0,58 na '7.3' e 0,54 na '7.6' para Fortaleza) com distribuições espaciais caóticas e valores altos de desvio padrão (0,25 na '7.9' e 0,19 na '7.6' para Brasília; 0,23 na '7.3' e 0,19 na '7.6' para Fortaleza). Pode-se concluir que estas estações tinham as menores Eficiências de Detecção da rede porque elas participaram pouco, mesmo nos áreas próximos a suas localizações e para qualquer configuração com 7 estações ativas. Além disso, a Taxa de Participação da estação de **Guadalupe** foi sempre alta na parte norte da América de Sul, onde ela participou como Sensor Chave devido à proximidade das descargas registradas (poucas estações foram capazes de detectar descargas nesta área). Contudo, no Sul do continente, a estação de Guadalupe participou muito pouco porque a sua Eficiência de Detecção não era suficiente para detectar as descargas localizadas pelos outros sensores mais eficientes nesta zona. O comportamento da estação de **Manaus** foi similar a Guadalupe, como se observa na configuração '7.3'. As estações de **São Paulo** na configuração '7.9', de **Campo Grande** na configuração '7.9' e de **Cachoeira Paulista** na configuração '7.6' tinham também o mesmo comportamento, mas geograficamente invertido: alto no sul e mais baixo no Norte do continente. A estação de **Curitiba** apresentou uma participação

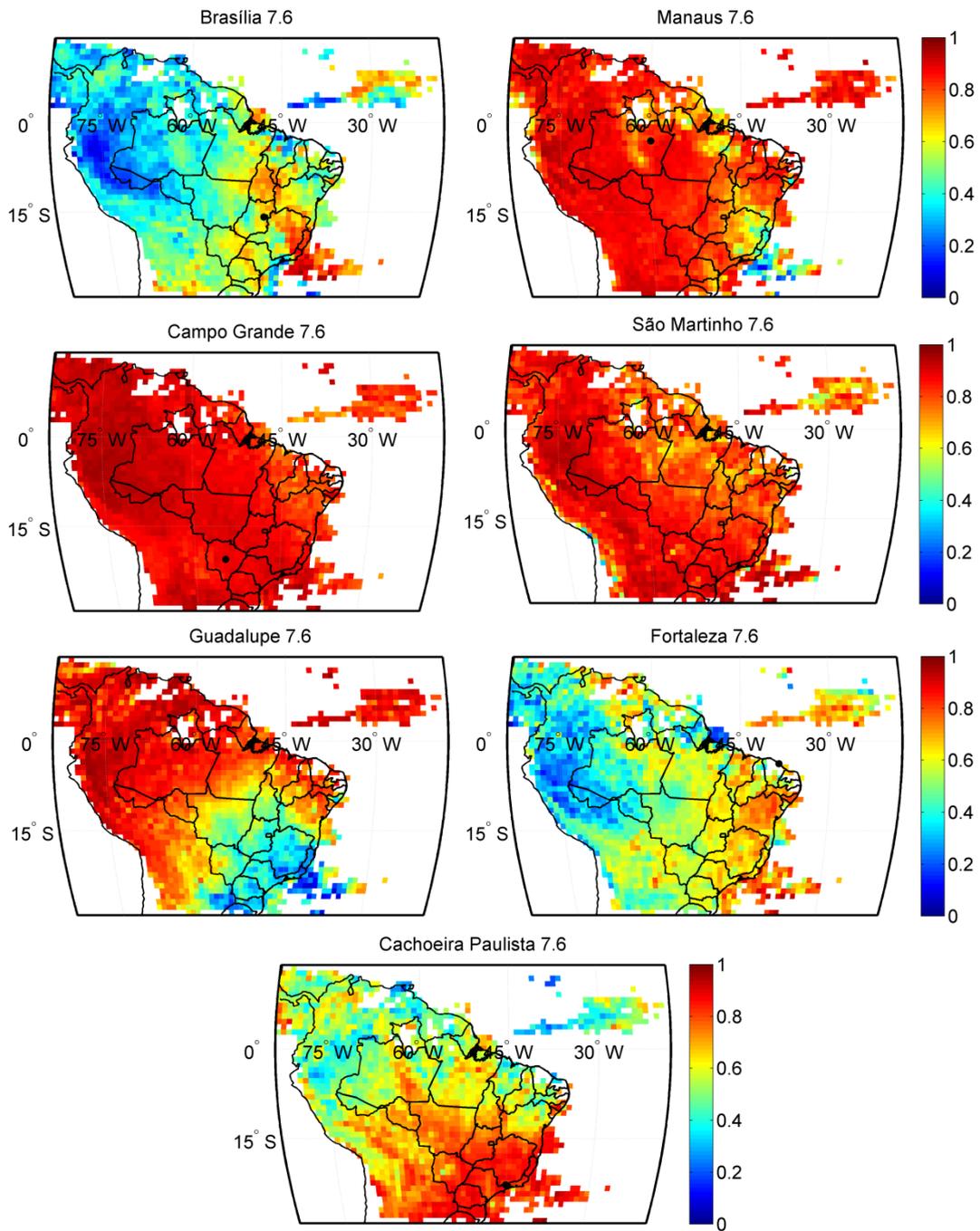
maior no Sul do continente devido à proximidade das descargas detectadas, contudo a sua participação no Sul ficou globalmente alta.

**Figura 42 -** Mapas de Taxa de participação da configuração '7.3'.



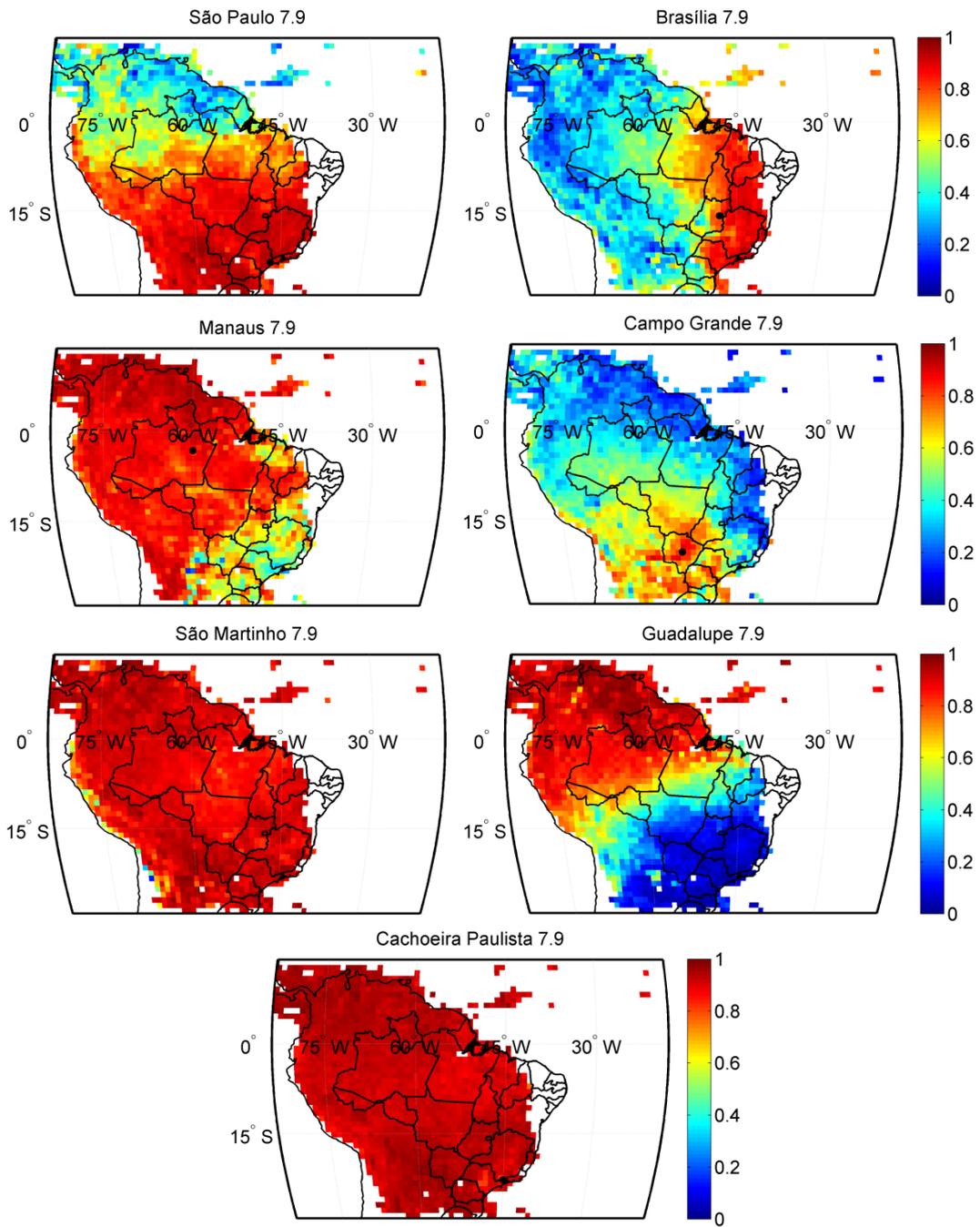
Fonte: do autor

**Figura 43 -** Mapas de Taxa de participação da configuração '7.6'.



Fonte: do autor

**Figura 44** - Mapas de participação da configuração '7.9'.



Fonte: do autor

Para comparar as diferentes configurações com 7 sensores ativos, os padrões de participação foram classificados em três categorias associadas a um símbolo: Uniforme (o); Organizado (/); e Caótico (x). Os resultados são apresentados na Tabela 14 para as configurações com 7 estações ativas.

Pode-se observar, na configuração '7.6', que o padrão de Participação da estação de **Manaus** era quase uniforme em comparação nas configurações '7.3' e '7.9' que apresentavam padrões organizados (alto no norte e mais baixo no sul). De fato, a configuração '7.6' tinha apenas, no sul, três sensores ativos com Eficiência de Detecção alta (Campo Grande, São Martinho e Cachoeira Paulista). Neste caso, o sensor de Manaus virou um **Sensor Chave** na região Sul. Este resultado não significa que a Eficiência de Detecção do sensor de Manaus era maior, mas que tinha menos descargas atmosféricas detectadas pela rede na região (a Eficiência de Localização da rede era menor). Todas as descargas que estavam detectadas devem provavelmente ser estatisticamente de intensidade maior. Da mesma maneira, na configuração '7.6', o padrão de participação de **Campo Grande** ficou quase uniforme porque no Norte do continente tinha apenas 3 sensores ativos com Eficiência de Detecção alta (Manaus, São Martinho e Guadalupe). Contudo o padrão de Participação de Cachoeira Paulista ficou organizado (baixo no Norte e alto no sul) porque a sua Eficiência de Detecção deve ser menor do que o sensor de Campo Grande nesta zona.

Na configuração '7.3' a participação do sensor de **Guadalupe** na Amazônia era muito baixa porque a estação de Curitiba, que tinha uma Eficiência de Detecção maior nesta zona, participou na detecção junto com as estações de Manaus, São Martinho e Cachoeira Paulista. Da mesma maneira na configuração '7.9' a participação de **Brasília** aumentou no leste porque nesta zona tinham apenas três estações ativas com Eficiência de Detecção alta (São Paulo, São Martinho, Cachoeira Paulista).

**Em resumo**, na combinação de sensores ativos da rede pode-se observar uma hierarquia entre as Eficiências de Detecção em função da distancia de afastamento do receptor. Assim a estação de **São Martinho** tinha sempre uma das maiores Eficiências de Detecção e participou em uma grande parte da localização das descargas pela rede sobre quase toda a área de cobertura. A estação de **Curitiba** apresentou depois a segunda maior Eficiência de Detecção, devido a sua capacidade de participar muito na

detecção no norte, mais do que Guadalupe e igual à estação de Manaus. Em seguida os resultados mostram três estações de comportamento similares com uma participação limitada no Sul, nas áreas mais próximas da localização das estações: **São Paulo, Cachoeira Paulista e Campo Grande**. Contudo a hierarquia de Eficiência de Detecção entre estes três sensores variou quando havia falta de detecção no norte. O comportamento de **Manaus e Guadalupe** foi também limitado a uma zona próxima da localização das estações. Contudo, as duas estações participaram na Amazônia quando tinha falhas das outras estações com Eficiência de Detecção maior. As estações de **Brasília e Fortaleza** apresentaram as menores Eficiências de Detecção e participaram pouco na detecção mesmo perto das estações ou somente no buraco de detecção dos Sensores Chave da configuração.

**Tabela 14** - Padrões de Participação das configurações com 7 estações ativas.

<b>Padrões de participação das configurações: o hífen corresponde às estações não activas, (o) Uniforme, (/) organizado e (x) Caótico</b>										
	Sp	Ba	Ma	Cu	St	Cg	Sm	Gl	Ft	Cp
<b>7.3</b>	-		(/)	(/)	-	(/)	(o)	(/)	(x)	(o)
<b>7.6</b>	-	(x)	(o)			(o)	(o)	(/)	(x)	(/)
<b>7.9</b>	(/)	(/)	(/)			(/)	(o)	(/)	-	(o)

Fonte: do autor

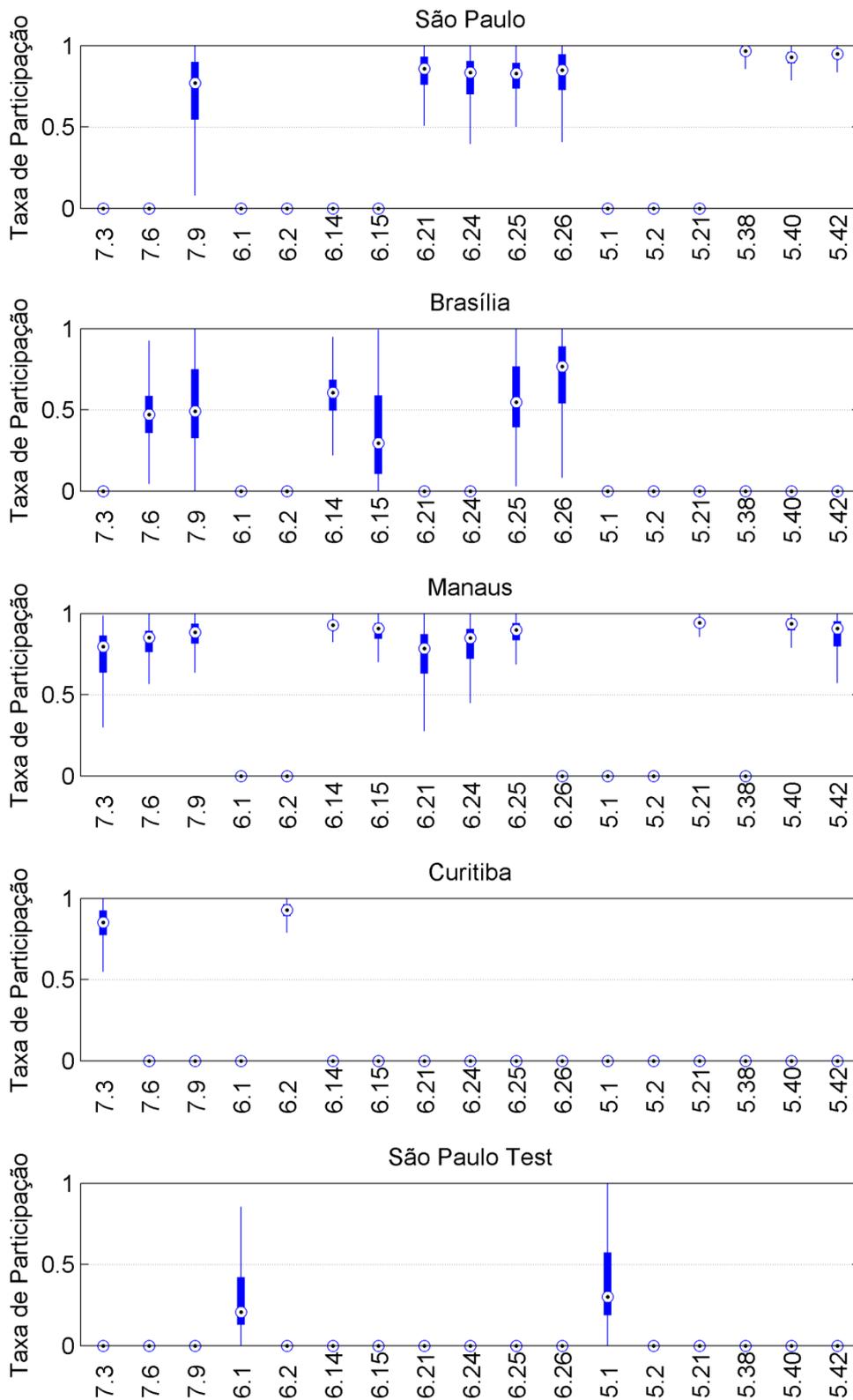
#### **4.4.2 Comparação estatística de todas as configurações estáveis**

As Taxas de Participação das configurações estáveis com 7, 6 e 5 sensores ativos foram compradas estatisticamente para cada sensor nas Figura 45 (São Paulo, Brasília, Manaus, Curitiba e São Paulo Teste) e Figura 46 (Campo Grande, São Martinho, Guadalupe, Fortaleza e Cachoeira Paulista).

De maneira geral, quando o número de estações ativas diminuiu, os padrões de participação das estações ativas melhoraram (a média aumentou e a dispersão baixou) ou estabilizaram. Esta regra foi sempre respeitada para as estações de **São Paulo, Manaus, Curitiba, Campo Grande, São Martinho e Cachoeira Paulista**. A estação de **Guadalupe** quase respeitou a regra exceto na configuração '6.2' por causa da dispersão nas bordas de cálculo. Contudo, a regra não foi respeitada para as estações de **Brasília e Fortaleza** que tinham um comportamento mais caótico. Os padrões das estações de Manaus, Curitiba, Guadalupe, Cachoeira Paulista, alcançaram um padrão

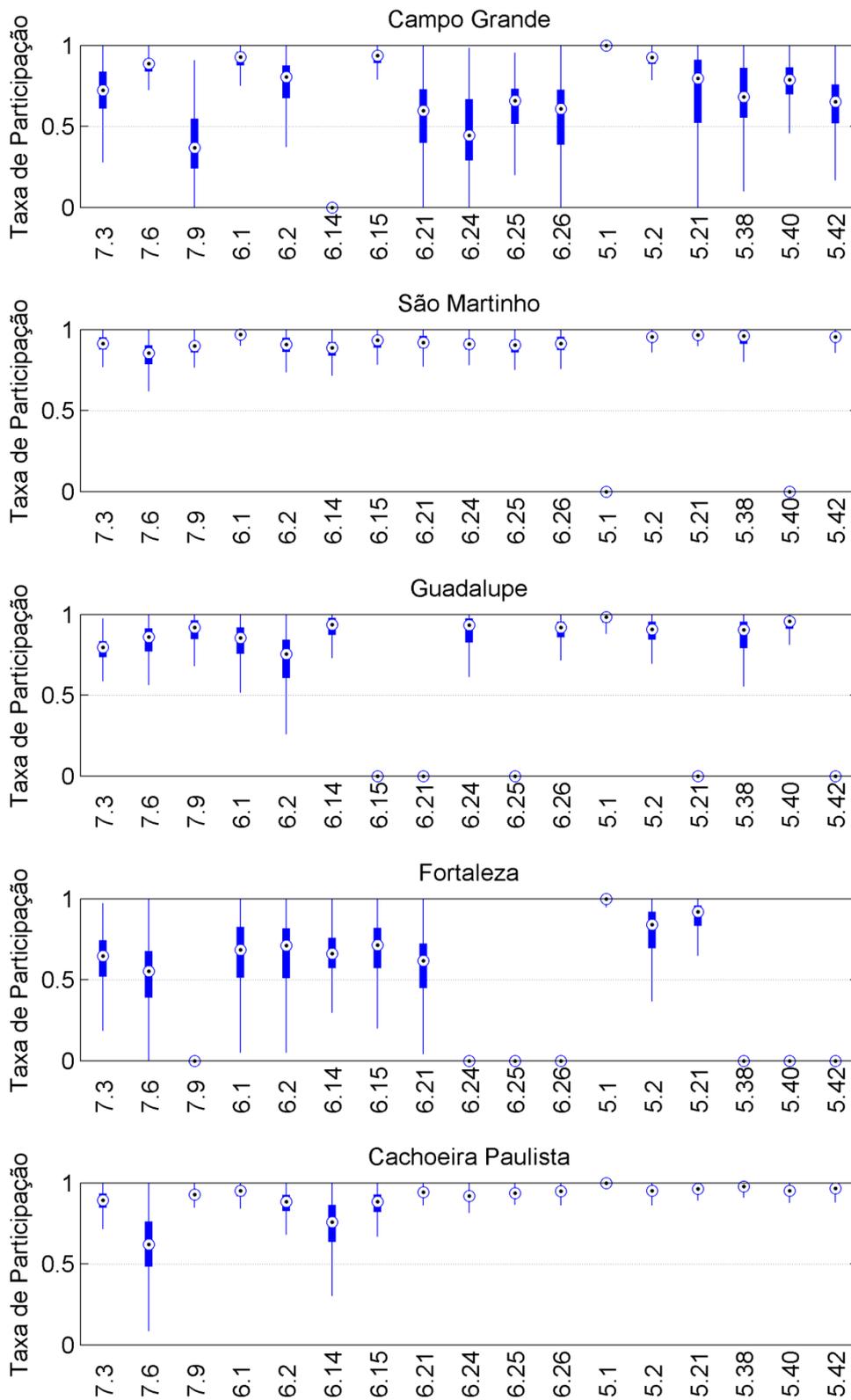
alto (a média >80%) e uniforme (o desvio padrão <10%) somente quando diminuiu o número de estações ativas da rede. Isto aconteceu numa ou várias configuração com 6 e 5 sensores ativos. Nestas configurações os sensores se transformaram em um Sensor Chave da rede sobre toda a cobertura. Aconteceram também para os sensores de São Paulo, Brasília e Fortaleza numa ou várias configurações com 5 sensores. Contudo o sensor de São Paulo Teste ficou sempre com uma participação muito baixa.

**Figura 45** - Comparação estatística entre a Taxa de Participação das configurações estáveis.



Fonte: do autor

**Figura 46** - Comparação estatística entre a Taxa de Participação das configurações estáveis.



Fonte: do autor

#### **4.5 Número de sensores que participam da localização de descargas atmosféricas**

Os **Mapas de Número Médio de Sensores** que participam da detecção foram calculados, para cada configuração estável entre 5 até 7 sensores ativos, com uma resolução de 100 x 100 km e nos pixels onde a densidade de raios foi maior que 0,01 Sferics/km<sup>2</sup>. Foi verificado, para cada configuração, que os valores obtidos para esse parâmetro não são correlacionáveis com as densidades de raios. No caso das configurações com 4 estações ativas, o número de sensores que participam é sempre de 4 porque corresponde ao número de sensores mínimo para localizar uma descarga atmosférica de acordo com o método ATD.

A Figura 47 apresenta uma comparação estatística dos Mapas de Número Médio de Sensores de todas as configurações estáveis, na forma de Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983), junto com três exemplos de mapas: um para uma configuração com 7 sensores ativos ('7.6'); um com 6 sensores ativos ('6.25'); e um com 5 sensores ativos ('5.38'). Os resultados de comparação estatística mostram que as três configurações com 7 sensores ativos tinham resultados similares com as configurações com 6 e 5 sensores ativos. Os valores médios dos vários mapas ficaram muito baixos com um número de sensores participando na solução de localização das descargas atmosféricas compreendido entre 4 e 5 sensores. Contudo, o Número Médio de Sensores que participam parece caracterizar o número de sensores ativos da rede. Os mapas apresentaram um baixo desvio padrão e as médias dos mapas com 7 sensores ativos (de 4,8 até 4,9 sensores participando) foram distintas das médias dos mapas com 6 sensores ativos (de 4,45 até 4,7 sensores participando), as quais foram distintas das médias dos mapas com 5 sensores ativos (de 4,26 até 4,42 sensores participando). Um teste de comparação múltipla de uma análise da variância em uma dimensão (HOCHBERG et al., 1987) foi realizado para testar a hipótese, se dois mapas seriam os mesmos, com uma probabilidade de 95%. Os resultados dos testes de comparação múltipla confirmaram que:

1. Nenhum mapa com 7 sensores ativos tinha qualquer semelhança com um mapa com 6 ou 5 sensores ativos;

2. Nenhum mapa com 6 sensores ativos tinha qualquer semelhança com um mapa com 7 ou 5 sensores ativos;

Foi verificado que o número de sensores que participam da solução de localização foi relacionado ao número de combinações de sensores da configuração. O número de combinações possíveis  $nc_K$  da configuração  $K$  se calcula com:

$$nc_K = \sum_{i=4}^{na_K} C_{na_K}^i = \sum_{i=4}^{na_K} \frac{na_K!}{i!(na_K - i)!} \quad (13)$$

Se todas as combinações de sensores da configuração têm o mesmo peso de Taxa de Localização:

$$L_{cm_K}(lat, lon) = 1/nc_K(lat, lon) \quad (14)$$

Então o número médio teórico de sensores que participam se calcula como a média do número de sensores das combinações:

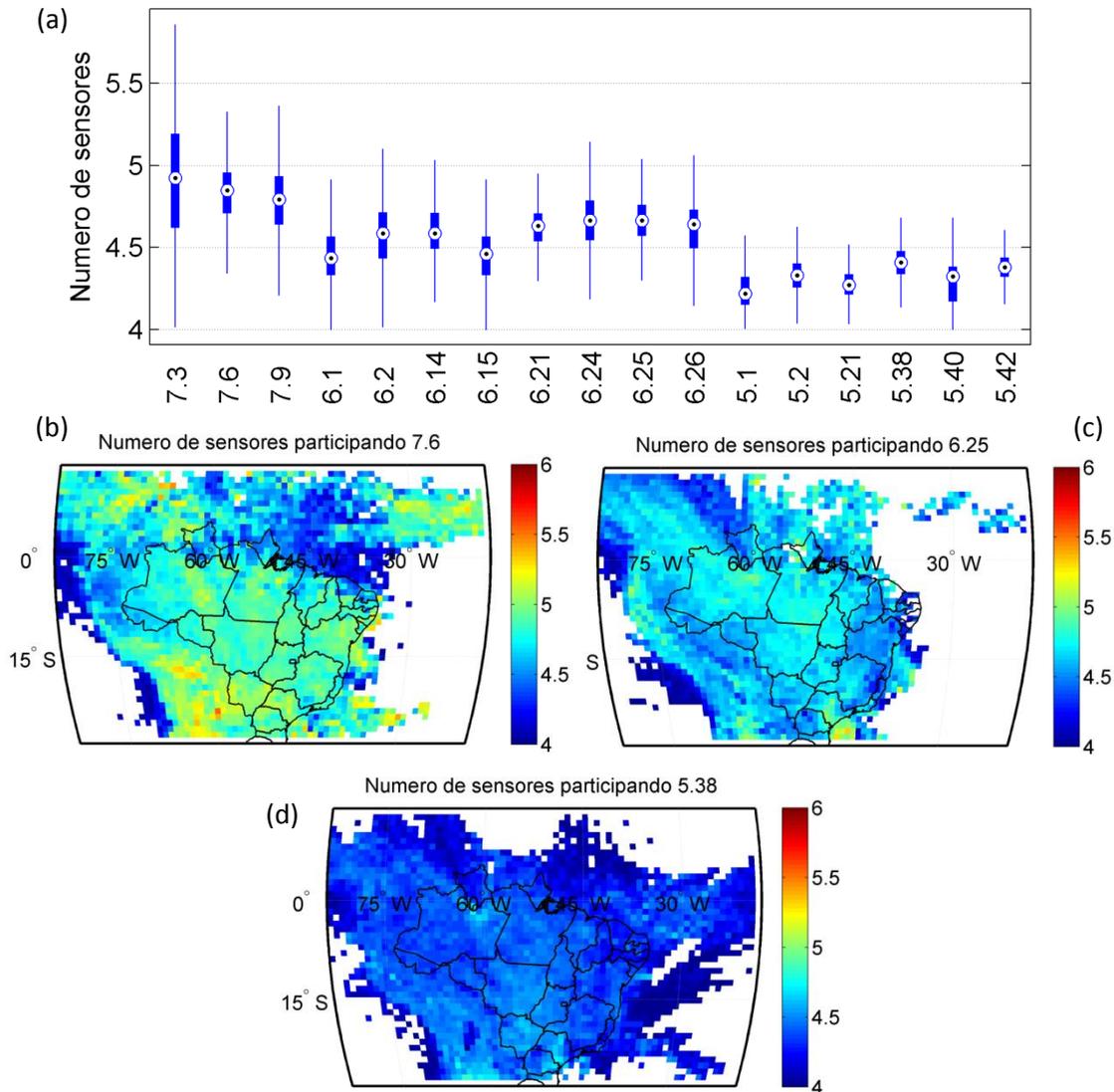
$$\bar{N}_{sens} = \left( \sum_{i=4}^{na_K} (i \cdot C_{na_K}^i) \right) / nc_K \quad (15)$$

Os resultados obtidos utilizando-se a Equação 15 foi de 4,17 para as configurações com 5 sensores ativos (6 combinações de sensores possíveis); 4,36 para as configurações com 6 sensores ativos (22 combinações de sensores possíveis); e 4,59 para as configurações com 7 sensores ativos (64 combinações de sensores possíveis). Os resultados experimentais foram um pouco acima destes valores teóricos porque as combinações com mais sensores devem ter um peso maior (ou uma Taxa de Localização maior).

Além disso, nos exemplos da Figura 47, aparecem zonas do continente onde uma configuração era menos (ou mais) eficiente, ou seja, a média de número de sensores que participaram, era menor (ou maior). Na configuração '7.6' (Figura 47b), a rede parece mais eficiente no Sul que no Norte devido ao funcionamento dos 4 Sensores Chave (Campo Grande, São Martinho, Manaus e Cachoeira Paulista); enquanto que no

Norte a rede dependia das estações de Fortaleza e Brasília que são duas estações mais fracas e caóticas. Também no mapa das configurações ‘6.25’ (Figura 47c) e ‘5.38’ (Figura 47d) aparecem zonas, na borda, onde a rede detectou os raios com apenas 4 sensores enquanto que tinham 6 ou 5 sensores ativos. Essas zonas correspondem a limite de detecção de 1 ou 2 sensores ativos da configuração.

**Figura 47** - Comparação estatística entre Mapas de Número Médio de Sensores que participam das configurações estáveis.



Fonte: do autor

#### 4.6 Taxas de Localização das combinações de sensores

Para determinar, para cada configuração estável, as taxas de localização das combinações de sensores, primeiramente se calculam todas as combinações de sensores possíveis. As combinações são nomeadas pela lista das abreviaturas dos sensores

definidas no Capítulo 4 e separadas por um ponto, por exemplo: ‘Ba.Ma.Sm.Gl’ ou ‘Ma.Sm.Gl.Ft’ são duas combinações de sensores da configuração ‘Ba.Ma.Sm.Gl.Ft.Cp’ (‘6.14’). Depois para cada combinação de sensores de cada configuração estável, se calcula os **Mapas de Taxa de Localização** das combinações de sensores com uma resolução de 100 x 100 km nos pixels onde a densidade de raios foi maior que 0,01 Sferics/km<sup>2</sup>. Os resultados são apresentados na forma de uma comparação estatística entre os vários mapas de Taxas de Localização das combinações de sensores de uma configuração, com um Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983), junto com dois ou três exemplos de Mapas de Taxa de Localização. Apresentam-se três exemplos de resultados: um para a configuração ‘7.3’ que tem 64 combinações de sensores possíveis (Figura 48); um para a configuração ‘6.2’ que tem 22 combinações de sensores possíveis (Figura 49); e um para a configuração ‘5.2’ que tem 6 combinações de sensores possíveis (Figura 50). Os resultados mostram que, para cada configuração, todas as combinações de sensores participaram na localização. Se todos os sensores tivessem a mesma Eficiência de detecção uniforme e constante, as taxas de Localização das varias combinações teriam o mesmo valor igual a  $1/n_{cK}$ . Globalmente, se observa que as Taxas de Localizações aumentaram junto com o número de sensores na combinação: as combinações com um máximo de sensores tinham os maiores valores médias de Taxa de Localização significando que elas têm um nível de detecção maior. A combinação com o maior número de sensores (igual ao número de sensores ativos) caracteriza o padrão geográfico de Eficiência de Localização de descargas atmosféricas da configuração de sensores: se o mapa foi uniforme, a rede detectou os raios da mesma maneira em todo o continente; se o padrão apresentou zonas com Taxa de Localização mais baixa, a detecção da rede era menor naquelas zonas e, inversamente.

Além disso, algumas combinações com poucos sensores tinham zonas geográficas específicas com uma Taxa de Localização maior, associados então a um nível de detecção maior que outras combinações de sensores em algumas configurações (exemplo Figura 48b). Consequentemente, estas combinações foram chamadas de Combinação Chave nesta zona.

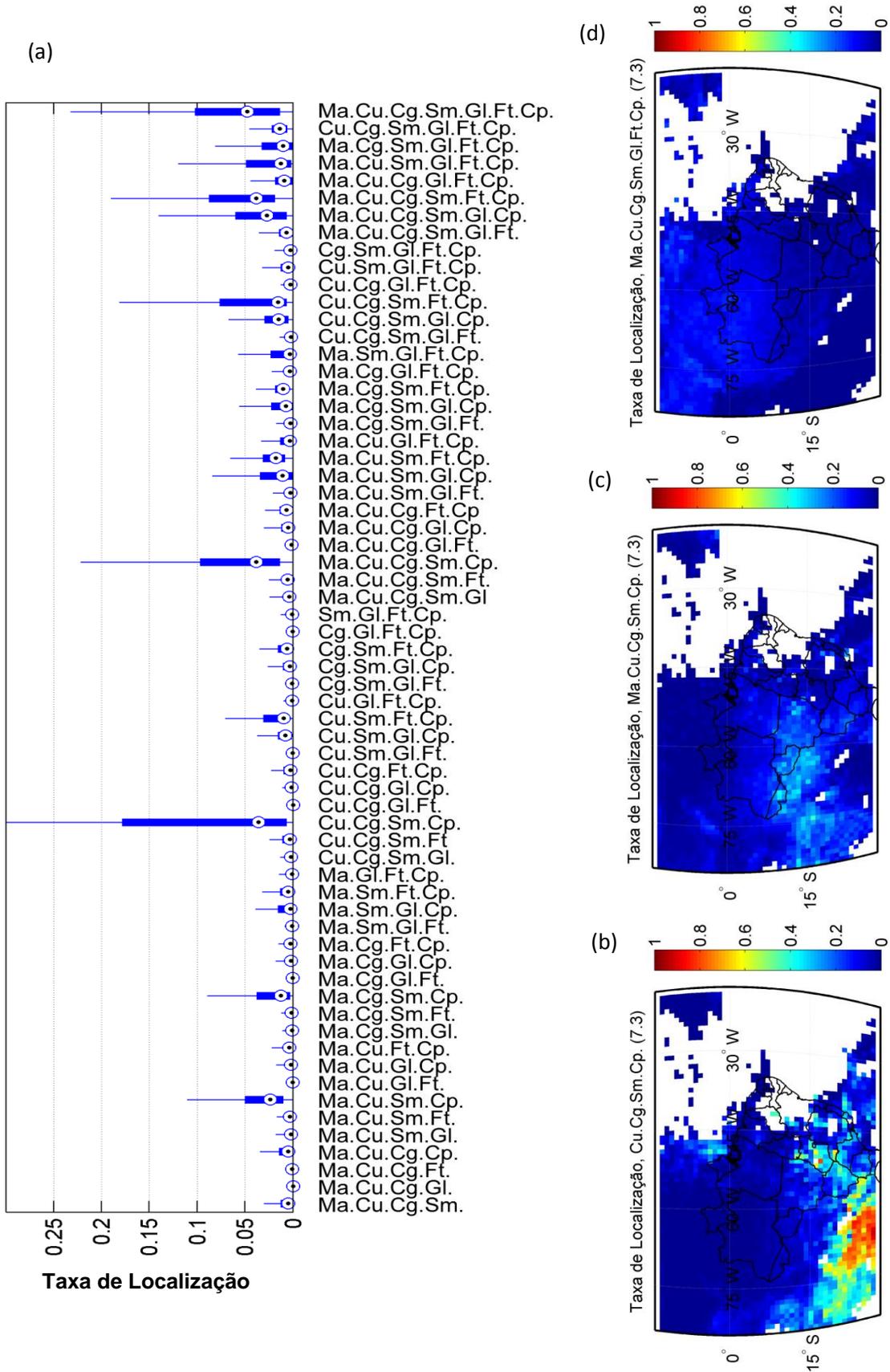
Por exemplo, na configuração ‘7.3’ (Figura 48a), todas as 64 combinações de sensores participaram na localização mesmo se a maioria delas (49/64 combinações)

tinha uma participação muito baixa com média menores que  $1/n_{c_K} = 1/64 = 0,0156$ . As combinações com as médias mais baixas foram as combinações com 4 ou 5 sensores que combinam os sensores de Guadalupe e/ou Fortaleza, confirmando que a Eficiência de Detecção destes dois sensores foi menor do que os outros sensores. Ao contrario, algumas combinações com 4 sensores se destacaram, devido às zonas do continente onde elas estavam como uma Combinação Chave e onde alguns dos outros sensores da configuração não podiam enxergar: por exemplo, no mapa da combinação ‘Cu.Cg.Sm.Cp’ aparece, no sudoeste, a zona onde os sensores de Manaus, Guadalupe e Fortaleza tinham uma Eficiência de Detecção baixa (Figura 48b). A combinação com 5 sensores ‘Ma.Cu.Cg.Sm.Cp’ (sem Guadalupe e Fortaleza) também se destacou assim que as duas combinações com 6 sensores ‘Ma.Cu.Cg.Sm.Gl.Cp’ e ‘Ma.Cu.Cg.Sm.Ft.Cp’ (sem Guadalupe ou sem Fortaleza), mas com menos contrastes. Contudo mesmo se algumas combinações se destacaram os valores médios dos mapas ficaram baixos com um máximo de 0,13 para a combinação ‘Cu.Cg.Sm.Cp’, seguida por o valor médio de 0,07 para a combinação ‘Ma.Cu.Cg.Sm.Cp’. A combinação com 7 sensores tinha uma taxa mais alta no Norte que mostra um leve desequilíbrio da Eficiência de Localização no norte do continente devido à deficiência dos sensores de Guadalupe e Fortaleza. Contudo o padrão de detecção da configuração ‘7.3’ apareceu com uma distribuição razoavelmente uniforme (Figura 48d).

Na configuração ‘6.2’ com 6 sensores ativos (Figura 49a), todas as 22 combinações de sensores também participaram na localização. Contudo, a maioria das combinações (15/22) ficou com uma Taxa de Localização muito baixa, com valores médios menores que  $1/n_{c_K} = 1/22 = 0,045$ . Como tinham somente 6 sensores ativos, todas as combinações com 4 sensores (exceto a ‘Cu.Cg.Sm.Cp’) incluíram o sensor de Guadalupe ou de Fortaleza. As três combinações mais baixas (média < 0,01) foram aquelas que combinam os sensores de Guadalupe e de Fortaleza. Neste contexto se destacou a combinação ‘Cu.Cg.Sm.Cp’ que virou uma Combinação Chave no sul do continente e nas bordas oeste do mapa (Figura 49b). A deficiência do sensor de Guadalupe no sudeste apareceu também no mapa da combinação ‘Cu.Cg.Sm.Ft.Cp’ (Figura 49c). Contudo o mapa da combinação com 6 sensores (o máximo) ficou globalmente uniforme (Figura 49d).

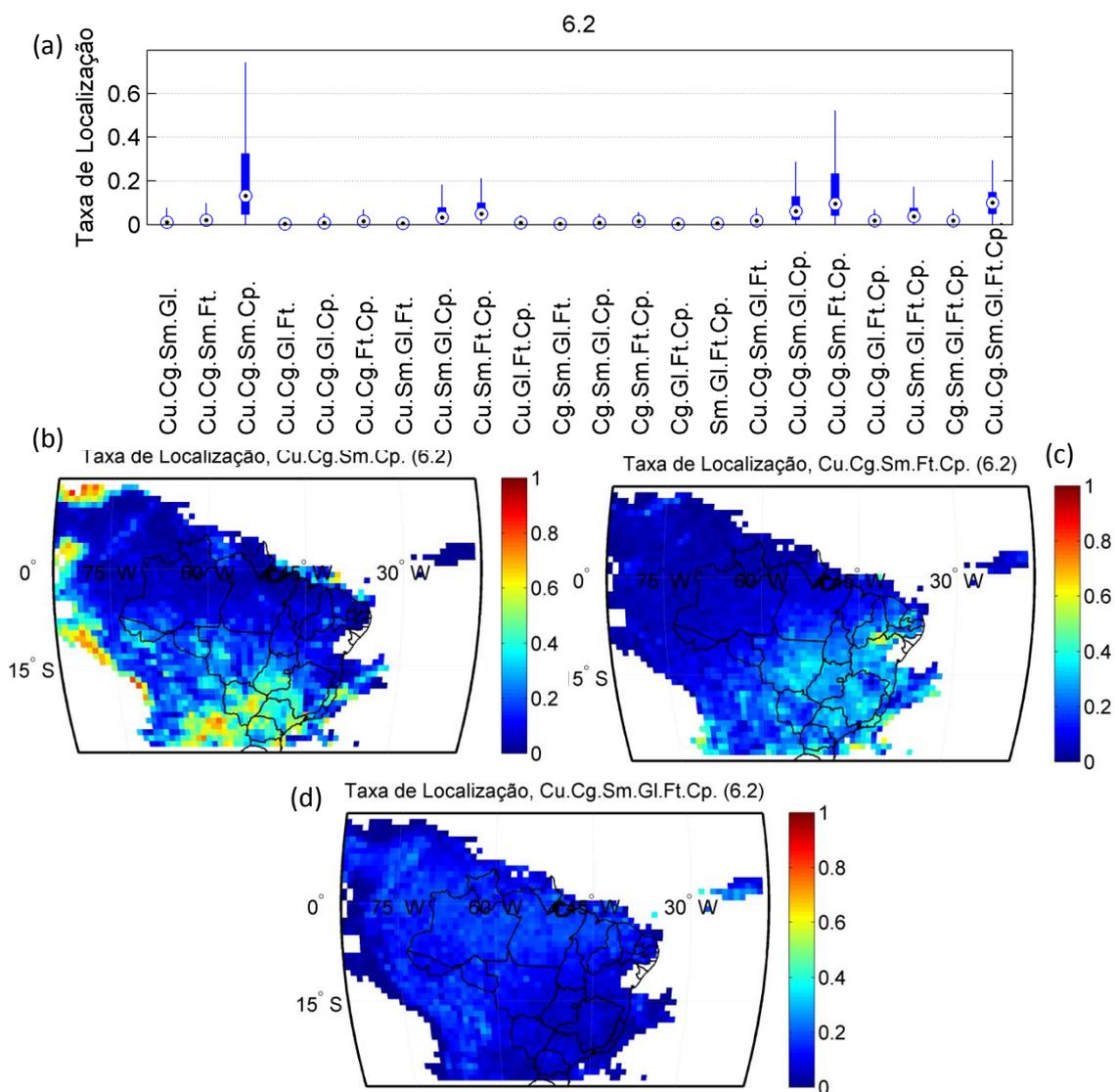
Na configuração '5.2' com 5 sensores ativos (Figura 50a), todas as 6 combinações de sensores participaram na localização e 3 combinações tinham uma média  $\langle 1/n_{c_K} \rangle = 1/6$  ( $=0,17$ ). Diminuindo o número de sensores ativos, aumentou os contrastes entre as Taxas de Localizações das várias combinações de sensores porque mais combinações viraram Combinação Chave em zonas do continente onde as outras combinações estão deficientes: por exemplo, a combinação 'Cg.Sm.Gl.Cp' mostrou a deficiência do sensor de Fortaleza na fronteira do Brasil e da Guiana Francesa assim como no Oeste do continente (Figura 50b); a combinação 'Cg.Sm.Ft.Cp' mostrou a deficiência do sensor de Guadalupe no Sudeste do continente (Figura 50c). Concomitantemente, a combinação com 5 sensores (o máximo) apresentou uma distribuição geográfica menos uniforme com zonas baixas de Taxas de Localização (Figura 50d). Esta combinação tinha o valor médio mais alto (0,34).

Figura 48 - Taxa de Localização da configuração '7.3'.



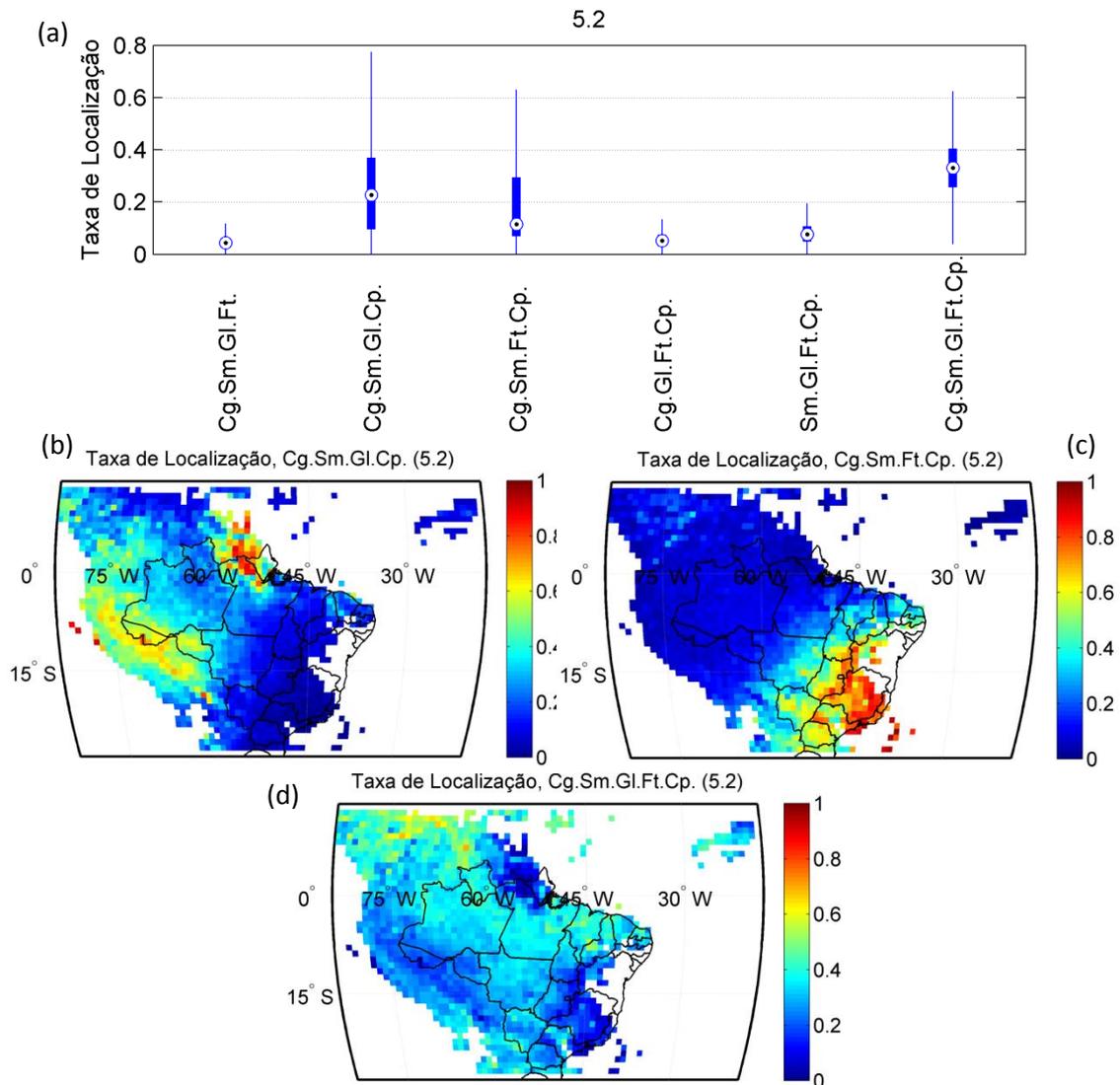
Fonte: do auto

**Figura 49** - Taxa de Localização da configuração '6.2'.



Fonte: do autor

**Figura 50** - Taxa de Localização da configuração '5.2'.



Fonte: do autor

## 4.7 Conclusão

O desempenho da rede STARNET em função da configuração (definida como a combinação das estações em operação) foi avaliado estatisticamente através o calculo de vários parâmetros como: a densidades de raios, para comparar o nível de detecção das configurações da rede em função do numero de sensores ativos; a Taxa de Participação dos sensores ativos para avaliar a eficiência relativa de um sensor dentro de uma configuração da rede; o número médio de sensores que participam na solução de localização para avaliar o comportamento de uma configuração de sensor da rede; e a

Taxa de Localização das combinações de sensores, para avaliar a eficiência relativa de uma combinação de sensores dentro de uma configuração da rede.

A exploração estatística das configurações estáveis mostrou que:

- O nível de detecção da rede STARNET é muito afetado pelas falhas de sensores ativos principalmente quando apenas 4 sensores estão funcionando;
- A Eficiência de Detecção dos sensores disponíveis da rede apresenta grandes variações espaciais; então a perda de um sensor de alta eficiência (como o sensor de São Martinho) numa zona, tem um impacto maior na Eficiência de Localização da rede do que a perda de um sensor fraco (como o sensor de Fortaleza ou pior o sensor de São Paulo Test);
- Cada sensor tem um padrão de detecção próprio; então cada combinação de sensores tem um padrão de participação na detecção próprio. A Eficiência de Localização da rede numa configuração se relaciona à Eficiência de Localização das várias combinações de sensores. Então, os resultados estatísticos de Taxa de Localização podem ser usados para construir um modelo de uniformização dos níveis de detecção da rede em função das estações ativas da rede.

## Capítulo 5 - MODELO DE UNIFORMIZAÇÃO

O capítulo 5 apresenta o modelo de uniformização. O objetivo do modelo de uniformização é de corrigir o nível de detecção de cada configuração de sensores da rede em relação a uma configuração de Referencia.

Para construir o modelo de uniformização supõe-se que cada sensor tem um padrão de detecção estável, então cada combinação de sensores tem um padrão de participação na detecção estável. Além disso, cada descarga atmosférica é detectada por vários sensores, mas localizada por uma única combinação de sensores. Então, o padrão de localização de uma configuração da rede se relaciona ao padrão de participação de suas combinações de sensores. O modelo é baseado nos resultados estatísticos das configurações da rede estáveis (Capítulo 4) para encontrar uma relação estatística entre a Eficiência de Detecção da Configuração de Referencia escolhida e as outras configurações identificadas na base de dados. Essa relação é avaliada através do calculo dos **Fatores de Localização** entre duas configurações da rede e o **Fator de Uniformização** entre a melhor configuração da rede a as outras configurações identificadas na base de dados. Assim, esse modelo de uniformização responde ao problema de serviço intermitente dos sensores observados nos Diagramas de Operação (Capítulo 3) e se adapta ao problema dos padrões próprios de detecção de cada sensor da rede (Capítulo 4).

O capítulo divide-se em 2 partes:

1. A primeira parte trata de **construção do modelo** calculando-se os **Fatores de Localização** entre duas configurações (detalhando os casos das configurações incluídas e com configuração ponte), encerrando com o cálculo do **Fator de Uniformização** para cada configuração;
2. A segunda parte apresenta os resultados do modelo com os Mapas de **Fator de Uniformização** entre a melhor configuração da rede a as outras identificadas na base de dados e os resultados intermediários de **Fatores de Localização** das configurações incluídas ou das configurações com configuração ponte;

## 5.1 Construção do modelo de uniformização

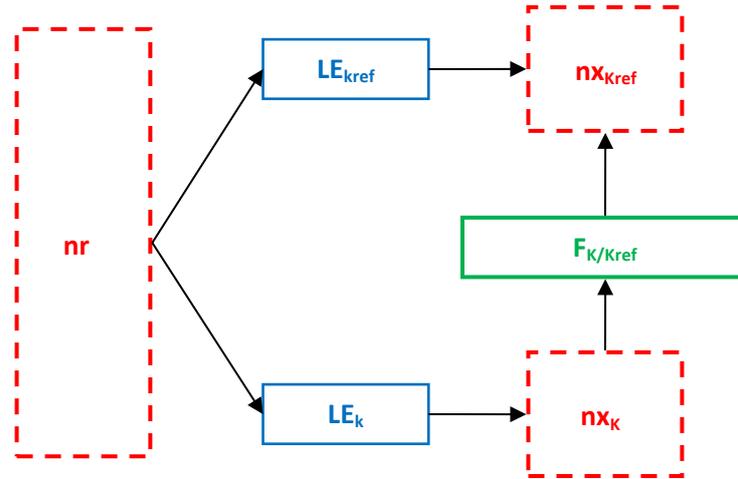
Esta parte trata da construção e do método de validação do modelo de uniformização das densidades de raios. O objetivo é de calcular os mapas de **Fator de Uniformização** para cada configuração identificada na base de dados em relação a uma **configuração de referencia única**. O modelo de uniformização é baseado no fato que no caso de uma configuração **K** incluída numa configuração **Kref**, existe uma relação entre o Fator de Localização entre duas configurações inclusivas e as Taxas de Localização das combinações de sensores da Configuração de Referencia. O modelo de uniformização é construído a partir dos resultados estatísticos das Taxas de Localização das combinações de sensores de Configurações estáveis usadas como configurações de referencia.

### 5.1.1 Fator de Localização entre duas configurações

O **Fator de Localização** de uma configuração da rede **K** em relação a uma melhor configuração da rede com mais sensores ativos **Kref** é definida como o razão das Eficiências de Localização das duas configurações. Um esquema do Fator de Localização é apresentado Figura 51.

$$\begin{aligned} F_{K/Kref}(lat, lon) \\ = nx_K(lat, lon)/nx_{Kref}(lat, lon) = LE_K(lat, lon) \\ /LE_{Kref}(lat, lon) \end{aligned} \quad (16)$$

**Figura 51** - Esquema do Fator de Localização entre duas configurações da rede.



Fonte: do autor

### 5.1.2 Fator de Uniformização

A perda de informações entre uma configuração de rede **K** e uma configuração de referencia **Kref**, com mais estações ativas, é avaliada através do **Fator de Localização** entre duas configurações.

Define-se  $\alpha_{K/Kref}$  o Fator de Uniformização entre **K** e **Kref**:

$$\alpha_{K/Kref}(lat, lon) = \frac{1}{F_{K/Kref}(lat, lon)} - 1 \quad (17)$$

Em seguida o número de descargas atmosféricas localizadas pela rede na configuração **K** pode ser uniformizado para a configuração de referencia **Kref**:

$$\begin{aligned} nx_{Kcorr}(lat, lon) &= nx_{Kref}(lat, lon) \Rightarrow nx_{Kcorr}(lat, lon) \\ &= nx_K(lat, lon) \cdot (1 + \alpha_{K/Kref}(lat, lon)) \end{aligned} \quad (18)$$

Este fator de escala permite uniformizar o banco de dados de densidade de raios da rede STARNET. No entanto, quando o número de estações ativas é inferior a quatro, a rede está cega e não registra dados de descargas atmosféricas.

### 5.1.3 Caso das configurações inclusivas

O **Fator de Localização** entre duas configurações **K** e **Kref**,  $K \subset Kref$  (necessário ao cálculo do Fator de Uniformização) pode ser avaliado através das Taxas de Localização das combinações de sensores da configuração de referencia estável **Kref** (calculadas estatisticamente). Assim, cada configuração estável pode ser usada como uma configuração de referencia para todas as suas combinações incluídas.

Se uma configuração **K** é incluída na configuração de referencia **Kref** ( $K \subset Kref$ ), o número de descargas localizadas pela configuração **K**,  $nx_K(lat,lon)$ , é igual à soma das descargas localizadas pelas combinações de **Kref** com um número de sensores comuns a K maior ou igual a 4. Estas combinações são chamadas de **Combinações Comuns** entre duas configurações inclusivas. Um esquema de duas configurações inclusivas com as combinações de sensores possíveis e comuns é apresentado Figura 52.

$C_K = \{c_{1_K}, c_{2_K}, \dots, c_{nc_K_K}\}$  é o conjunto de  $nc_K$ , número de combinações de sensores da configuração **K** e  $C_{Kref} = \{c_{1_Kref}, c_{2_Kref}, \dots, c_{nc_{Kref\_Kref}}\}$ , o conjunto de  $nc_{Kref}$ , número de combinações de sensores da configuração **Kref**. Define-se  $CC_{K/Kref}$  o conjunto de  $Ncc_{K/Kref}$ , número de Combinações Comuns entre K e Kref:

$$CC_{K/Kref} = \{c_{m\_Kref} / (c_{m\_Kref} \cap c_{m\_K}) \geq 4\}$$

Si  $na_{kref} = 7$  sensores ativos ( $nc_{Kref} = 64$ ) e  $na_k = 4$  sensores ativos ( $nc_K = 4$ ), então  $ncc_{K/ref} = 8$ ; Si  $na_{kref} = 7$  e  $na_k = 5 \Rightarrow ncc_{K/ref} = 24$ ; Si  $na_{kref} = 7$  e  $na_k = 6 \Rightarrow Ncc_{K/ref} = 44$ ;

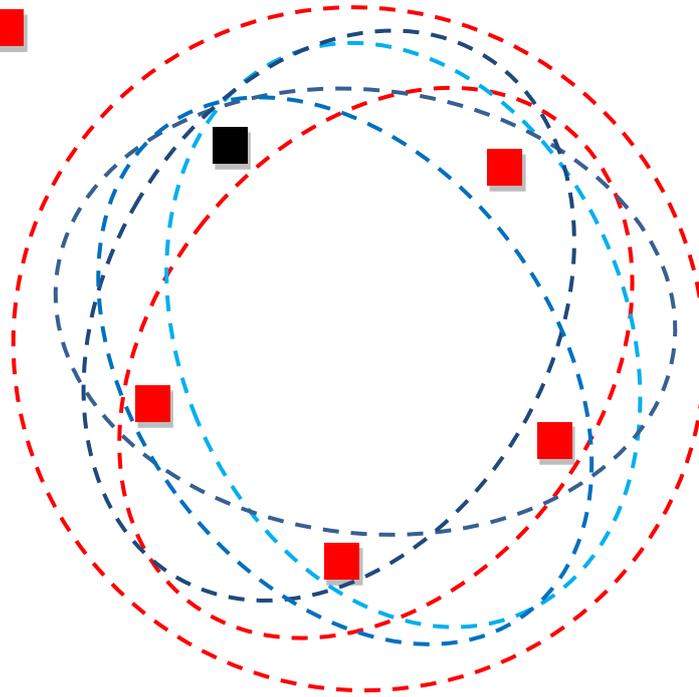
$$\begin{aligned} nx_K &= \sum_m (Nx_{Kref\_cm}(lat, lon) / c_{m\_Kref} \in CC_{K/Kref}) \\ &= \sum_m (L_{cm\_Kref} / c_{m\_Kref} \in CC_{K/Kref}) \cdot nx_{Kref} \end{aligned} \quad (19)$$

Em seguida,

$$F_{K/Kref} = nx_K / nx_{Kref} = \sum_m (L_{cm\_Kref} / c_{m\_Kref} \in CC_{K/Kref}) \quad (20)$$

$$K_{ref} = 1 \blacksquare + 4 \color{red}\blacksquare$$

$$K = 4 \color{red}\blacksquare$$



Em pontilhados as combinações de sensores de $K_{ref}$ que localizam descargas atmosféricas	Em pontilhados vermelhos as combinações de sensores de $K_{ref}$ que podem localizar as mesmas descargas do que de $K$
---	--

**Figura 52** - Esquema de configuração inclusiva com combinações de sensores comuns.

#### 5.1.4 Caso das configurações com Configuração Ponte

Define-se  $K_{ponte}$  a configuração comum entre a configuração  $K_1$  e a configuração  $K_2$ :  $K_{ponte} = K_1 \cap K_2$ . Se  $N_{na_{K_{ponte}}} \geq 4$ ,  $K_{ponte}$  é chamada de **Configuração Ponte**. Um esquema de configuração inclusiva é apresentado Figura 53.

$$K_{ponte} \subset K_1 \Rightarrow F_{K_{ponte}/K_1} = \frac{N_{x_{K_{ponte}}}}{N_{x_{K_1}}} \tag{21}$$

$$= \sum_m (L_{cm_{K_1}} / c_{m_{K_1}} \in C_{C_{K_{ponte}/K_1}})$$

$$\begin{aligned}
K_{ponte} \subset K_2 &\Rightarrow F_{K_{ponte}/K_2} = \frac{n\chi_{K_{ponte}}}{n\chi_{K_2}} \\
&= \sum_m (L_{cm\_K_2} / c_{m\_K_2} \in C_{C_{K_{ponte}/K_2}})
\end{aligned} \tag{22}$$

o **Fator de Localização** entre K2 e K1:

$$F_{K_2/K_1} = \frac{n\chi_{K_1}}{n\chi_{K_2}} = \frac{F_{K_{ponte}/K_2}}{F_{K_{ponte}/K_1}} = \frac{\sum_m (L_{cm\_K_1} / c_{m\_K_1} \in C_{C_{K_{ponte}/K_1}})}{\sum_m (L_{cm\_K_2} / c_{m\_K_2} \in C_{C_{K_{ponte}/K_2}})} \tag{23}$$

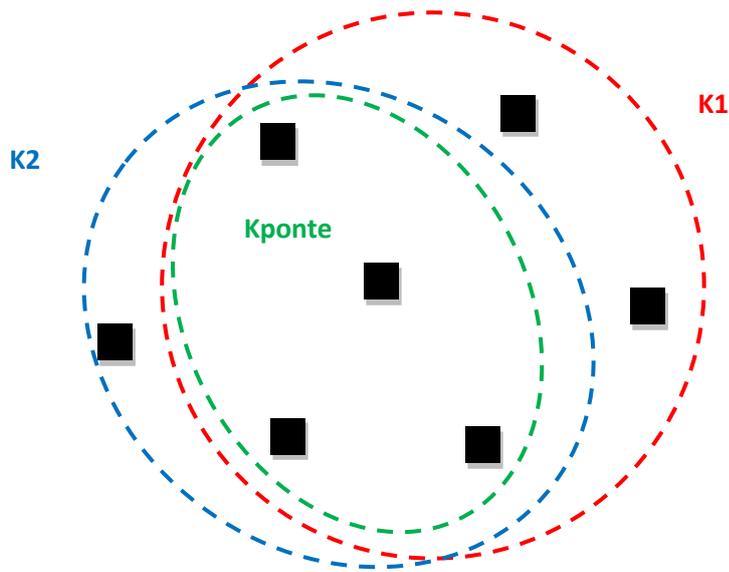
Seja **Kref** a Configuração de referencia estável da rede, **K** uma configuração incluída em **Ksec**, outra configuração de Referencia estável da rede chamada de configuração Secundaria; então se pode calcular o Fator de localização de **K** em relação à **Kref** a traves de **Kponte**, a configuração ponte entre **Kref** e **Ksec**; Se (**Kponte** = **Kref**  $\cap$  **Ksec**)  $\wedge$  (**K**  $\subset$  **Ksec**) então:

$$F_{K/Kref} = F_{K/Ksec} \cdot F_{Ksec/Kref} = \frac{F_{K/Ksec} \cdot F_{Kponte/Ksec}}{F_{Kponte/Kref}} \tag{24}$$

Se **Kref** e **Ksec** são duas configurações estáveis da rede, se podem calcular estatisticamente as Taxas de Localização das suas combinações de sensores ativos  $L_{cm\_Kref}$  e  $L_{cm\_Ksec}$ , então:

$$\begin{aligned}
&F_{K/Kref} \\
&= \frac{\sum_m (L_{cm\_Ksec} / c_{m\_Ksec} \in C_{C_{K/Ksec}}) \cdot \sum_m (L_{cm\_Ksec} / c_{m\_Ksec} \in C_{C_{Kponte/Ksec}})}{\sum_m (L_{cm\_Kref} / c_{m\_Kref} \in C_{C_{Kponte/Kref}})}
\end{aligned} \tag{25}$$

**Figura 53** - Esquema de configuração ponte.

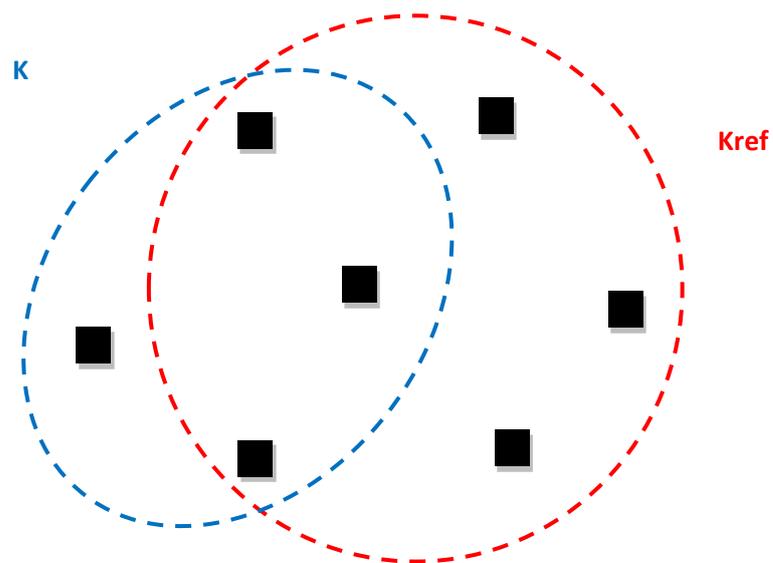


Fonte: do autor

### 5.1.5 Caso das Configurações isoladas

Define-se como configuração isolada, uma configuração que não está inclusiva em nenhuma das configurações estáveis da rede ou cuja Configuração de Referência Secundária não tem nenhuma Configuração Ponte com a Configuração de Referência da rede (Figura 54).

**Figura 54** - Esquema de configurações isoladas.



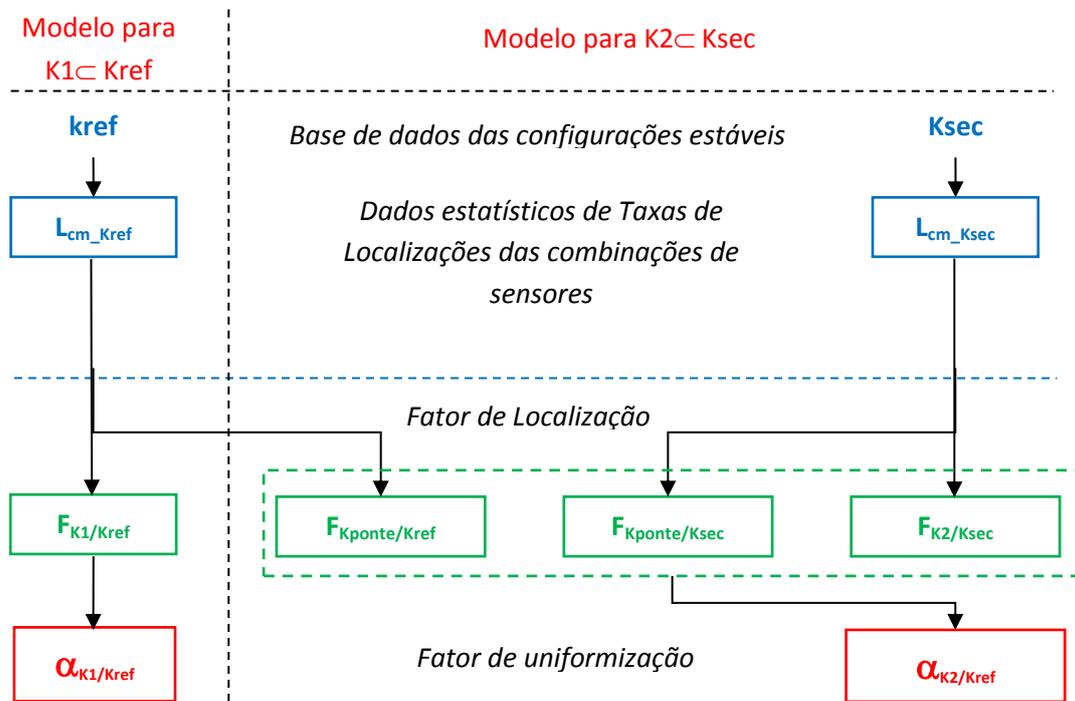
Fonte: do autor

Então não se pode calcular o seu Mapa de Fator de Uniformização a partir das Taxas de Localização das combinações de sensores de uma configuração de referencia. Neste caso se busca a configuração com Fator de Uniformização mais próximo.

### 5.1.6 Esquema do modelo de uniformização

Para todas as configurações estáveis identificadas na base de dados pode-se calcular estatisticamente as Taxas de Localização das combinações de sensores. Então, seguindo o esquema da Figura 55, o modelo permite calcular o Fator de Uniformização em relação a uma configuração estável de referencia única  $K_{ref}$  de todas as configurações da rede de tipo  $K_1$  ou  $K_2$  incluídas numa configuração estável  $K_{ref}$  ou  $K_{sec}$ .

Figura 55 - Esquema do modelo de uniformização.



Fonte: do autor

## 5.2 Resultados do modelo de uniformização

Escolhe-se entre as configurações estáveis uma única configuração de referência da rede; Se calculam os Mapas de **Fator de Uniformização** com dois métodos descritos no esquema da metodologia (Capítulo 4): uma para as configurações incluídas na configuração de referencia única; e a outra para as configurações incluídas numa outra

configuração estável que têm uma configuração Ponte com a configuração de referencia escolhida.

Por isso, calculam-se primeiro os mapas de **Fator de Localização** entre as configurações estáveis da rede e as outras configurações identificadas na base de dados a partir dos mapas de Taxas de Localização das combinações de sensores das configurações estáveis. Depois se calculam os Fatores de Localização entre a configuração de referencia escolhida e as outras configurações estáveis através das configurações Ponte. Por fim apresentam-se os Mapas de Fator de Uniformização para cada configuração (exceto as configurações isoladas).

### 5.2.1 Fator de Localização entre configurações inclusivas

Para as **136** configurações da rede identificadas **K** se buscaram uma **Configuração de Referencia** na lista das configurações estáveis **Kref** tal que  $K \subset Kref$ . Os resultados mostram que **40** configurações foram incluídas na configuração estável '7.3'; **18** foram incluídas na configuração estável '7.6'; **29** foram incluídas na configuração estável '7.9'; **11** foram incluídas na configuração estável '6.1'; e **8** na configuração estável '6.21'.

Então **111** configurações entre as 136 identificadas tinham uma configuração estável de referencia e **25** não tinham (elas são chamadas de configurações isoladas); destas três configurações possuíam 8 sensores ativos, 6 outras configurações possuíam 7 sensores ativos, 9 configurações possuíam 6 sensores ativos e 7 configurações possuíam 5 sensores ativos.

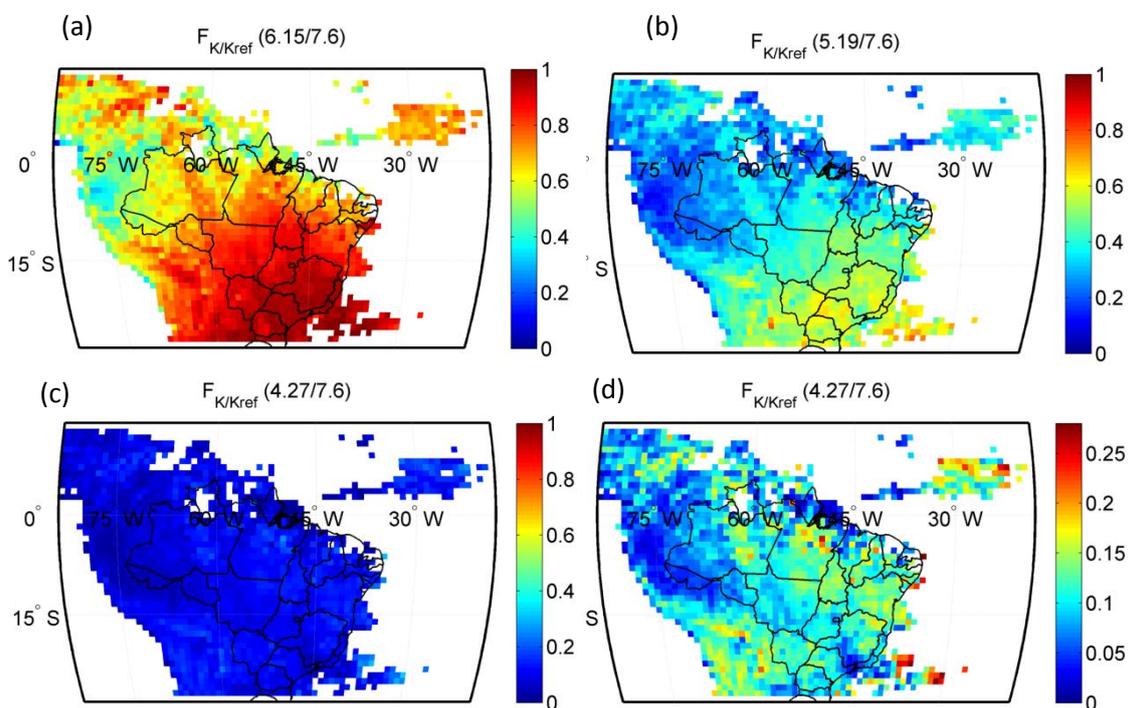
Foram então calculados os **Mapas de Fator de Localização** de  $K/Kref$  para todas as configurações incluídas em relação a sua Configuração de Referencia com uma resolução de 100 x 100 km nos pixels onde a densidade de raios foi maior que 0,01 Sferics/km<sup>2</sup>. Os Mapas de Fator de Localização são calculados a partir das **Taxas de Localizações** das **5 Configurações de Referencias** estáveis. Apresenta-se na Figura 56, três exemplos de Mapas de Fator de Localização referidos à Configuração de Referencia estável '7.6': '6.15'/'7.6'; '5.19'/'7.6'; e '4.27'/'7.6'. Os mapas mostram um alto Fator de Localização nas zonas onde as duas configurações tinham um comportamento similar. Ao contrario, as zonas com Fator de Localização baixo correspondem a zonas

onde a Eficiência de Localização da configuração **K** foi menor do que na Configuração de Referência **Kref**.

Por exemplo, a configuração '6.15' ('Ba.Ma.Cg.Sm.Ft.Cp') tinha 6 sensores ativos comuns com a configuração '7.6': esta configuração ('7.6') tinha um sensor a mais (Guadalupe). Então as zonas de Fator de Localização baixo caracterizam as zonas onde o sensor de Guadalupe tinha uma Eficiência de Detecção alta ou onde a configuração '6.15' tinha uma perda da Eficiência de Localização da rede maior (Figura 56a). Assim, no Sul onde a Eficiência de Detecção de Guadalupe estava baixa, o Fator de Localização das configurações ficou alto. O Fator de Localização médio do mapa '6.15'/'7.6' foi de 0,76.

Ao contrario, a configuração '5.19' tinha dois sensores ativos a menos do que a '7.6': Campo Grande e Guadalupe. A perda do sensor de Campo Grande fez com que o Fator de Localização diminuísse em todo o continente, mesmo no Sul (Figura 56b). O Fator de Localização médio do mapa '5.19'/'7.6' foi de 0,4. A configuração '4.2' tinha três sensores a menos do que a '7.6': Manaus, Campo Grande e São Martinho que foram três sensores de alta Eficiência de Detecção. A Rede funcionou somente com 4 sensores dos quais 3 eram fracos: Brasília, Guadalupe e Fortaleza. Concomitantemente, a perda de detecção da rede nesta configuração foi muito elevada com um Fator de Localização médio de 0,1 (Figura 56c). Modificando a escala de cor do Fator de Localização médio de '4.27'/'7.6', aparecem as zonas com perda de detecção maior como, por exemplo, no noroeste do continente (Figura 56d).

**Figura 56** - Exemplos de Mapas de Fator de Localização.



Fonte: do autor

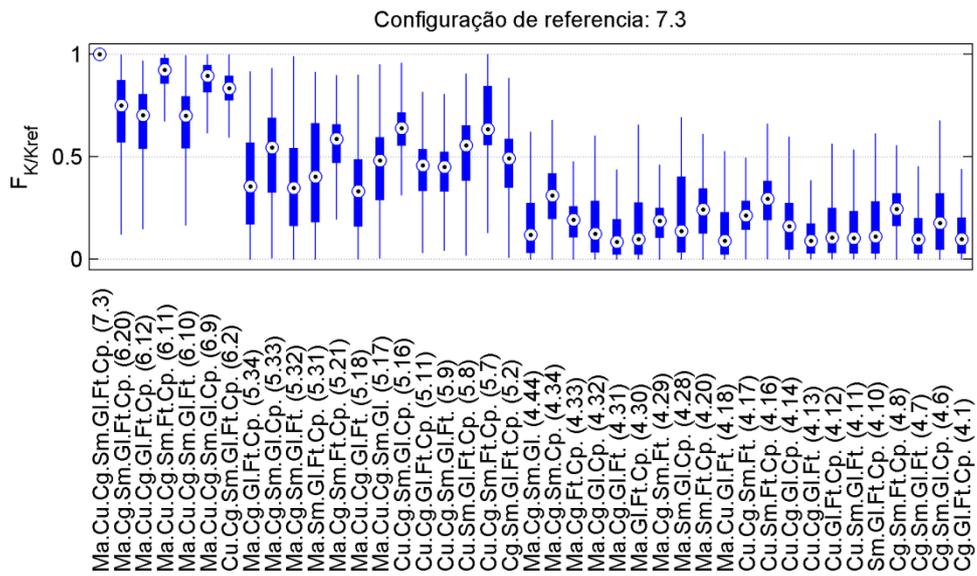
Depois se apresenta, para cada Configuração estável de referencia, uma comparação estatística entre todos os mapas de Fator de Localização das configurações não isoladas, na forma de Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983): Figura 57 para a configuração '7.3'; Figura 58 para a '7.66', Figura 59 para a '7.9'; Figura 60 para a '6.1'; e Figura 61 para a '6.21'. De maneira geral, as configurações com um mesmo número de sensores ativos tinham valores médios de Fator de Localização da mesma ordem. Depois aparecem variações em função da Eficiência de Detecção dos sensores ativos das várias configurações.

No caso da configuração de Referencia '7.3', os mapas de Fatores de Localização das configurações com 6 sensores ativos apresentaram um valor médio maior e um desvio padrão mais baixo quando faltava um sensor de baixa Eficiência de Detecção na configuração a ser uniformizada, por exemplo: Guadalupe na '6.11'; Fortaleza na '6.9'. Ao contrario o Fator de Localização ficou baixo quando um Sensor Chave faltava numa zona geográfica, por exemplo: quando faltava o sensor de São Martinho na '6.12' ou de Curitiba na '6.20'. Os Mapas de Fator de Localização que tinham os menores valores médios de Fatores de Localização foram as configurações com 4 sensores ativos (que combinam os sensores de Guadalupe e Fortaleza).

Os resultados com as configurações de Referencias '7.6' e '7.9' foram similares aos resultados com a configuração de Referencia '7.3'. Contudo, após o cálculo dos Fatores de Localização, a configuração mais similar a '7.6' era a configuração '6.16' (a '7.6' menos o sensor de Cachoeira Paulista) com um valor médio de 0,79 e a mais diferente era a configuração '4.27' (a '7.6' menos os sensores de Manaus, Campo Grande e São Martinho) com um valor médio de 0,1. As configurações mais similares a '7.9' eram as configurações '6.28' (a '7.6' menos o sensor de Campo Grande) e '6.24' (a '7.6' menos o sensor de Brasília) com respectivamente os valores médios de 0,91 e 0,88. A configuração mais diferente da '7.9' era a configuração '4.22' (a '7.6' menos os sensores de São Paulo, Manaus, e Cachoeira Paulista) com um valor médio de 0,09. Os resultados para a configuração de Referencia '6.1' mostram que a configuração mais próxima era a '5.5' (a '6.1' menos o sensor de Fortaleza) e a configuração a mais diferente era a '4.3' (a '6.1' menos os sensores de São Martinho e Cachoeira Paulista menos).

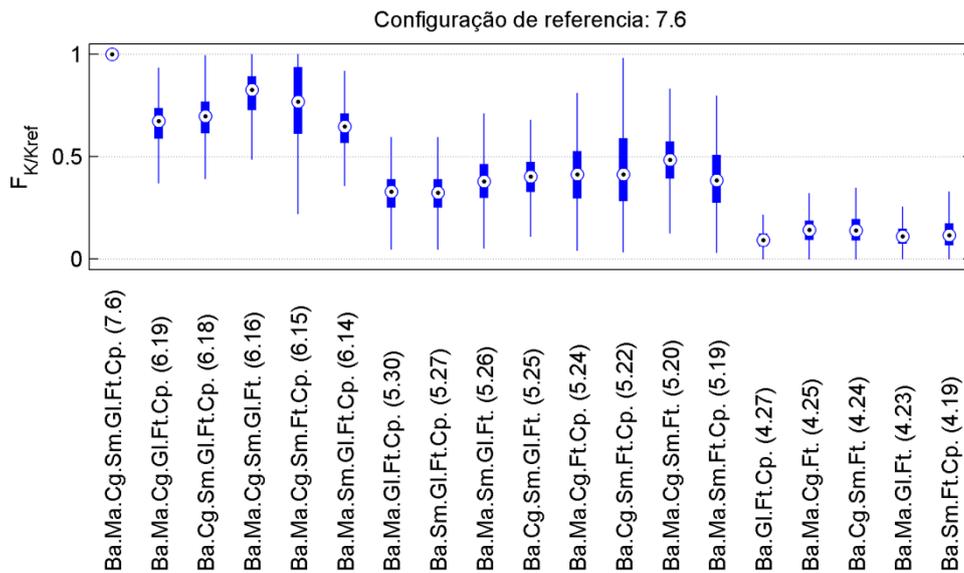
Comparando os resultados estatísticos das configurações de referencias com 7 sensores ativos com as Configurações de Referências com 6 sensores ativos se observa que os Fatores de Localização entre  $K$  e  $K_{ref}$  são melhores quando  $n_{K_{ref}}=7$  e  $n_K=6$  que quando  $n_{K_{ref}}=6$  e  $n_K=5$ . Da mesma maneira os Fatores de Localização entre  $K$  e  $K_{ref}$  são melhores quando  $n_{K_{ref}}=7$  e  $n_K=5$  que quando  $n_{K_{ref}}=6$  e  $n_K=4$ . Este resultado mostra que a perda de um sensor quando se tem 6 sensores ativos na rede é mais importante que a perda de um sensor quando a rede tem 7 sensores ativos. Também a perda de 2 sensores, quando tem 7 sensores ativos na rede, é muito mais importante que a perda de 2 sensores, quando tem 6 sensores ativos na rede.

**Figura 57** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.3'.



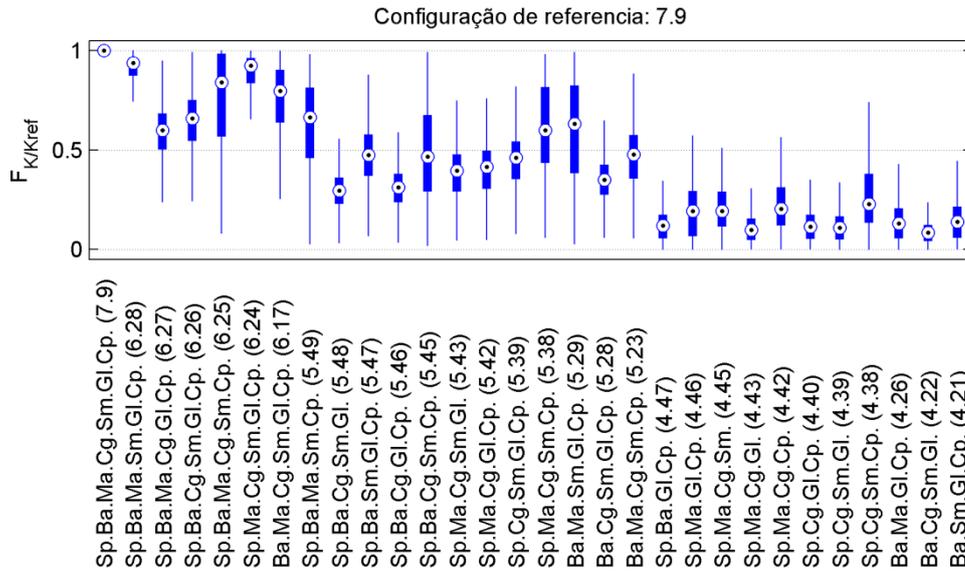
Fonte: do autor

**Figura 58** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.6'.

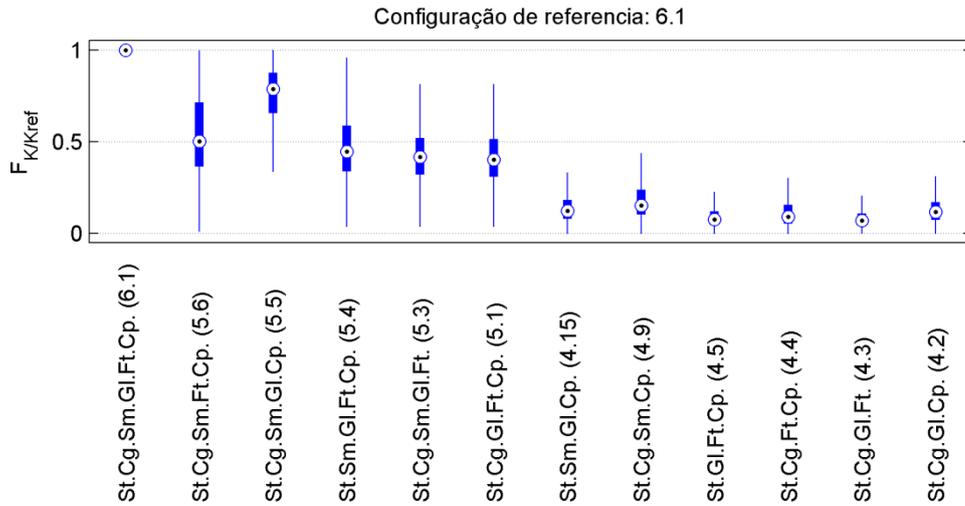


Fonte: do autor

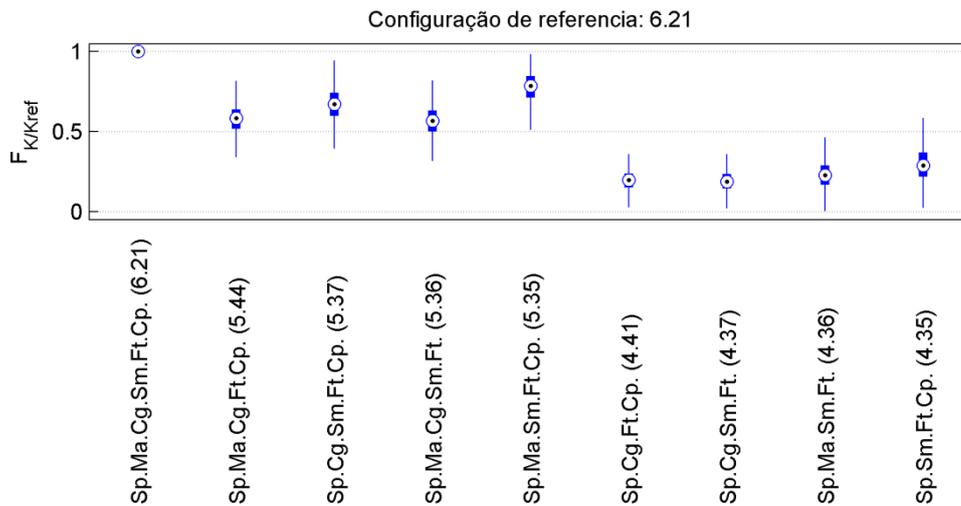
**Figura 59** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '7.9'.



**Figura 60** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração '6.1'.



**Figura 61** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização à configuração ‘6.21’.



Fonte: do autor

### 5.2.2 Configurações Ponte e Taxa de Uniformização

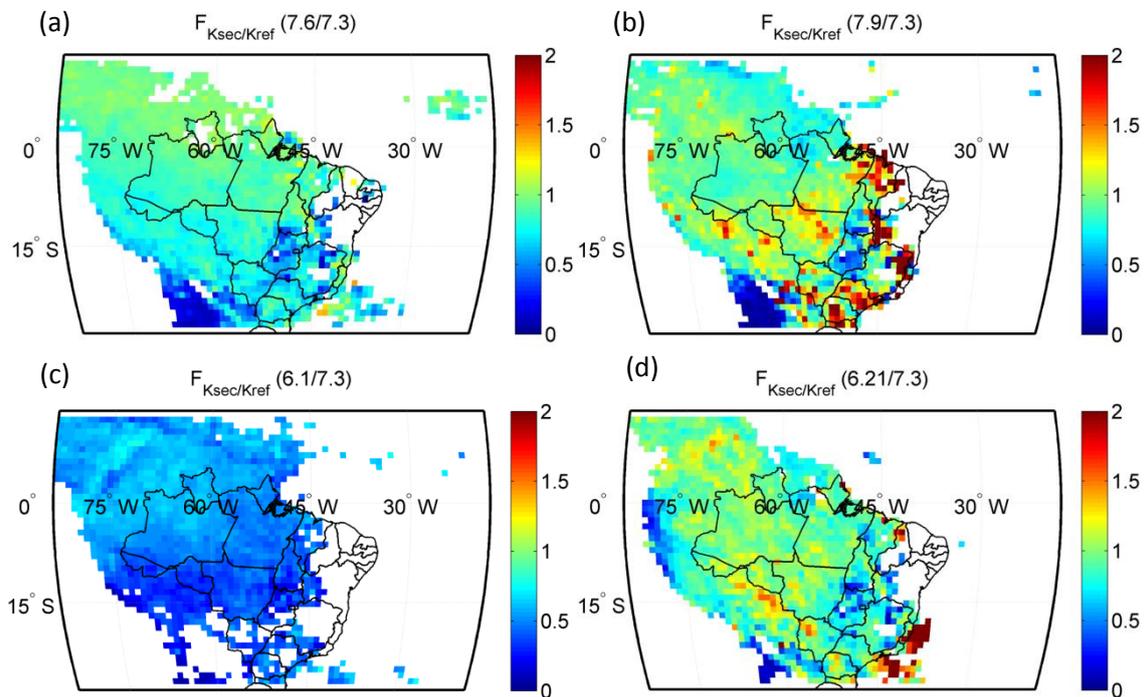
Escolhe-se a configuração estável ‘7.3’ como **Configuração de Referência única da Rede** porque ela tem o máximo de configurações incluídas. Precisa-se depois calcular o **Fator de Localização** entre a Configuração de Referência da Rede escolhida e as **Configurações de Referência Secundárias** (que são em consequência as outras Configurações estáveis de Referências): ‘7.6’, ‘7.9’, ‘6.1’, e ‘6.21’. As **Configurações Ponte** encontradas pelo modelo foram respectivamente: a ‘6.20’ (‘Ma.Cg.Sm.Gl.Ft.Cp’), a ‘5.33’ (‘Ma.Cg.Sm.Gl.Cp’), a ‘5.2’ (‘Cg.Sm.Gl.Ft.Cp’, também configuração estável) e a ‘5.21’ (‘Ma.Cg.Sm.Ft.Cp’, também configuração estável).

A Figura 62 apresenta os Mapas de **Fatores de Localização de Ksec/Kref** das 4 configurações secundárias calculadas a partir dos Fatores de Localização Kponte/Kref e Kponte/Ksec. Uma comparação estatística dos resultados de Fatores de Localização de Ksec/Kref é apresentada Figura 63. Observa-se que as Configurações Secundárias ‘7.6’, ‘7.9’ e ‘6.21’ foram mais similares á configuração de Referência da Rede ‘7.3’ do que a ‘6.1’. Nos mapas de Fator de Localização ‘7.9’/’7.3’ e ‘6.21’/’7.3’ aparecem zonas com valores de **Fator de Localização** >1. Neste caso, a Eficiência de Localização da rede era maior na Configuração Secundaria do que na Configuração de Referência. Observa-se que estes valores são mais altos nas bordas do cálculo. As zonas com Fator de

Localização em torno de um, correspondem a zonas onde a Configuração Secundaria era similar à Configuração de Referencia da Rede.

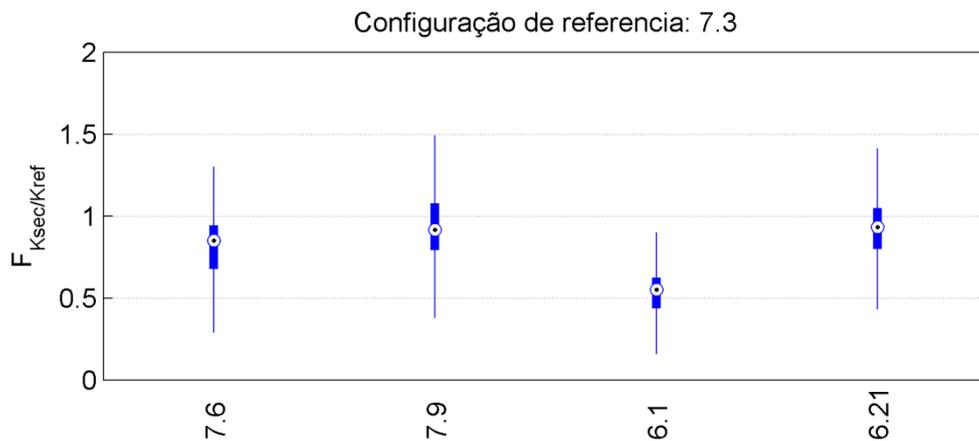
A configuração secundaria '7.6' e a configuração de referencia '7.3' tinham 6 sensores ativos em comum (a configuração ponte). Contudo, a configuração secundaria '7.6' tinha o sensor de Brasília ativo (cujo padrão de participação era baixo e caótico) em vez de Curitiba na configuração de referencia '7.3' (cujo padrão de participação era alto e quase uniforme). Então as zonas com alto Fator de Localização correspondem às zonas onde o sensor de Brasília participava (Figura 62a). A configuração secundaria '7.9' e a configuração de referencia '7.3' tinham 5 sensores em comum. Contudo, a configuração secundaria '7.9' tinha ativos os sensores de São Paulo e Brasília em vez de Curitiba e Fortaleza. Os sensores de São Paulo e Curitiba tinham um comportamento similar então, a divergência entre as duas configurações era devida a relação entre as Eficiências de Detecção dos sensores de Brasília e Fortaleza (Figura 62b). Estes dois sensores tinham uma distribuição caótica que aumentou a divergência do modelo nas zonas onde a participação de Fortaleza era alta (ver Figura 42). A configuração secundaria '6.1' e a configuração de referencia '7.3' tinham 5 sensores em comum. Contudo, a configuração secundaria '6.1' tinha o sensor de São Paulo Teste ativo (cuja participação era muita baixa) em vez de Manaus e Curitiba (Figura 62c). Neste contexto o Mapa de Fator de Localização era mais uniforme porque correspondeu à perda da combinação dos sensores de Manaus e Curitiba que tinham uma distribuição de participação complementar. A configuração secundaria '6.21' e a configuração de referencia '7.3' tinham 5 sensores em comum (a configuração ponte). Contudo, a configuração '6.21' tinha o sensor de São Paulo (cuja participação era alta no sul), em vez de Guadalupe e Curitiba. Os sensores de São Paulo e Curitiba tinham um comportamento similar então, a divergência entre estas duas configurações foi devido ao sensor de Guadalupe que participava somente no norte do continente (Figura 62d).

**Figura 62** - Mapa de Fator de Localização entre Configurações de Referência Secundaria e Configuração de Referência da Rede.



Fonte: do autor

**Figura 63** - Comparação estatística dos Mapas de Fator de Localização entre Configurações de Referência Secundaria e Configuração de Referência da Rede.



Fonte: do autor

### 5.2.3 Mapas de Fator de Uniformização

Os Mapas de Fator de Uniformização foram calculados para as 111 configurações **K** (que podem ser incluídas numa configuração estável), em relação à **Configuração de Referência da Rede Kref** ('7.3'), na região amazônica limitada entre -14° S, 5° N em latitude e -75° W, -45° W em longitude.

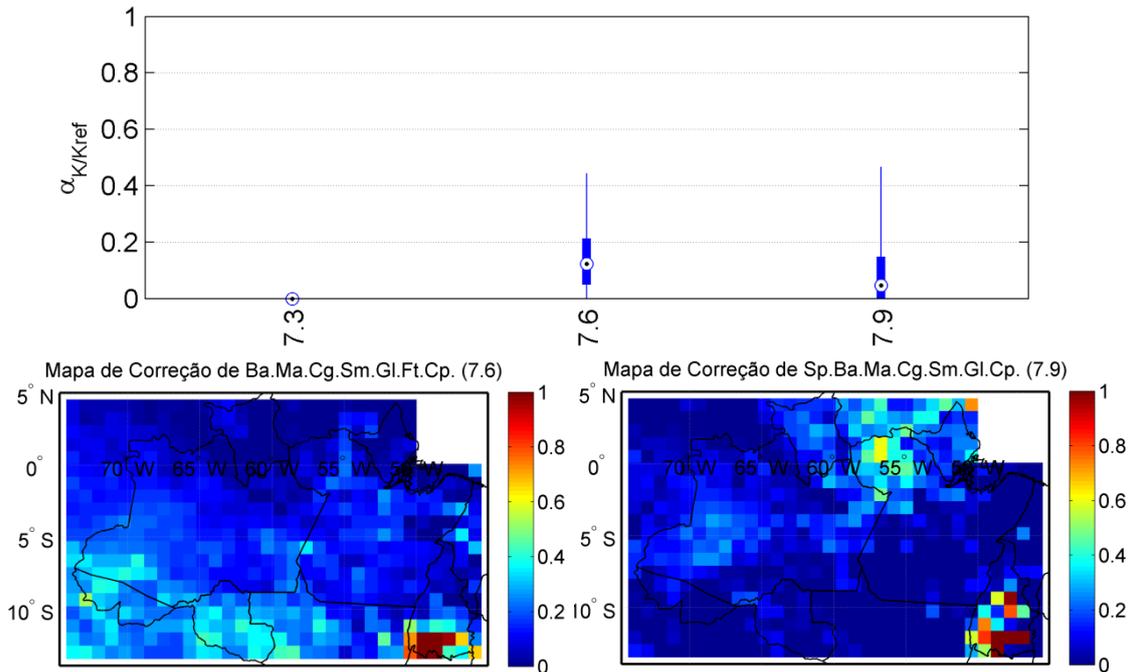
Os resultados são apresentados na forma de uma comparação estatística, de tipo Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983), entre os vários mapas de Fator de Uniformização, agrupados por um número de sensores ativos. A comparação estatística é acompanhada de dois ou três exemplos de Mapas de Fator de Uniformização: Figura 64 para as **três** configurações com 7 sensores ativos; Figura 65 para as **19** configurações com 6 sensores ativos; Figura 66 para as **42** configurações com 5 sensores ativos; e Figura 67 para as **47** configurações com 4 sensores ativos. Os buracos de dados de um Mapa de Fator de Uniformização são reproduzidos nos outros mapas de maneira a uniformizar o modelo. Neste contexto, não têm valores na parte nordeste do mapa, coberta pelos oceanos e onde a produção de descargas atmosféricas é baixa.

Nos Mapas de Fator de Uniformização, as zonas com correção baixa correspondem a zonas onde a configuração era similar a Configuração de Referência da Rede. Quando a Configuração de Referência era uma Configuração Secundária, os Mapas de Fator de Uniformização foram o resultado de uma combinação complexa de Fatores de Localização. As configurações '7.6' e '7.9' são também Configurações de Referências Secundárias, então os seus Mapas de Fator de Uniformização estão diretamente relacionadas aos mapas de Fator de Localização da Figura 62. Para estas duas configurações, os resultados mostram que a correção era baixa ( $<0.2$ ) na maior parte da região amazônica, exceto no sul do Tocantins, e no Acre; em Rondônia para a configuração '7.6', e no noroeste do Pará para a configuração '7.9'.

Os Mapas de Fator de Uniformização das configurações com 6 sensores ativos apresentam uma variabilidade maior: algumas têm um valor médio baixo ( $<0,5$ ) com um desvio padrão baixo; outras têm uma dispersão maior, como por exemplo, as configurações '6.14' e '6.25' que apresenta zonas com correção alta. Contudo todas as configurações com 6 sensores ativos têm um valor médio de correção  $<1$ . As configurações com correção mais baixa são: a configuração '6.9' que tinha os mesmos sensores do que a configuração de referência '7.3' exceto o sensor de Fortaleza; a '6.11' que tinha os mesmos sensores do que a configuração de referência '7.3' exceto o sensor de Guadalupe. A configuração com maior correção foi a configuração '6.1' que, na realidade, pode ser classificada no grupo das configurações com 5 sensores ativos devido a presença do sensor de São Paulo Teste, cuja participação era sempre muita baixa. Da mesma maneira as configurações com 5 e 4 sensores que incluem o sensor de

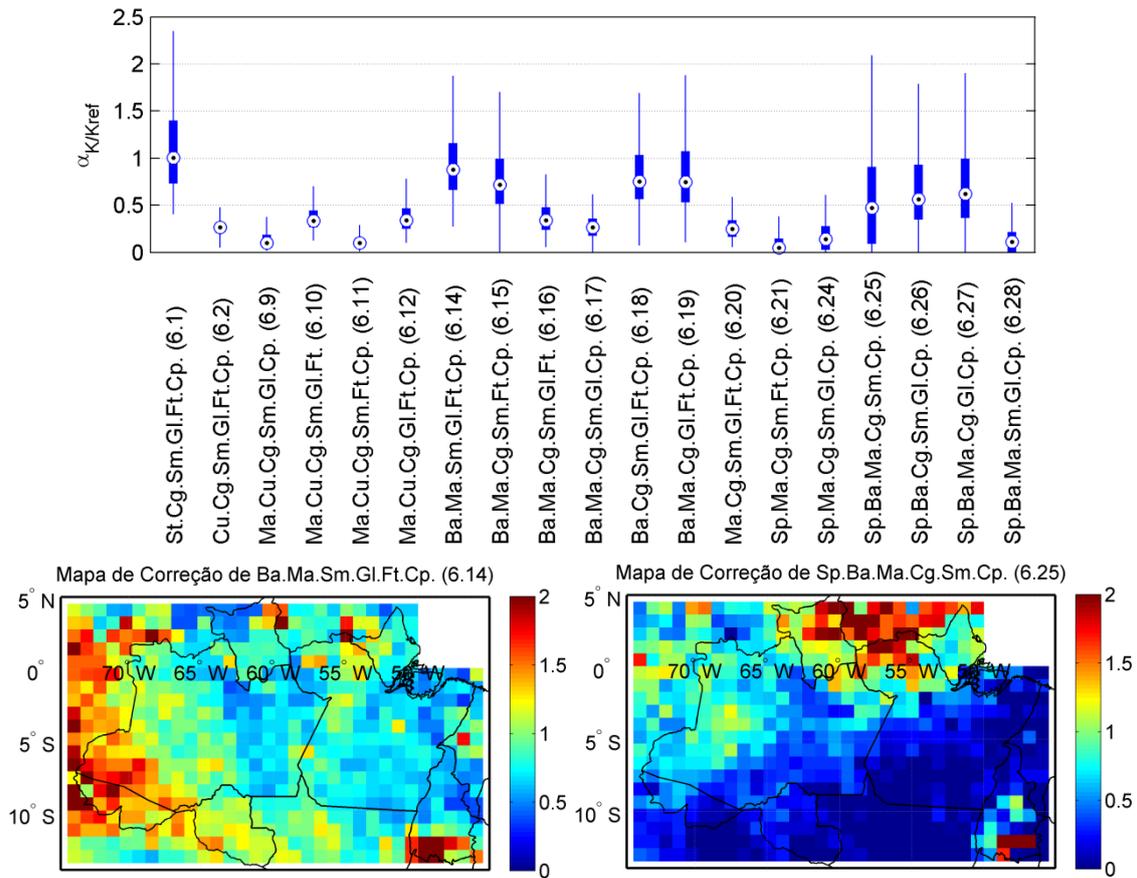
São Paulo Teste, têm uma correção muito mais alta do que as outras do mesmo grupo. Por exemplo, a configuração ‘5.3’ tem zonas com correção >10 e a ‘4.2’ tem zonas com correção >50. As configurações com somente 4 sensores ativos que combinam Brasília e Fortaleza têm também Mapas de Fator de Uniformização alto (‘5.19’, ‘5.22’, ‘5.24’, ‘5.25’, ‘6.26’, ‘5.27’, ‘5.30’, ‘4.19’, ‘4.23’, ‘4.25’, ‘4.27’).

**Figura 64** - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 7 sensores ativos.



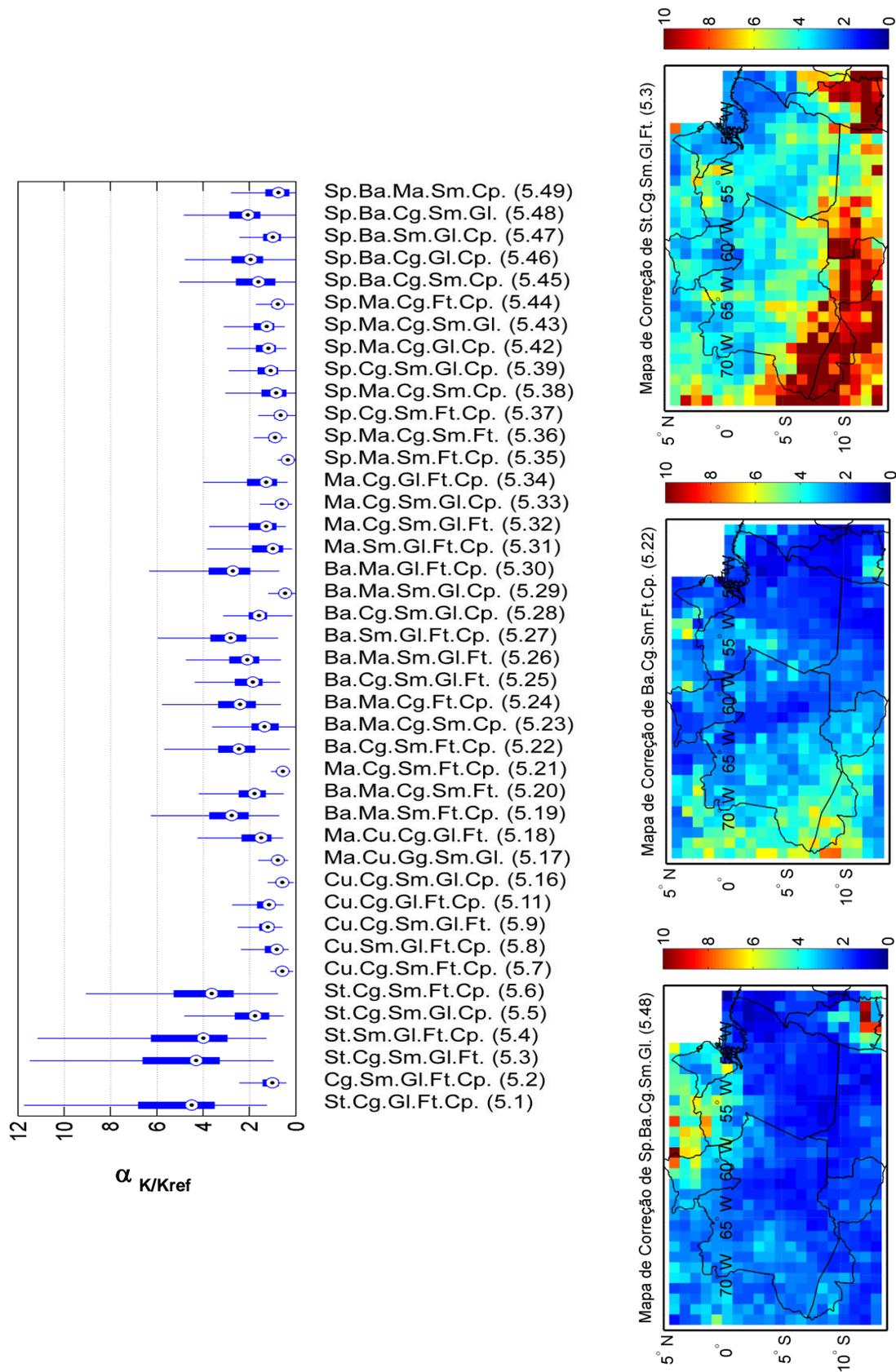
Fonte: do autor

**Figura 65** - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 6 sensores ativos.



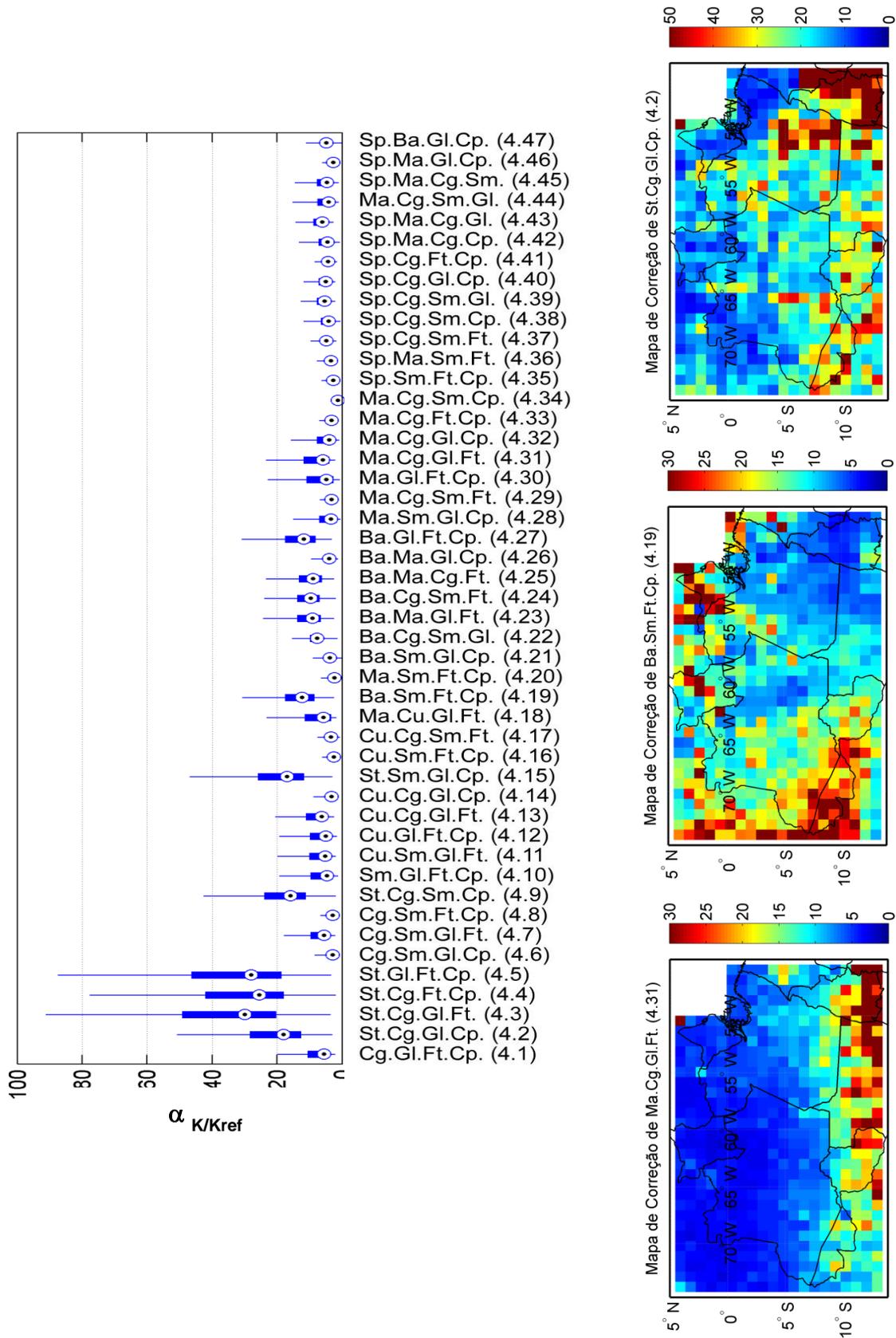
Fonte: do autor

**Figura 66** - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 5 sensores ativos.



Fonte: do autor

**Figura 67** - Comparação estatística dos Mapas de Uniformização para as configurações com 4 sensores ativos.



Fonte: do autor

#### 5.2.4 Caso das configurações isoladas

Entre as 136 configurações identificadas, **25** delas foram identificadas como Configurações isoladas; dessas, 3 configurações são formadas por 8 sensores ativos, 6 outras configurações contam com a participação de 7 sensores ativos, 9 com 6 sensores ativos e 7 com 5 sensores ativos.

Devido a complexidade do modelo, todas as configurações com um número de sensores superior ou igual a 7, não têm correção. Além disso, 10 configurações isoladas tinham o sensor de São Paulo cuja participação era muito baixa. Neste caso, o Mapa de Uniformização usado é o Mapa da mesma configuração de sensor sem o sensor de São Paulo Teste.

**Tabela 15** - Configurações de substituição para configurações isoladas.

<b>Configuração Isolada</b>	<b>Mapa de Fator de Correção</b>
'6.3' (Cu.St.Cg.Sm.Ft.Cp.)	'5.7' (Cu.Cg.Sm.Ft.Cp.)
'6.4' (Cu.St.Cg.Sm.Gl.Ft.)	'5.9' (Cu.Cg.Sm.Gl.Ft.)
'6.5' (Cu.St.Sm.Gl.Ft.Cp.)	'5.8' (Cu.Sm.Gl.Ft.Cp.)
'6.6' (Cu.St.Cg.Gl.Ft.Cp.)	'5.11' (Cu.Cg.Gl.Ft.Cp.)
'6.7' (Cu.St.Cg.Sm.Gl.Cp.)	'5.16' (Cu.Cg.Sm.Gl.Cp.)
'5.10' (Cu.St.Sm.Gl.Ft.)	'4.11' (Cu.Sm.Gl.Ft.)
'5.12' (Cu.St.Gl.Ft.Cp.)	'4.12' (Cu.Gl.Ft.Cp.)
'5.13' (Cu.St.Cg.Sm.Ft.)	'4.17' (Cu.Cg.Sm.Ft.)
'5.14' (Cu.St.Cg.Gl.Cp.)	'4.14' (Cu.Cg.Gl.Cp.)
'5.15' (Cu.St.Cg.Gl.Ft.)	'4.13' (Cu.Cg.Gl.Ft.)

Fonte: do autor

#### 5.2.5 Conclusão

O objetivo do modelo de uniformização era de corrigir o nível de detecção de cada configuração de sensores da rede (número e localização dos sensores em operação) em relação a uma configuração de Referência. O modelo foi baseado nos resultados estatísticos das configurações da rede estáveis para calcular os Fatores de Localização entre duas configurações da rede e o Fator de Uniformização entre a melhor configuração da rede e as outras identificadas na base de dados. O modelo de uniformização desenvolvido responde assim ao problema de serviço intermitente dos sensores observados nos Diagramas de Operação e se adapta ao problema dos padrões próprios de detecção de cada sensor da rede.

Os Mapas de Fator de Uniformização para cada configuração encontrada na base histórica entre janeiro de 2008 até dezembro de 2011 foram calculadas em relação à uma configuração de referência com 7 sensores ativos, '7.3' (Ma.Cu.Cg.Sm.Gl.Ft.Cp). Os Mapas de Fator de Uniformização apresentam grandes variações em função do número e da localização dos sensores ativos na configuração por causa da variação entre os padrões de detecção dos sensores disponíveis da rede.

Contudo, os valores dos Mapas de Fator de Uniformização sofrem de divergência devido à distribuição da Eficiência de Detecção caótica dos sensores fracos (como os sensores de Brasília e Fortaleza), especialmente quando o Fator de Uniformização resulta do produto de 3 outros Fatores de Uniformização como no caso das configurações Ponte. Por isso, o modelo precisa de um fator de saturação da correção, baseado em um limite físico.

Além disso, a forma multiplicativa do modelo de uniformização não permite a correção da falta de dados quando a rede tem um nível de eficiência tão baixa que ela não consegue detectar nenhuma descarga ou quando tem menos de 4 sensores ativos. A uniformização da base de descargas atmosféricas é limitada pelo desempenho de cada configuração da rede com seu limite mínimo de detecção. Por isso o modelo precisará futuramente de um Offset, calculado com um modelo de estimação de descargas atmosféricas.

## Capítulo 6 – VALIDAÇÃO DO MODELO DE UNIFORMIZAÇÃO

O capítulo 6 apresenta a validação matemática do modelo de uniformização. O capítulo divide-se em 2 partes:

3. A primeira parte apresenta dois métodos de **validação do modelo** (Calculando com modelo e comparando os **Fatores de Localização** de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas; Calculando com o modelo as **Taxas de Participação** de cada sensor de uma configuração estável e comparando os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente).
4. E a ultima parte apresenta os resultados de dois métodos de **validação do modelo**.

### 6.1 Metodologia

O modelo é validado com os resultados estatísticos das configurações estáveis.

#### 6.1.1 Cadeias de configurações incluídas

Calculam-se, com o modelo desenvolvido, os **Fatores de Localização** de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas e comparam-se os resultados entre eles. Os mapas de Taxas de Localização das combinações de sensores são calculados estatisticamente para todas as configurações estáveis identificadas na base da STARNET. Se tem 3 configurações estáveis identificadas na base de dados K1, K2 e K3, tal como  $K3 \subset K2 \subset K1$ , então, K2 pode ser uma configuração de referencia para K3; e K1 pode ser uma configuração de referencia para K2 e K3. A partir das Taxas de Localização das combinações de sensores de K1 o modelo pode calcular o Fator de Localização de K2/K1 e de K3/K1 e a partir das Taxas de Localização das combinações de sensores de K2 pode-se calcular o Fator de Localização de K3/K2:

$$K3 \subset K2 \Rightarrow F_{K3/K2} = \frac{nx_{K3}}{nx_{K2}} = \sum_m (L_{cm_{K2}} / c_{m_{K2}} \in Cc_{K3/K2}) \quad (26)$$

$$K2 \subset K1 \Rightarrow F_{K2/K1} = \frac{nx_{K2}}{nx_{K1}} = \sum_m (L_{cm_{K1}} / c_{m_{K1}} \in Cc_{K2/K1}) \quad (27)$$

$$K3 \subset K1 \Rightarrow F_{K3/K1} = \frac{nx_{K3}}{nx_{K1}} = \sum_m (L_{cm\_K1} / c_{m\_K1} \in Cc_{K3/K1}) \quad (28)$$

Contudo,

$$\begin{aligned} F_{K3/K1} &= \frac{nx_{K3}}{nx_{K2}} \cdot \frac{nx_{K2}}{nx_{K1}} = F_{K3/K2} \cdot F_{K2/K1} \\ &= \sum_m (L_{cm\_K2} / c_{m\_K2} \in Cc_{K3/K2}) \cdot \sum_m (L_{cm\_K1} / c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1}) \end{aligned} \quad (29)$$

Então se a equação seguinte é verificada, o modelo está validado.

$$\begin{aligned} \sum_m (L_{cm\_K1} / c_{m\_K1} \in Cc_{K3/K1}) \\ = \sum_m (L_{cm\_K2} / c_{m\_K2} \in Cc_{K3/K2}) \cdot \sum_m (L_{cm\_K1} / c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1}) \end{aligned} \quad (30)$$

Assim o Fator de Localização de K3/K1 é calculado de duas formas: primeiro a partir das Taxas de Localizações das combinações de sensores da configuração estável K1; segundo com o produto de  $F_{K3/K2} * F_{K2/K1}$  calculado a partir das Taxas de Localizações das combinações de sensores da configuração estável K1 e das Taxas de Localizações das combinações de sensores da configuração estável K2.

Depois, se avalia a semelhança entre os resultados calculando a distancia entre os pixels dos dois mapas de Fator de Localização K3/K1 obtidas.

### 6.1.2 Taxas de Participação de configurações inclusivas

Calculam-se as Taxas de Participação de cada sensor de uma configuração a partir do modelo e comparam-se os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente. De um lado, os mapas de Taxas de Participação são calculados estatisticamente para todas as configurações estáveis identificadas na base da STARNET. Do outro lado, se tem 2 configurações estáveis identificadas na base de dados K1 e K2, tal como  $K2 \subset K1$ , o modelo pode calcular os mapas de Taxas de Participação da configuração K2 a partir das Taxas de Localização das combinações de sensores da configuração K1.

A **Taxa de Participação**  $P_{kn\_K2}$  de um sensor ativo  $k_n$  na configuração **K2** numa zona geográfica é calculada estatisticamente com por

$$P_{kn\_K2\_estatistico}(lat, lon) = nx_{K2\_kn}(lat, lon)/nx_{K2}(lat, lon) \quad (31)$$

Aplicando o modelo, se uma configuração  $K2 \subset K1$ , então  $Cc_{K2/K1}$  é o conjunto de Combinações Comuns entre  $K2$  e  $K1$ ,  $Cc_{K2/K1} = \{c_{m\_K1} / (c_{m\_K1} \cap c_{m\_K2}) \geq 4\}$ ; Em seguida, o número de descargas  $nx_{K2}$  de descargas localizadas pela configuração  $K2$  pode ser calculado com:

$$nx_{K2}(lat, lon) = \sum_m \left( L_{cm\_K1} / (c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1}) \right) \cdot nx_{K1}(lat, lon) \quad (32)$$

Depois, o número de descargas  $nx_{kn\_K2}$  onde o sensor  $k_n$  participou, pode ser calculado a partir das Taxas de Localização das combinações de sensores da configuração **K1**:

$$nx_{K2\_kn}(lat, lon) = \sum_m \left( L_{cm\_K1} / (c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1} \wedge k_n \in c_{m\_K1}) \right) \cdot nx_{K1}(lat, lon) \quad (33)$$

Consequentemente,

$$P_{kn\_K2\_modelo}(lat, lon) = nx_{K2\_kn}(lat, lon)/nx_{K2}(lat, lon) = \sum_m \left( L_{cm\_K1} / (c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1} \wedge k_n \in c_{m\_K1}) \right) / \sum_m \left( L_{cm\_K1} / (c_{m\_K1} \in Cc_{K2/K1}) \right) \quad (34)$$

Então se a equação seguinte é verificada, o modelo está validado.

$$\text{Se } P_{kn\_K2\_estatistico}(lat, lon) = P_{kn\_K2\_modelo}(lat, lon) \quad (35)$$

Assim as Taxas de Participações da configuração  $K2$  são calculadas de duas maneiras: primeiro estatisticamente a partir dos dados da configuração estável  $K2$ ; segundo a partir das Taxas de Localizações das combinações de sensores da configuração estável  $K1$ .

Depois, se avalia a semelhança entre os resultados calculando a distancia entre os pixels dos mapas de Taxas de Participação estatística e do modelo.

## 6.2 Resultados de Validação do Modelo

O modelo de uniformização pode ser validado com dois metodos : Calculando com modelo e comparando os **Fatores de Localização** de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas; Calculando com o modelo as **Taxas de Participação** de cada sensor de uma configuração estável e comparando os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente.

### 6.2.1.1 Cadeias de Configurações inclusivas

Para validar o modelo de uniformização, se verifica que, se  $K3 \subset K2 \subset K1$ , então, o Fator de Localização de  $K3/K2$ , multiplicado por o Fator de Localização de  $K2/K1$  foi igual ao Fator de Localização de  $K3/ K1$ . Os resultados são avaliados calculando a distancia entre os pixels dos dois mapas de Fator de Localização  $K3/K1$ , obtidas a partir das Taxas de Localizações das três configurações estáveis ( $F_{K3/K1} - F_{K3/K2} \cdot F_{K2/K1}$ ).

Primeiro foram identificadas as cadeias de configurações estáveis na base de dados da STARNET com  $N_{K1}=7$  sensores,  $N_{K2}=6$  sensores e  $N_{K3}=5$  sensores. A partir das três configurações com 7 sensores se construí 3 arvores de configurações inclusivas que resultou num total de 7 cadeias para validar o modelo. As cadeias são apresentadas na Tabela 16.

**Tabela 16** - Cadeias de configurações estáveis incluídas.

	K1 (7 sensores)	K2 (6 sensores)	K3 (5 sensores)
<b>Arvore 1</b>	'7.3'	'6.2'	'5.2'
<b>Arvore 2</b>	<b>'7.6'</b>	'6.15'	'5.21'
<b>Arvore 3</b>	<b>'7.9'</b>		'5.40'
		'6.24'	'5.42'
			'5.38'
		'6.26'	'5.40'
		'5.38'	

As Figura 68 e Figura 69 apresentam dois exemplos de resultados de validação do modelo, respetivamente para as cadeias das configurações '7.9'/'6.24'/'5.42' e '7.3'/'6.2'/'5.2', incluído 4 mapas: (a) o Fator de Localização de  $K2/ K1$ ; (b) o Fator de Localização de  $K3/K2$ ; (c) o Fator de Localização de  $K3/ K1$ ; e (d) o produto entre o Fator de

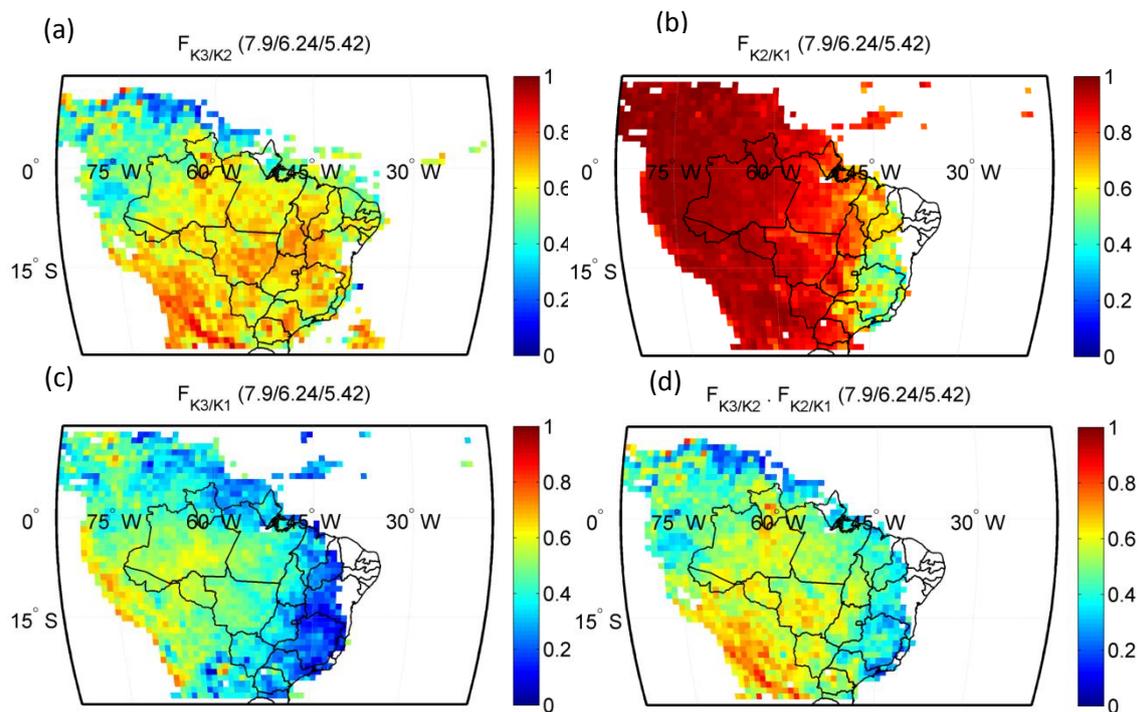
Localização de K2/K1 e o Fator de Localização de K3/K2. Primeiro se observa que os Fatores de Localização de K2/K1 foram mais altos do que os Fatores de Localização de K3/K2 devido a perda de um sensor quando a rede com menos sensores ativos tinha um impacto maior. Depois se observa que os mapas de Fator de Localização K3/K1 foram similares aos produtos entre os Fatores de Localização de K3/K2 e K2/K1. Contudo aparecem algumas divergências devidas provavelmente a diferença entre os períodos de cálculo das três configurações que podem sofrer de variação das interferências.

No primeiro exemplo o Fator de Localização K2/K1 (Figura 68b) foi alto em toda a parte oeste do continente porque a configuração '6.24' tinha os mesmos sensores ativos do que a configuração '7.9' menos o sensor de Brasília que participou mais na parte leste do continente (ver os mapas de participação dos sensores da '7.9' Figura 44). O Fator de Localização K3/K2 (Figura 68a) foi mais baixo porque a configuração '5.42' tinha os mesmos sensores ativos que a configuração '6.24' menos o sensor de São Martinho que é o sensor o mais eficiente da rede. O sensor de São Martinho faltou especialmente nas zonas de baixa eficiência dos outros sensores da configuração '5.42' como no norte do continente onde as Eficiências de Detecção dos sensores de São Paulo, Campo Grande e Cachoeira Paulista foram baixas. O Mapa de Fator de Localização de K3/ K1 foi o resultado da ausência da combinação dos sensores São Martinho e Brasília: baixa no norte e no leste do continente. Observa-se que os valores do mapa de Fator de Localização K3/K1 (Figura 68c) foram um pouco mais baixos do que o mapa do produto dos dois primeiros mapas (Figura 68d), contudo a distribuição geográfica é muito parecida. Globalmente, a média das distancias entre os dois mapas foi de -0,093 com um desvio padrão de 0,134.

No segundo exemplo o Fator de Localização entre K2 e K1 (Figura 69b) foi alto no sul do continente porque a configuração '6.2' tinha os mesmos sensores ativos do que a '7.3' menos o sensor de Manaus cuja participação foi maior no norte do continente (ver os Mapas de Participação dos sensores da configuração '7.3' Figura 42). O Fator de Localização K3/K2 (Figura 69a) foi mais baixo no sul porque a configuração '5.2' tinha os mesmos sensores ativos do que a configuração '6.2' menos o sensor de Curitiba (cujo sensor foi o mais eficiente nesta parte do continente). Observa-se que o mapa de Fator de Localização K3/K1 (Figura 69c) foi muito parecido do que o mapa do produto dos dois primeiros mapas (Figura 69d). Globalmente, a média da diferença entre as duas mapas foi de 0,012 com um desvio padrão de 0,162.

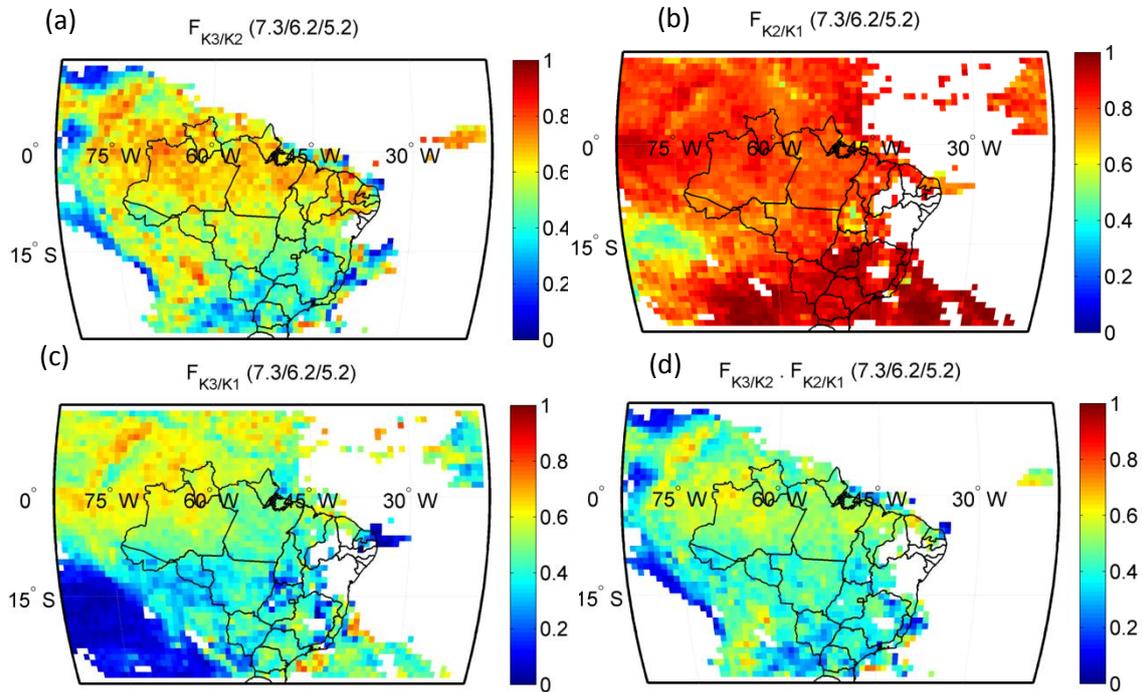
Os resultados de distancia entre os pixels dos dois mapas de Fator de Localização K3/K1, para cada cadeia de configuração, são comparados estatisticamente na Figura 70 com um Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983). Observa-se que estes dois exemplos são os dois piores entre as 7 cadeias de validação que tinham valores médios e de desvio padrões inferiores. Neste contexto, o modelo de avaliação do Fator de Localização entre duas configurações é validado.

**Figura 68** - Exemplo de cadeia de validação do modelo '7.9'/6.24'/5.42'.



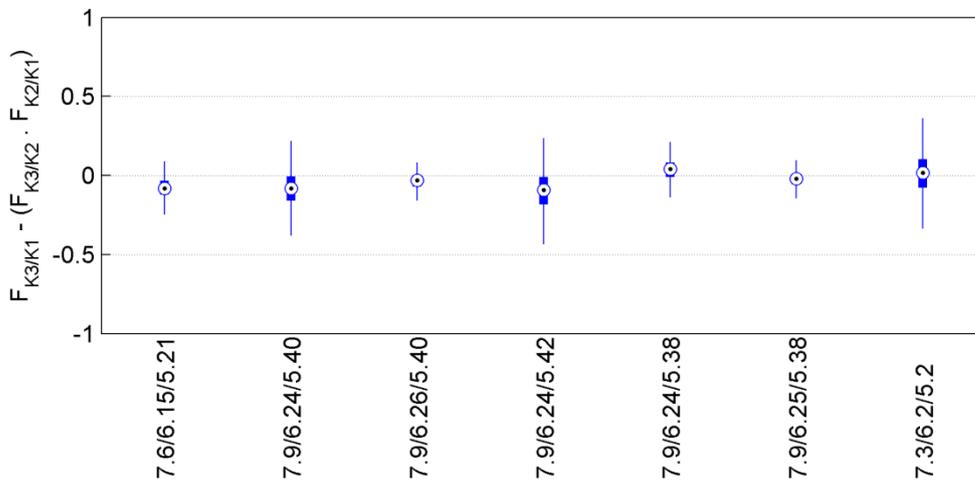
Fonte: do autor

**Figura 69** - Exemplo de cadeia de validação do modelo '7.3'/6.2/'5.2'.



Fonte: do autor

**Figura 70** - Comparação estatística das distancias entre  $F_{K3/K1}$  e  $F_{K3/K2} * F_{K2/K1}$ .



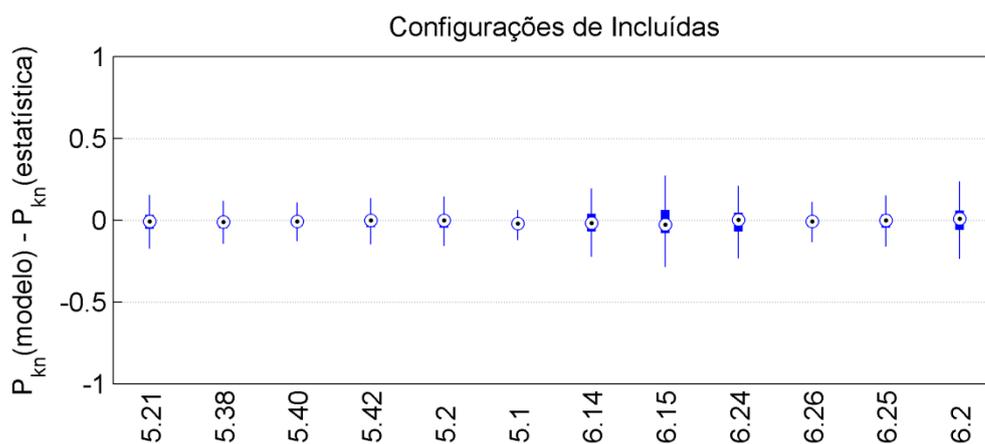
Fonte: do autor

### 6.2.1.2 Taxas de Participação dos sensores

Buscam-se todas as configurações estáveis incluídas numa outra configuração estável e calculam-se, com o modelo, as Taxas de Participação de cada sensor. Depois se comparam os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente anteriormente.

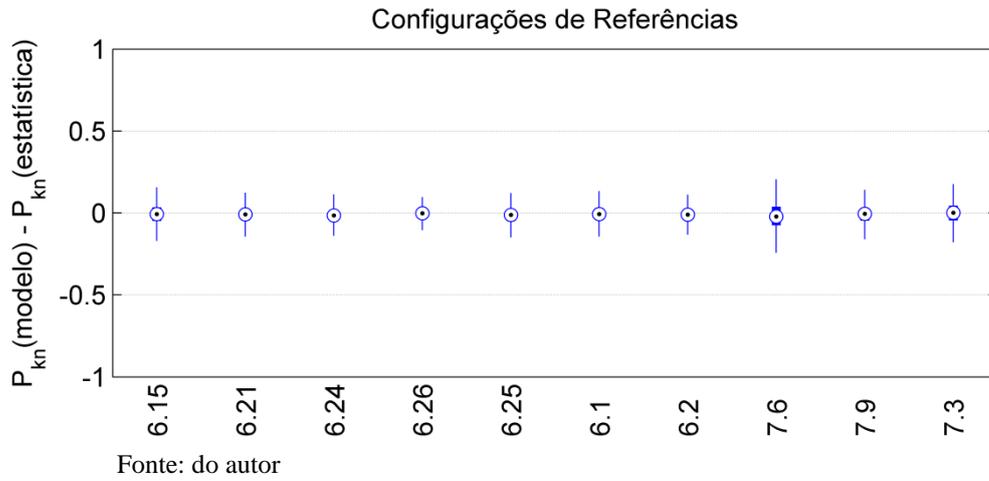
Encontra-se **24** configurações estáveis com 5 ou 6 sensores ativos incluídas em outras configurações estáveis com 6 ou 7 sensores ativos (configuração de referencia), dando um total de **126** mapas de Taxas de Participação a comparar. Então, se classifica os resultados estatísticos com um Diagrama de caixa (CHAMBERS et al., 1983) por configurações incluídas (12/15 possíveis) na Figura 71, por sensores (10/10 possíveis) na Figura 72 e por configuração de referencia (10/11 possíveis) na Figura 73. Os resultados classificados por configurações incluídas e de Referencia mostram uma boa coerência entre o modelo e a estatística. Um exemplo de comparação de Mapas é apresentado na Figura 74 para a configuração estável ‘6.27’ incluída na configuração estável de referencia ‘7.9’. Observa-se que os resultados não foram exatamente idênticos porque as Taxas de Localização dos sensores foram calculadas a partir de dados de raios diferentes (sobre períodos diferentes). Neste contexto, a Eficiência de Detecção dos sensores sofreu provavelmente das variações no tempo devido as interferências ou ruído eletromagnético. Nos resultados classificados por sensores aparecem algumas divergências entre o modelo a o cálculo estatístico, especialmente nos casos dos sensores com padrões de participação caóticos, como os sensores de Brasília e Fortaleza. O comportamento do sensor São Paulo Teste por sua vez apresentou-se super dimensionado e sua participação na localização foi, no cálculo estatístico, ainda menor. Essa divergência complica a uniformização dos dados registrados com 4 sensores ativos incluindo o sensor de São Paulo Teste como, por exemplo, no início de 2008.

**Figura 71** - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por Configurações Incluídas.



Fonte: do autor

**Figura 72** - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por Configurações de Referências.



**Figura 73** - Distancia entre Mapas de Taxas de Participações (Modelo - Estatístico), agrupados por sensores.

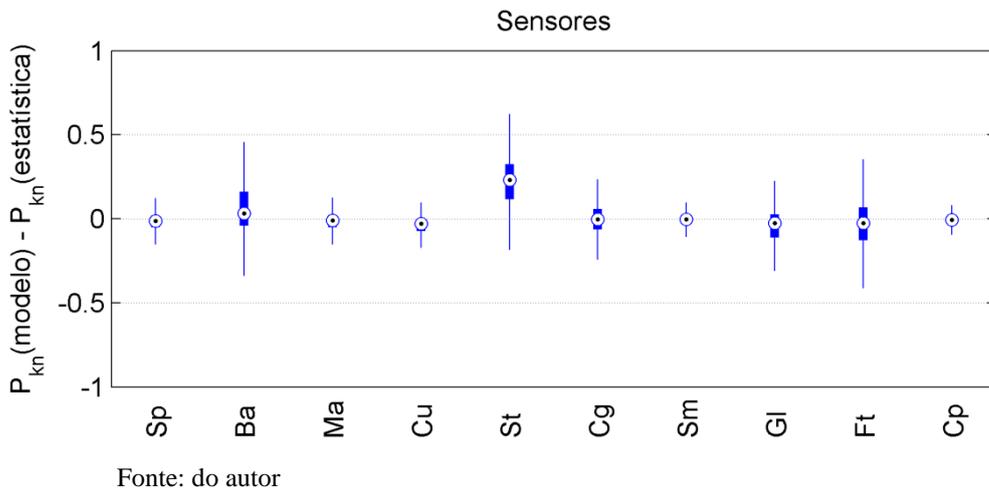
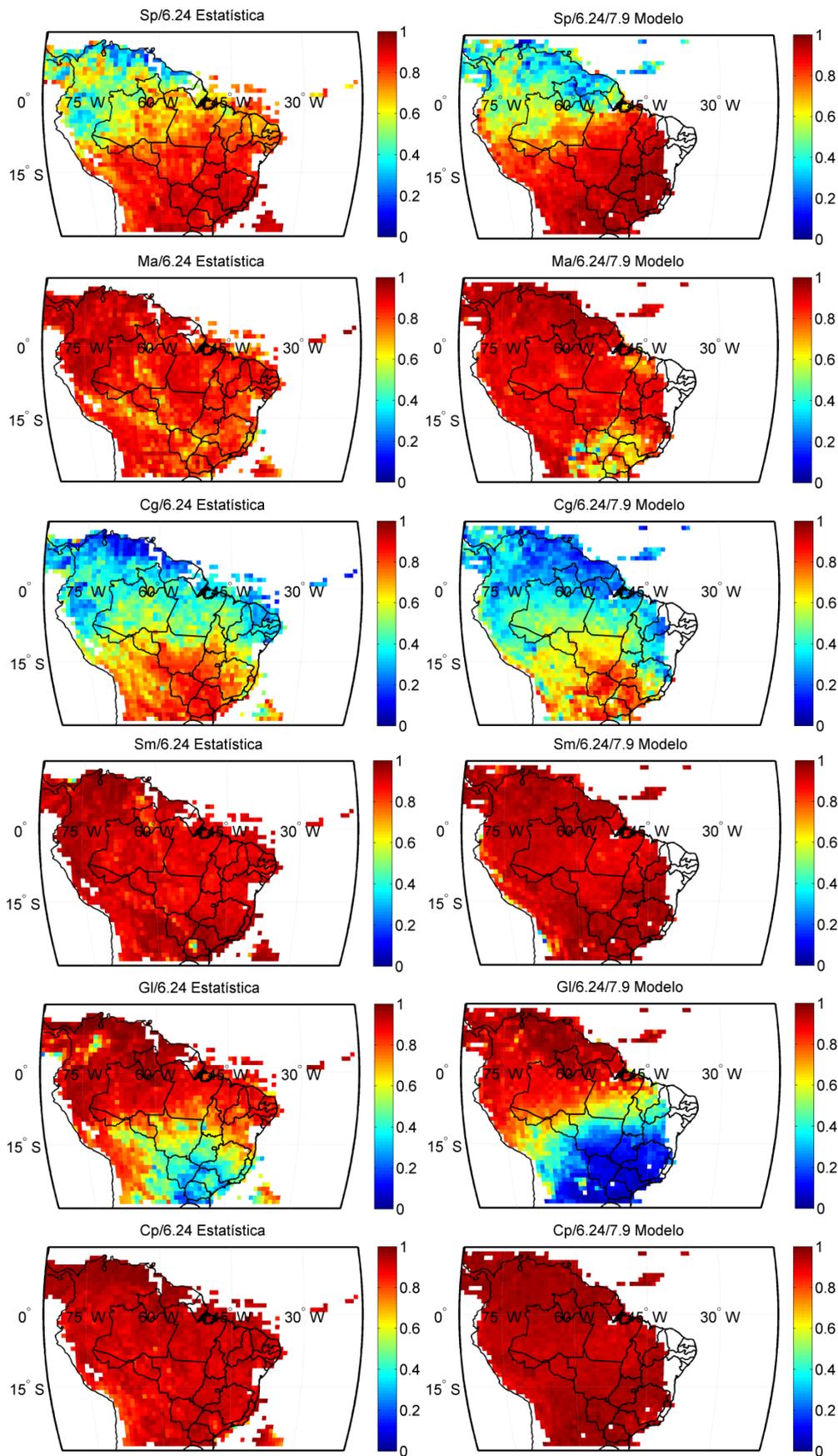


Figura 74 - Comparação de Mapas de Taxas de Participação dos resultados do modelo e da estatística.



### **6.2.2 Conclusão**

O modelo foi validado com dois métodos matemáticos: calculando com modelo e comparando os Fatores de Localização de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas; calculando com o modelo as Taxas de Participação de cada sensor de uma configuração estável e comparando os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente.

Os resultados de validação matemática foram afetados pelas variações no tempo das eficiências de detecção dos sensores mais instáveis, devido provavelmente às variações das interferências ou do ruído eletromagnético. Contudo, os resultados obtidos são aceitáveis para a validação do modelo de uniformização, uma vez que a média dos desvios na área estudada é inferior a 0,1.

## Capítulo 7 –PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

As descargas atmosféricas representam um dos maiores fatores de riscos para o setor elétrico. O objetivo deste capítulo é de avaliar os riscos relacionados a descargas atmosféricas, no trajeto das novas linhas de transmissão instaladas na região Amazônica brasileira com torres extremamente altas (ate 295m de altura) para a otimização dos sistemas de proteção.

Os danos relacionados a descargas atmosféricas nos sistemas elétricos dependem principalmente das características dos raios como o pico de corrente, a taxa máxima de variação do corrente, da integral da corrente ao longo do tempo, e das propriedades do sistema elétrico como a resistividade do terreno, a indutância, a condutividade, a potência calorífica (RAKOV et al., 2003) e (RAKOV, 2012). Por isso todas as normas técnicas nacionais e internacionais de proteção contra raios dependem da distribuição estatística de pico de correntes da primeira descarga de retorno dos raios negativos (RAKOV, 2012). Contudo, essas normas técnicas foram todas desenvolvidas utilizando características físicas das descargas atmosféricas e distribuição estatística de pico de corrente dessas descargas das localizadas na Europa e América do Norte (áreas de latitudes médias). Além disso, foram desenvolvidas técnicas relativamente simples para a concepção de sistemas de proteção para várias estruturas como os modelos de incidência de raios que se adaptam nas características dos raios específicas de uma região. Esses modelos baseiam-se na geometria do objeto a ser protegido como uma linha de transmissão ou uma torre de alta tensão, a distribuição estatística de pico de correntes e a densidades de descargas atmosféricas. Assim na região amazônica a incidência de raios pode ser estimada a partir da distribuição de pico de correntes registrada pela RDR-SIPAM, calculada no capítulo 3 e da densidade de raios registrada pela rede STARNET corrigida pelo modelo de uniformização desenvolvido nesta tese.

Por isso, aplica-se primeiro o modelo de uniformização na geração de mapas cerâmicos e de densidades de raios anuais na região Amazônica. O modelo de uniformização exporta uma matriz de Uniformização espaço-temporal que se pode aplicar a qualquer distribuição de raios registrada pela rede STARNET na Amazônia brasileira. Essa matriz, gerada a partir dos Mapas de Fatores de Uniformização de cada configuração e dos Diagramas Operacionais da rede STARNET é de forma tridimensional: o tempo tem uma amostragem a cada 10 minutos, e espaço uma resolução de 100 km x 100 km. A partir dos

mapas de densidade de raios anuais uniformizadas se podem calcular mapas de padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão para determinar as áreas críticas e depois estimar a incidência de raios nas linhas de transmissão e nas torres com um modelo eletrogeométrico.

O capítulo 5 divide-se em 4 partes:

1. Exemplo de aplicação do modelo de uniformização para a correção de uma distribuição diária de raios registrada pela rede STARNET na região de Belém;
2. Edição de mapas de frequência ceráunico e de densidade de raios uniformizada anuais corrigidas pelo modelo de uniformização na região amazônica;
3. Geração dos mapas de padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão e determinação das áreas críticas para o planejamento da proteção das linhas de transmissão de alta tensão na região Amazônica;
4. Estimação da incidência de raios nas linhas de transmissão e torres para a otimização dos sistemas de proteção usando a distribuição de pico de corrente da RDR-SIPAM e as densidades de raios corrigidas da rede STARNET.

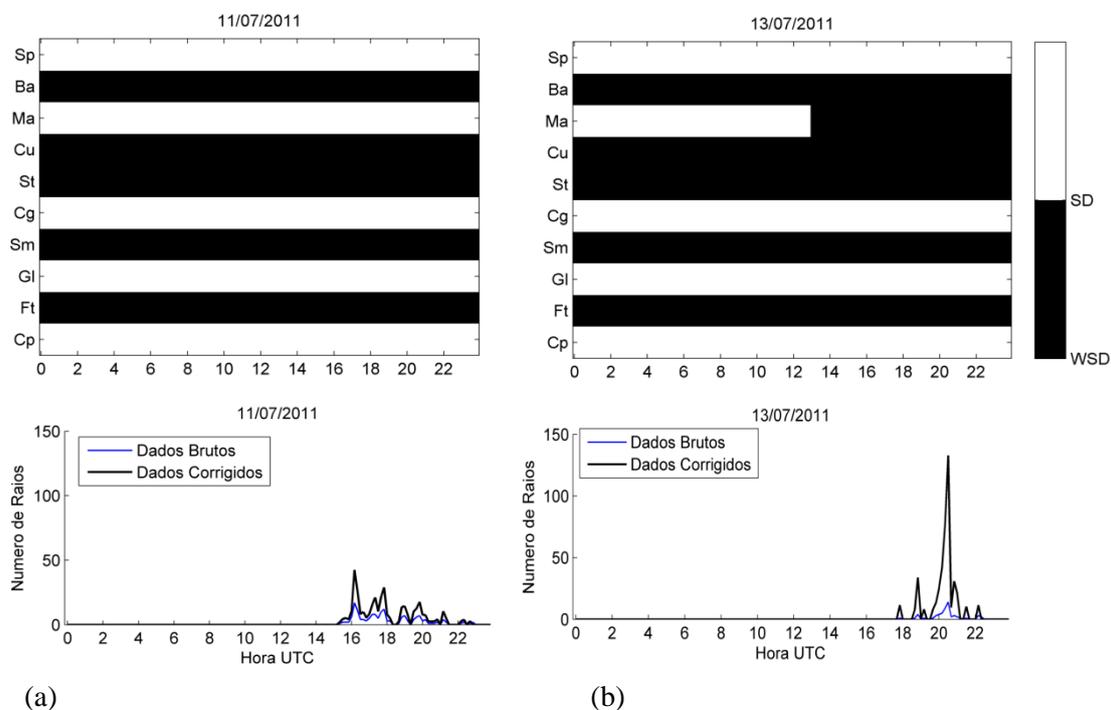
### **7.1 Aplicação do modelo de uniformização a uma distribuição diária de raios**

Apresentam-se exemplos de aplicação do modelo de uniformização no contexto do monitoramento diário dos eventos de raios na região de Belém. Para isso comparam-se as distribuições diárias de raios localizados pela rede STARNET na região de Belém (entre  $-3,05^{\circ}$  S e  $0,54^{\circ}$  N em latitude e  $49,54^{\circ}$  W e  $46,85^{\circ}$  W em longitude) com a distribuição de raios corrigida pelo modelo de uniformização, para dois dias: o dia 11 e o dia 13 de julho 2011. As distribuições diárias de raios brutas e corrigidas são calculadas a partir da matriz de Uniformização espaço-temporal em relação ao Diagrama Operacional diário da rede STARNET.

A Figura 75 apresenta para estes dois dias a distribuição de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização, junto com o Diagrama Operacional da rede. As distribuições de raios e os Diagramas Operacionais têm a mesma amostragem temporal de 10 minutos. Os resultados mostram que no dia 11 de julho de 2011, a rede STARNET estava operando com 5

sensores na configuração ‘5.42’ (Sp.Ma.Cg.Gl.Cp.). Enquanto, no dia 13 de julho a rede estava operando com 4 sensores na configuração ‘4.40’ (Sp.Cg.Gl.Cp.). Essa configuração é a mesma que a configuração ‘5.42’ sem o sensor de Manaus, falhando o dia 13 de julho cerca de 13:00 UTC. Pode-se observar na Figura 75a que a distribuição de raios do dia 11 de julho fica fraca, mesmo corrigida pelo modelo de uniformização. A taxa de raios corrigida alcança um máximo de 42 raios/10 min cerca de 16:30 UTC. Ao contrário, se observa na Figura 75b que a distribuição de raios do dia 13 de julho, parecida em intensidade aquele sem correção do dia 11, apresenta um pico forte de ocorrência de raios de 133 raios/10min cerca de 20:30 UTC após uniformização da distribuição pelo modelo.

**Figura 75** - Distribuição de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização junto com o Diagrama Operacional da rede STARNET: (a) 11 de julho de 2011; (b) 13 de julho de 2011.



Fonte: do autor

## 7.2 Mapas anuais cerâmico e de densidade uniformizada

O objetivo dessa parte é de construir mapas de frequência cerâmico e de densidade de raios uniformizada anuais na Região Amazônica.

### 7.2.1 Método

O índice cerâmico é um parâmetro que indica o número de dias de tempestades por ano em uma determinada localidade (KINDERMANN, 2009). Ele é tabulado pela

Organização Mundial de Meteorologia. Um dia de tempestade é definido como o dia do calendário no qual um trovão é ouvido, sendo estes dados registrados por um observador. Esse parâmetro vem sendo usado há muito tempo pelos meteorologistas para caracterizar as atividades relativas às descargas atmosféricas em uma localidade. Assim o trovão ouvido pode ser relacionado a uma descarga de tipo Nuvem-solo (NS) como a uma descarga de tipo Nuvem-Nuvem (NN) ou Intra-Nuvem (IN). As linhas isocerânicas são linhas (curvas) que ligam as localidades que tem o mesmo índice cerâunico. Na literatura encontra-se uma relação envolvendo a densidade de descargas  $N_g$  [raios/km<sup>2</sup>/ano] e o índice cerâunico  $ce$  (UMAN, 2001). Assim a densidade de descargas nuvem-solo, de acordo com a norma brasileira NBR-5419, pode ser dada por:

$$N_g = 0,04ce^{1,25} \quad (36)$$

Os mapas de índice cerâunico são calculados para cada ano (2008 até 2011) e corrigido globalmente pelo número de dias sem detecção no Diagrama Operacional da rede STARNET apresentados na Tabela 17. Os mapas de índice cerâunico não podem ser corrigidos pelo modelo por causa da forma multiplicativa da uniformização. Então se durante um dia com tempestade nenhum raio está detectado pela rede por causa de sua eficiência baixa, esse dia será identificado como um dia sem tempestade. Em seguida, os mapas de densidade de raios são calculados para cada ano de operação da rede como valores médios sobre os períodos sem falta de dados do Diagrama Operacional da rede STARNET apresentado no Capítulo 3.

**Tabela 17** - Número de dias sem detecção da rede STARNET por ano de operação.

Ano	2008	2009	2010	2011
Número de dias sem detecção	55	1	20	26

Fonte: do autor

## 7.2.2 Resultados

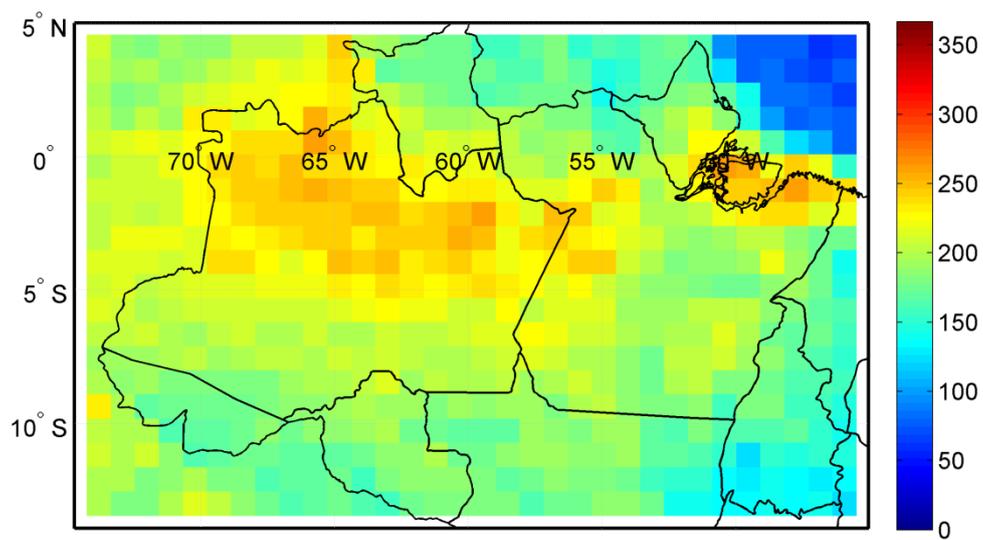
### 7.2.2.1 Mapas de índice cerâunico anual

Apresentam-se os resultados dos mapas de índice cerâunico para cada ano de operação da rede STARNET: Figura 76 para ano 2008, Figura 77 para o ano 2009, Figura 78 para ano 2010, e Figura 79 para ano 2011. Os resultados foram corrigidos globalmente para o número de dias sem detecção do Diagrama Operacional da rede STARNET.

Observa-se primeiro que a distribuição do índice ceráunico é parecida de um ano a outro sendo quase uniforme na Amazônia brasileira. O mapa do índice ceráunico do ano 2009 apresenta os maiores valores com uma média muito alta de 318 dias sobre 365, e com um desvio padrão de 35 dias. Esse resultado é devido a duas causas. Primeiramente, de acordo com Marengo et al. (2011), esse ano é conhecido com um ano de condições meteorológicas extremas com atividade convectiva intensa e chuvas extraordinariamente fortes. Em segundo lugar, o ano 2009 era o ano de operação mais estável da rede STARNET, funcionando mais de 97% do tempo com 5 ou mais sensores ativos (ver estatística no Capítulo 3) e com 1 dia só sem detecção de raios. Em comparação o ano de 2008 apresenta valores do índice ceráunico mais baixo com uma média de 187 dias (sobre 366) e um desvio padrão de 43 dias. Durante o ano 2008, a rede estava numa fase de desenvolvimento e de teste: ela operava com 5 sensores até a instalação do sensor de São Martinho, em agosto 2008. Por isso o funcionamento era bastante intermitente com uma falha do sistema de detecção em torno de 55 dias. A baixa eficiência da rede aumenta o número de dias sem raios e consequentemente diminui o índice ceráunico.

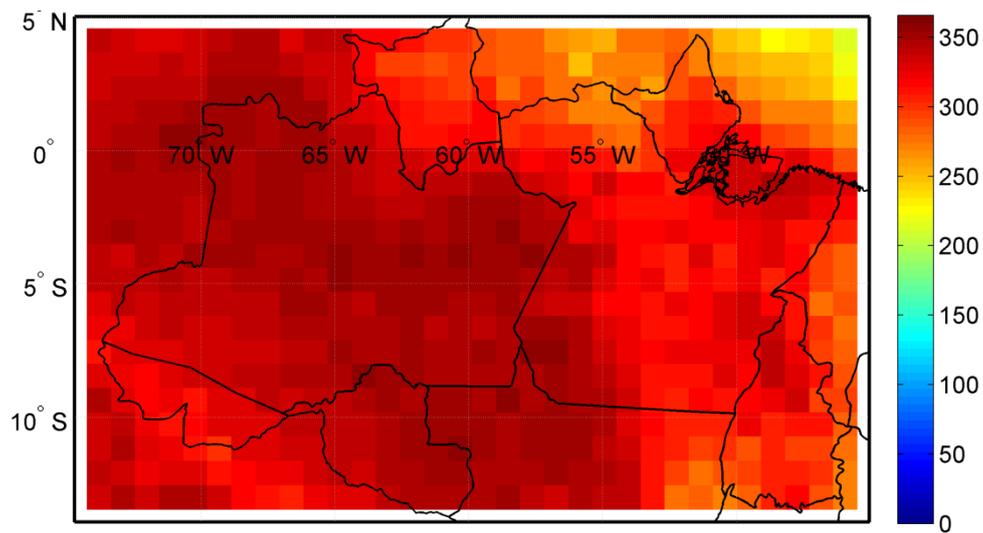
Os mapas do índice ceráunico dos anos 2010 e 2011 mostram valores menos intensos que o mapa do ano 2009. Os mapas apresentam uma média de 254 dias e um desvio padrão de 47 dias para o ano 2010 e uma média de 292 dias e um desvio padrão de 45 dias para o ano 2011. De acordo com Marengo et al. (2011), durante ano 2010 aconteceu um episódio climatológico extremo de seca, afetando o noroeste, centro e sudoeste da Amazônia. Ademais, os números de dias no ano sem detecção afetam também os mapas de índice ceráunicas dos anos 2010 e 2011 com respectivamente 20 dias e 26 dias do ano sem detecção de raios.

**Figura 76** - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2008.



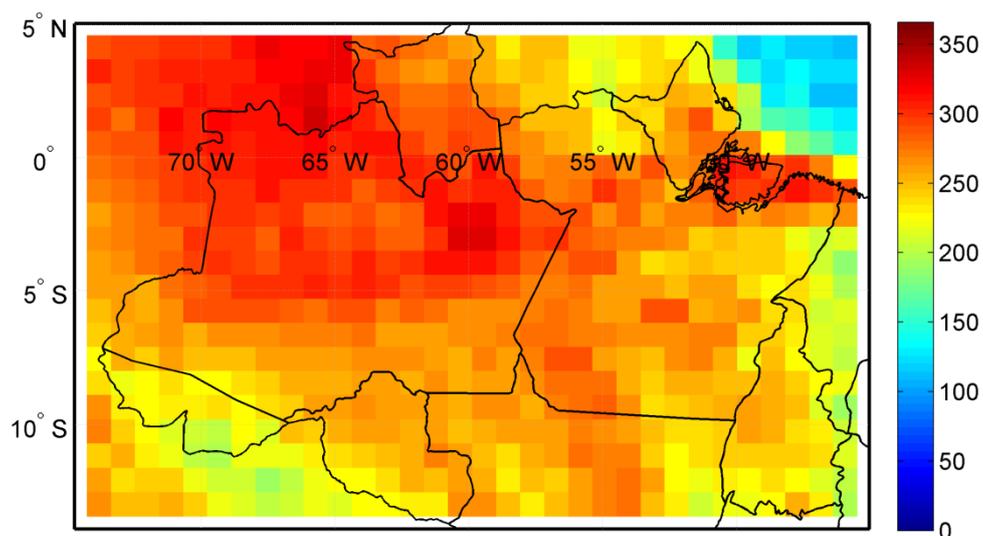
Fonte: do autor

**Figura 77** - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2009.



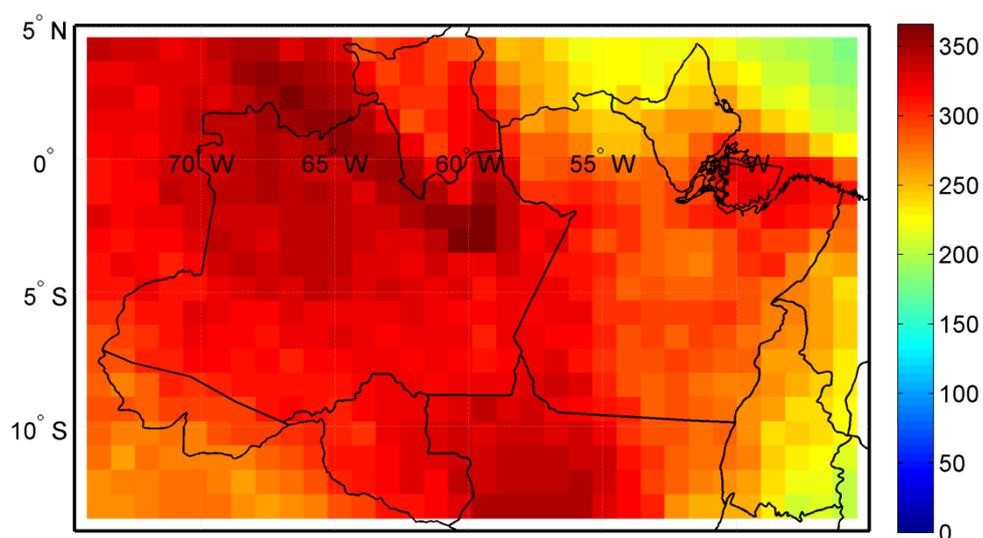
Fonte: do autor

**Figura 78** - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2010.



Fonte: do autor

**Figura 79** - Mapas de índice cerâmico da Amazônia do ano 2011.



Fonte: do autor

#### 7.2.2.2 Mapas de densidades de raios

Apresentam-se, nesta parte, os resultados dos mapas de densidade de raios bruta calculados com os dados registrados pela rede STARNET, os mapas de densidade de raios corrigida com o modelo de uniformização, e os mapas de anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia: Figura 80 para o ano de 2008, Figura 81 para o ano de 2009, Figura 82 para ano de 2010, e Figura 83 para ano de 2011. Os mapas de densidade de raios são calculados para cada ano como valores médios sobre os períodos sem falta de dados dos

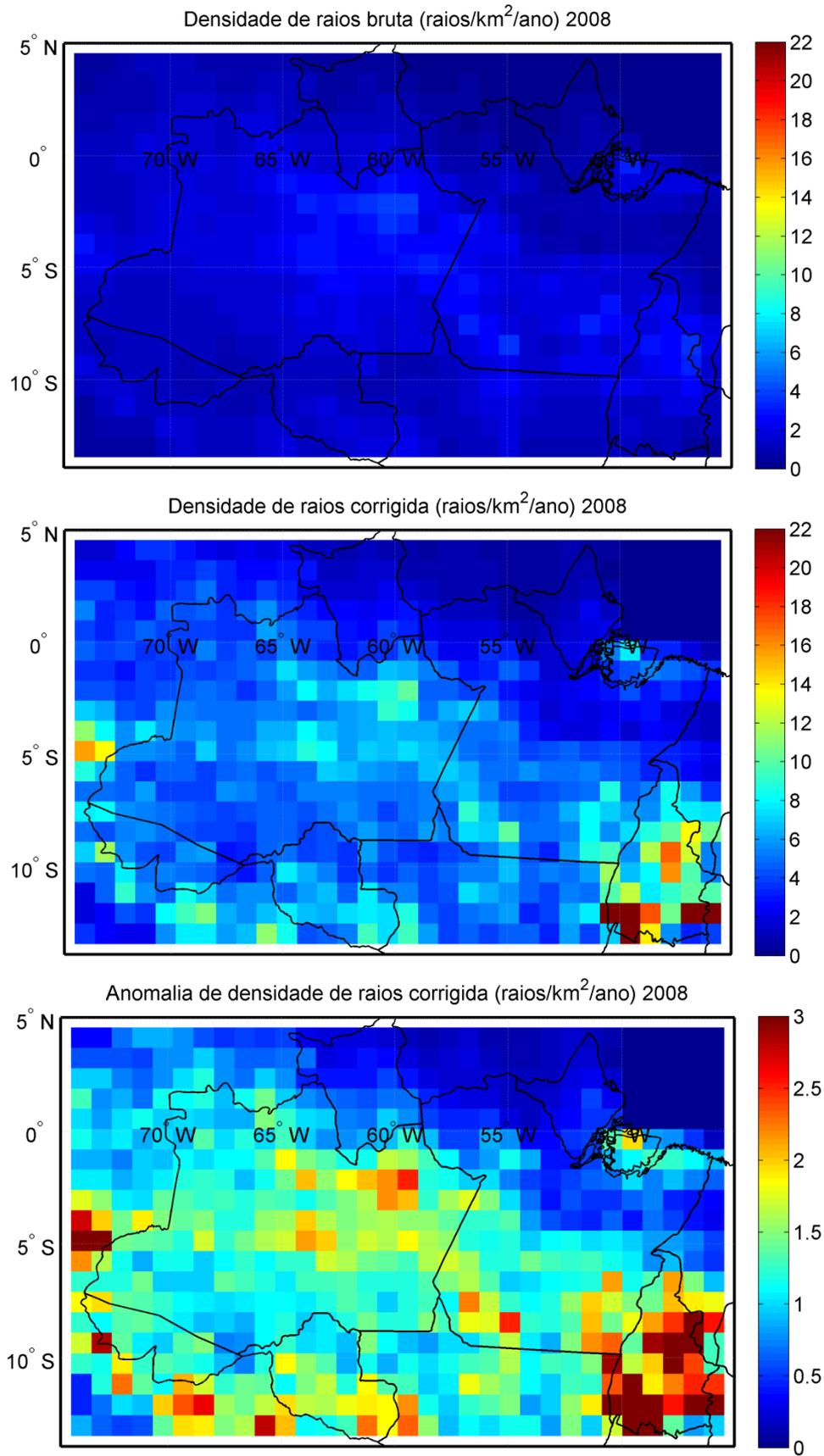
Diagramas Operacional da rede STARNET. Os mapas de anomalia são calculados em relação ao valor médio do ano.

Observa-se primeiro que o nível de correção é diferente de um ano para o outro. Assim o mapa do ano 2008 (Figura 80) foi o mais corrigido: o valor médio passou do valor 1,3 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 0,8 sem uniformização para um valor médio de 4,1 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 2,7 com a uniformização. Aplicado a uniformização aos dados brutos, o mapa de densidade de raios do ano 2008 apresenta padrões de descargas atmosféricas parecidos ao do ano 2009 (Figura 81): forte na região de Belém bem como no estado do Amazonas e, muito forte no estado do Tocantins. Esses padrões de descargas atmosféricas aparecem ainda mais intensos nos mapas de anomalia de densidade de raios corrigida dos anos 2008 e 2009. O mapa do ano 2009 foi o menos corrigido: o valor médio passou do valor 5,4 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 3,4 sem uniformização para um valor médio de 8,1 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 5,0 com a uniformização.

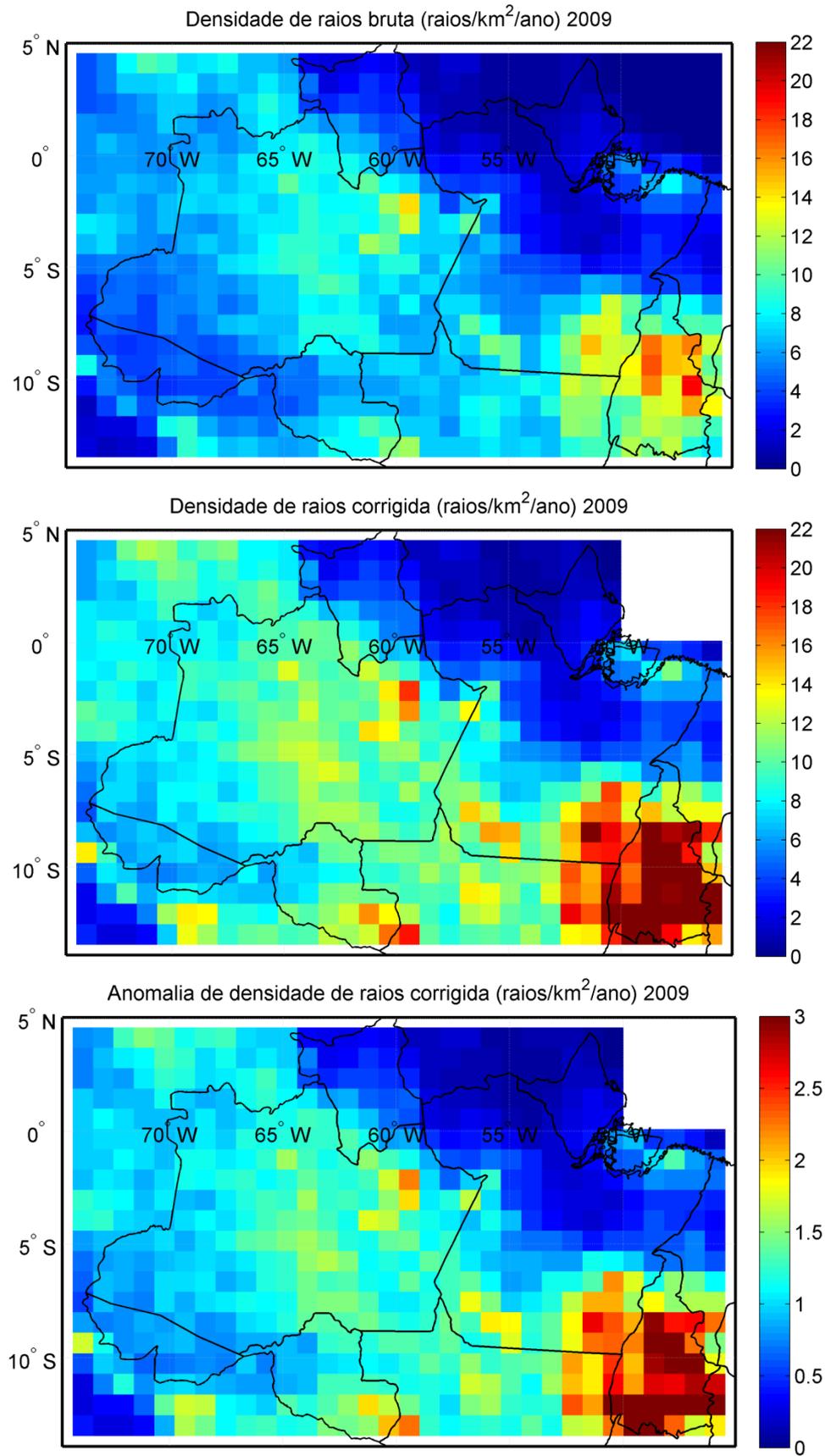
Os mapas de densidade de raios corrigidos dos anos 2010 (Figura 82) e 2011 (Figura 83) têm padrões de descargas atmosféricas parecido entre eles, mas diferente dos anos 2008 e 2009. Esse padrão é forte na região de Belém, no centro da Amazônia na fronteira entre os estados do Pará e do Amazonas, bem como muito forte no estado do Tocantins. Esses padrões de descargas atmosféricas aparecem ainda mais intensos nos mapas de anomalia de densidade de raios corrigida dos anos 2010 e 2011. Para o ano 2010 o valor médio da densidade de raios passou do valor 2,2 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 1,3 sem uniformização para um valor médio de 4,0 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 2,8 com a uniformização. Para o ano 2011 o valor médio da densidade de raios passou do valor 2,0 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 1,4 sem uniformização para um valor médio de 3,6 raios/km<sup>2</sup>/ano com um desvio padrão de 3,4 com a uniformização.

Observa-se nos mapas de densidade de raios corrigidos que a atividade de raios fica sempre muito forte no estado do Tocantins. Os valores de densidade de raios são sempre muito intensificados pelo modelo de uniformização porque nesta zona várias configurações da rede STARNET têm uma eficiência de localização relativa baixa. Essa correção alta pode sofrer de uma divergência do modelo que ainda não tem valores de saturação.

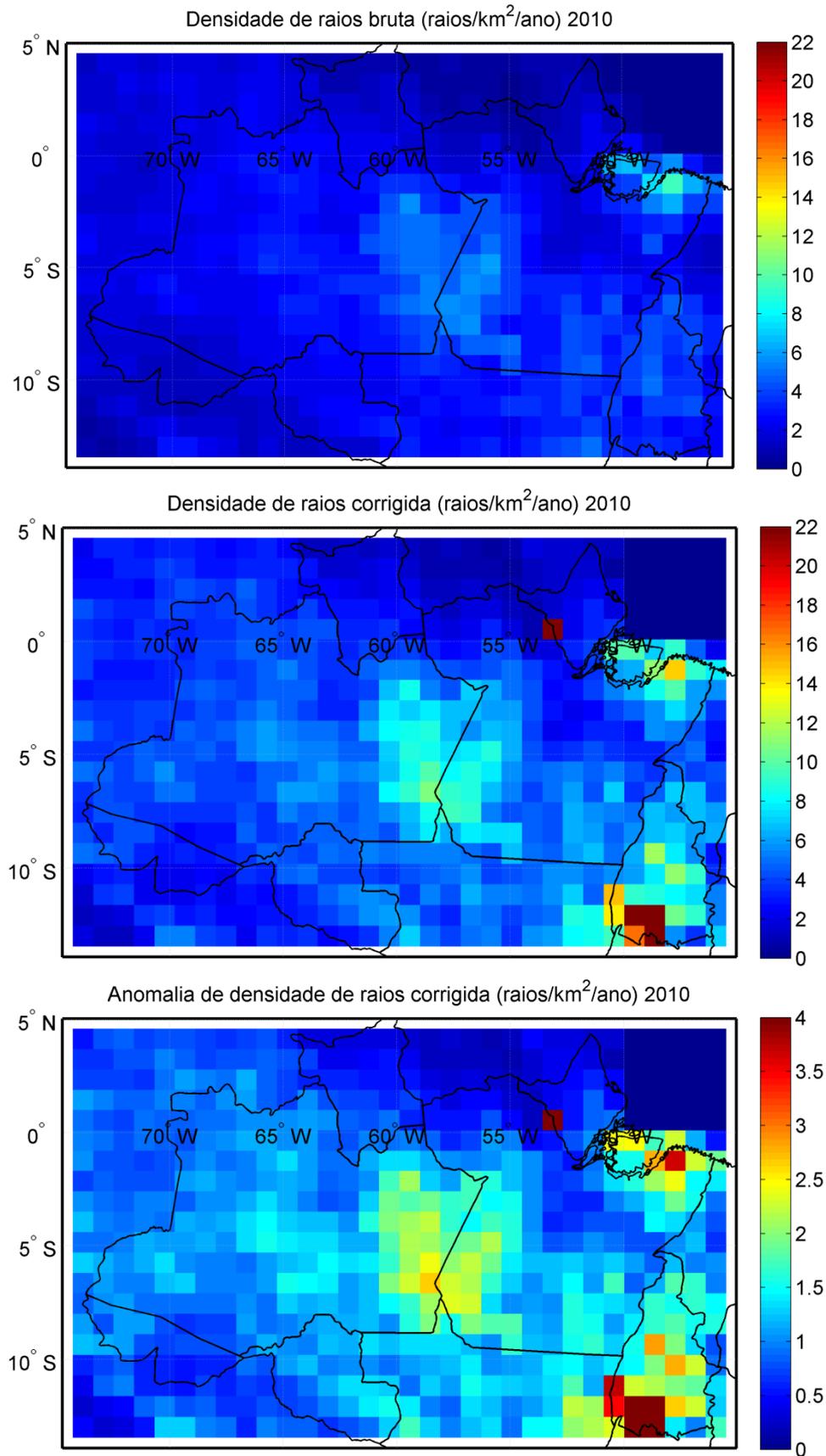
**Figura 80** - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2008.



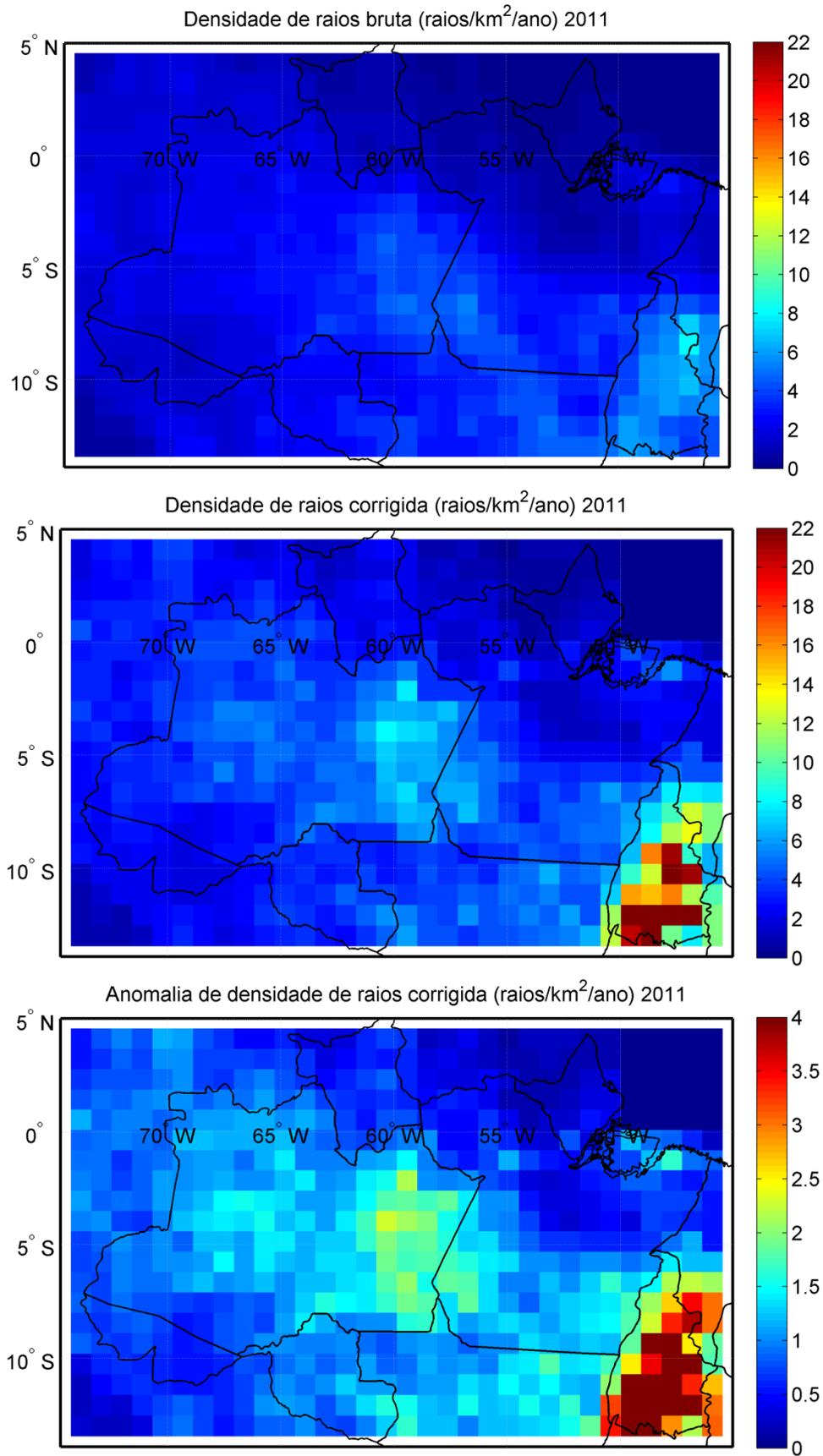
**Figura 81-** Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2009



**Figura 82** - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2010.



**Figura 83** - Mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização e anomalia de densidade de raios corrigida na Amazônia, ano 2011.



Como conclusão, os valores médios dos mapas de densidade de raios corrigida do ano 2008, 2010 e 2011 são da mesma ordem, em torno de 4 raios/km<sup>2</sup>/ano. O ano 2009 fica acima com uma média próxima de 8 raios/km<sup>2</sup>/ano por causa de episódio climatológico extremo com uma atividade convectiva intensa.

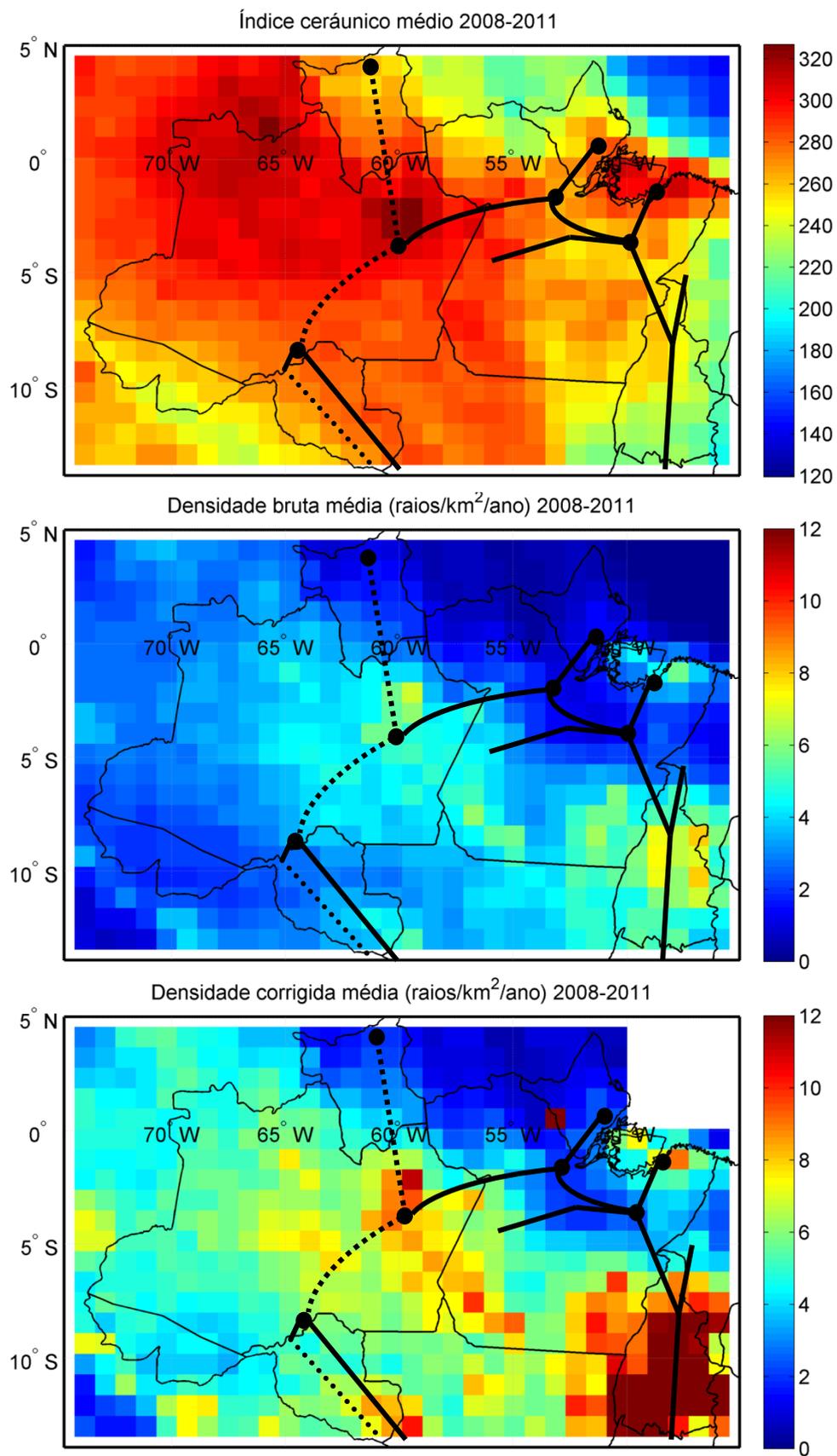
### **7.3 Padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão na Amazônia**

Os resultados das médias de índice ceráunico e densidade de raios uniformizada sobre os 4 anos (2008 -2011) são apresentados junto com o trajeto das linhas de transmissões na Amazônia para determinar as áreas críticas para a proteção dos sistemas elétricos. Os mapas de índice ceráunico e mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização são apresentados na Figura 84. O mapa de densidade de raios uniformizada é apresentado com valores saturados no objetivo de observar os padrões de descargas atmosféricas. Um mapa não saturado é apresentado na Figura 85. Essa saturação se aplica apenas no estado do Tocantins, onde as densidades de raios podem sofrer de uma divergência do modelo para algumas configurações da rede.

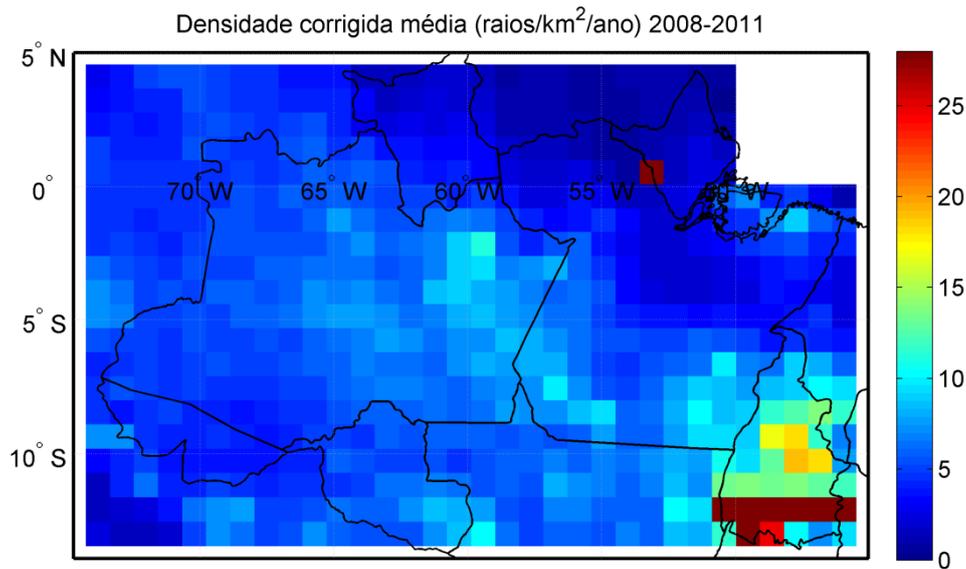
Observa-se primeiro nos resultados que os padrões do mapa de índice ceráunico médio são ainda mais parecidos que os padrões de densidade de raios média corrigida. O modelo de uniformização intensifica os contrastes no mapa de densidade de raios. Assim a atividade elétrica atmosférica é particularmente intensa em termo de índice ceráunico na região de Belém, e na região de Manaus. As linhas de transmissão Tucuruí-Manaus, Manaus-Boa Vista e Manaus-Porto Velho cruzam zonas de alto índice ceráunico no estado do Amazonas.

A atividade elétrica atmosférica é particularmente intensa em termos de densidade e raios na região de Belém, na região de Manaus, no estado do Tocantins e no sul do estado de Rondônia. Assim a linha de transmissão Tucuruí-Serra da Mèsa deverá ser muita atingida por descargas atmosféricas. As linhas de transmissão passando na região de Manaus vão ter um risco grande de ser atingindo por descargas atmosféricas por causa da alta intensidade de raios nesta região bem como as linhas localizadas ao sul do estado do Rondônia.

**Figura 84-** Mapas de índice cerâmico e mapas de densidade de raios bruta e corrigida pelo modelo de uniformização na Amazônia no trajeto das linhas de transmissões instaladas (sólida), linhas futuras (pontilhada).



**Figura 85 - Problema de saturação.**



## 7.4 Proteção dos sistemas elétricos

O objetivo dessa parte é de estimar a incidência de raios sobre as linhas de transmissão e torres de alta tensão instaladas na Amazônia brasileira para a otimização dos sistemas de proteção.

### 7.4.1 Método

A incidência de raios sobre as linhas de transmissão e torre de alta tensão é estimada com um modelo eletrogeométrico a partir da distribuição de pico de correntes registrada pela RDR-SIPAM, calculada no Capítulo 3 e a densidade de raios registrada pela rede STARNET e corrigida pelo modelo de uniformização. O modelo eletrogeométrico de incidência de raios está baseado no conceito de distância ou raio de atração ( $r_s$ ) definida como a distância entre a ponta da descarga piloto (descarga descendente) e a estrutura terrestre (origem do canal ascendente).

De acordo com (RAKOV, 2012) a incidência de raios  $I_r$  em [raios/ano] pode ser estimada com:

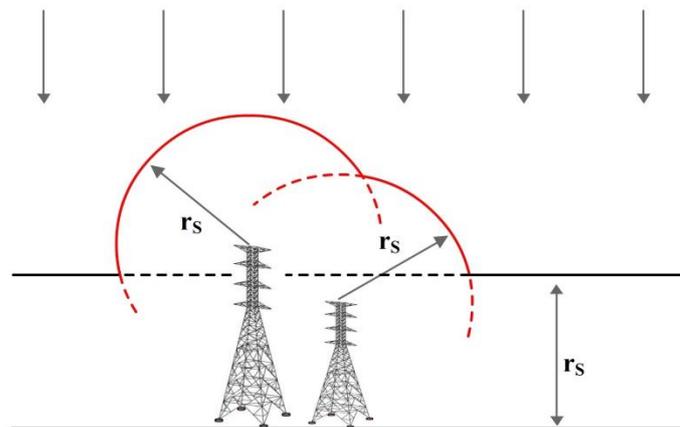
$$I_r = \int_0^{I_{p_{max}}} N_g \cdot f(I_p) \cdot S(I_p) \cdot dI_p \quad (37)$$

com  $N_g$  a densidade de descargas atmosféricas de tipo NS em [raios/m<sup>2</sup>/ano],  $I_p$  o pico de corrente em [kA],  $f(I_p)$  a distribuição de pico de corrente,  $S(I_p)$  a distribuição de superfícies de atração em [m<sup>2</sup>].

#### 7.4.1.1 Superfície de atração

Pode-se definir a superfície de atração como uma superfície imaginária acima do solo e acima da estrutura que se quer proteger no terreno de tal forma que, quando a descarga piloto passa por essa superfície em um local específico, o líder é "capturado" por um ponto específico no solo ou em um objeto aterrado (RAKOV, 2012). A superfície de atração é calculada a partir do raio de atração ( $r_s$ ) como se observa na Figura 86.

**Figura 86** - Superfícies de atração no modelo eletrogeométrico.



Fonte: adaptado de Rakov (2012)

De acordo com (RAKOV, 2012) existem varias expressões na literatura para calcular a distância de atração. Contudo a expressão mais popular, utilizada em muitos padrões de proteção contra descargas atmosféricas, é dada por:

$$r_s = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad (38)$$

com  $r_s$  a distância de atração em [m],  $I_p$  o pico de corrente em [kA].

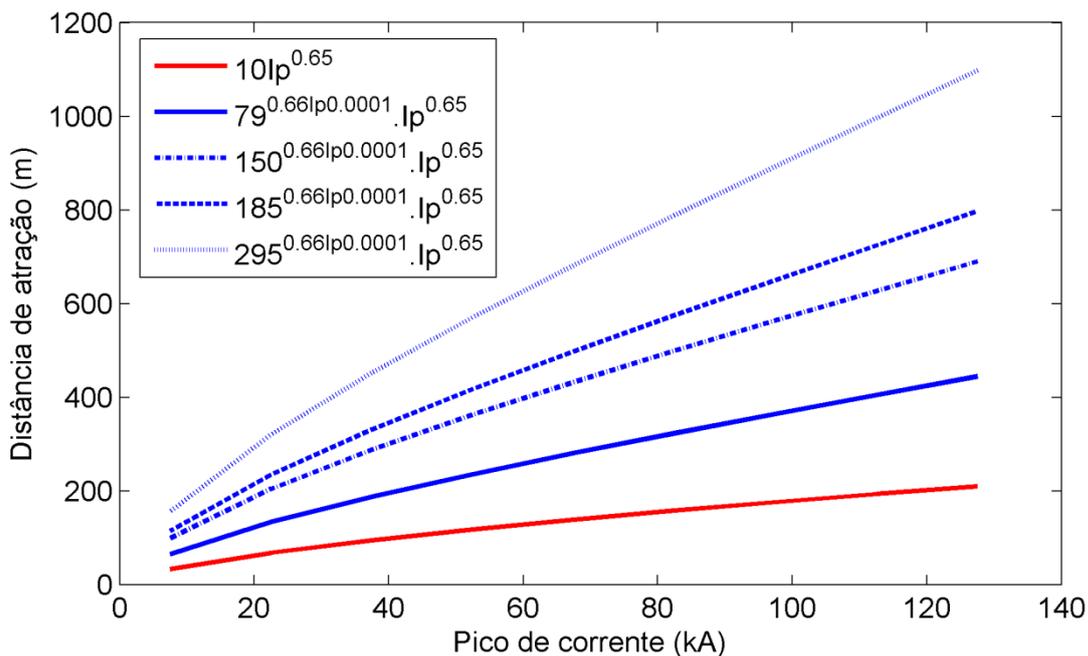
Além disso, (ERIKSSON, 1987) sugere também de utilizar uma expressão que depende da altura da estrutura, além do pico de corrente para se calcular o valor da distância de atração:

$$r_s = H^{0,66} \cdot I_p \cdot 10^{-4} \cdot I_p^{0,65} \quad (39)$$

com  $r_s$  a distância de atração em [m],  $H$  a altura da estrutura em [m] e  $I_p$  o pico de corrente em [kA].

A Figura 87 apresenta uma comparação das duas expressões para calcular a distância de atração. A expressão de Eriksson (1987) é calculada para 4 alturas de torres instaladas na Amazônia brasileira: 79 m, 150 m, 185 m e 295 m. Observa-se primeiro que as curvas de distância de atração usando a altura da estrutura apresentam valores superiores a curva clássica de Rakov (2012). Mais aumenta a altura da estrutura, mais aumenta a curva de distância de atração. Assim para uma descarga atmosférica com 100 kA, a distância de atração é cerca de 180 m para a expressão de Rakov (2012), 400 m para uma torre de 79 m de altura, 570 m para uma torre de 185 m de altura, 660 m para uma torre de 180 m de altura e 910 m para uma torre de 295 m de altura quando calculada pela expressão de Eriksson (1987).

**Figura 87** - Comparação das expressões para calcular a distância de atração.



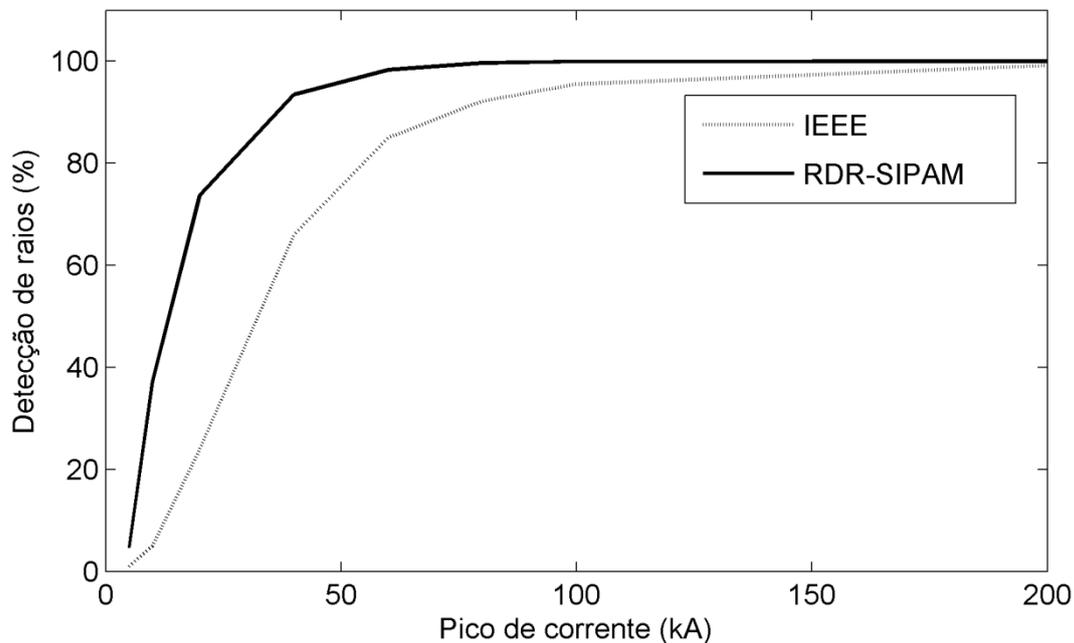
Fonte: adaptado de Rakov (2012) e Eriksson (1987).

#### 7.4.1.2 Distribuição de pico de corrente

A distribuição do pico de corrente registrada pela rede RDR-SIPAM na zona de melhor eficiência de detecção (um círculo de 130 km de raio centrado no ponto 4°S, 48°W) serve como referência para a distribuição de pico de corrente na região amazônica brasileira

(ver Capítulo 3). Na Figura 88, a função de acumulação de pico de corrente da RDR-SIPAM é comparada com a função de acumulação clássica de pico de corrente adotada pelo IEEE, usada em várias normas de proteção contra raios (RAKOV, 2012). Os resultados mostram que a distribuição estatística acumulada da IEEE é superior a distribuição da RDR-SIPAM. Na distribuição estatística acumulada da IEEE, 24% das descargas atmosféricas têm um pico de corrente <20 kA enquanto na distribuição da RDR-SIPAM, 73% das descargas atmosféricas têm um pico de corrente <20 kA. Na distribuição estatística acumulada da IEEE, 95% das descargas atmosféricas têm um pico de corrente <100 kA enquanto na distribuição da RDR-SIPAM, 99% das descargas atmosféricas têm um pico de corrente <100 kA.

**Figura 88** - Comparação das funções de acumulação de pico de corrente da RDR-SIPAM e IEEE.



Fonte: do autor

#### 7.4.1.3 Densidade de descargas atmosféricas

O produto entre a densidade de raios de tipo NS e a distribuição de pico de corrente pode ser calculado a partir do mapa de densidade de raios uniformizada da rede STARNET e da distribuição da Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente, calculada no Capítulo 3. No estudo de avaliação do desempenho da rede STARNET de tipo VLF em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF na Amazônia oriental foi mostrado que na configuração '5.2' ('Cg.Sm.Gl.Ft.Cp'), a rede STARNET é capaz de detectar cerca de 9,7% dos raios NS detectados pela rede RDR-SIPAM. O Fator de Correção dessa configuração, calculado no Capítulo 4, na zona de comparação das duas redes (ou de

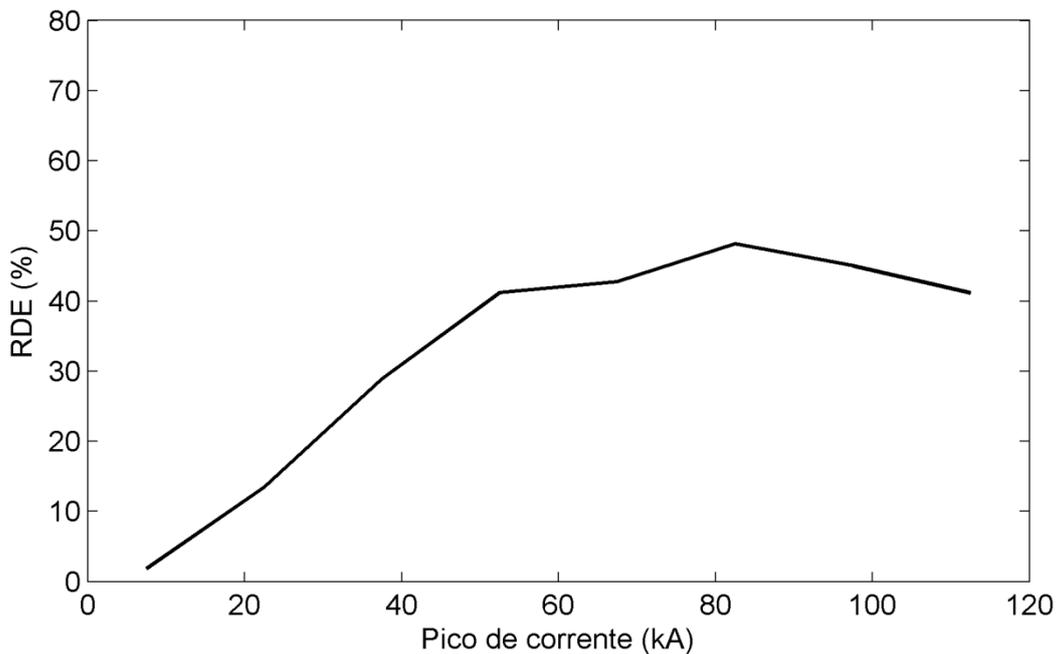
melhor eficiência de detecção da RDR-SIPAM), em relação à configuração de referencia da rede é :

$$\alpha_{K/Kref}(lat, lon) = \alpha_{5.2/7.3}(-4^\circ, -48^\circ) = 1,05 \approx 1$$

Então pode ser considerado numa primeira aproximação que o nível de detecção da rede STARNET na configuração '5.2' é similar ao nível de detecção da configuração de referencia para a uniformização do mapa de densidade de raios da STARNET, nomeada  $Ng_{Kref}$ . A Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente e em relação à RDR-SIPAM, nomeada  $RDE(Ip)$  é apresentada Figura 89. Assim o produto entre a densidade de raios do tipo NS e a distribuição de pico de corrente para a estimação da incidência de raios na equação ( 37 ) pode ser calculado por:

$$Ng.f(Ip) = \frac{Ng_{Kref} \cdot 9,7}{RDE(Ip)} \quad (40)$$

**Figura 89** - Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente e em relação à RDR-SIPAM.



Fonte: do autor

#### 7.4.1.4 Incidência de raios

Ao final a incidência de raios pode ser calculada por:

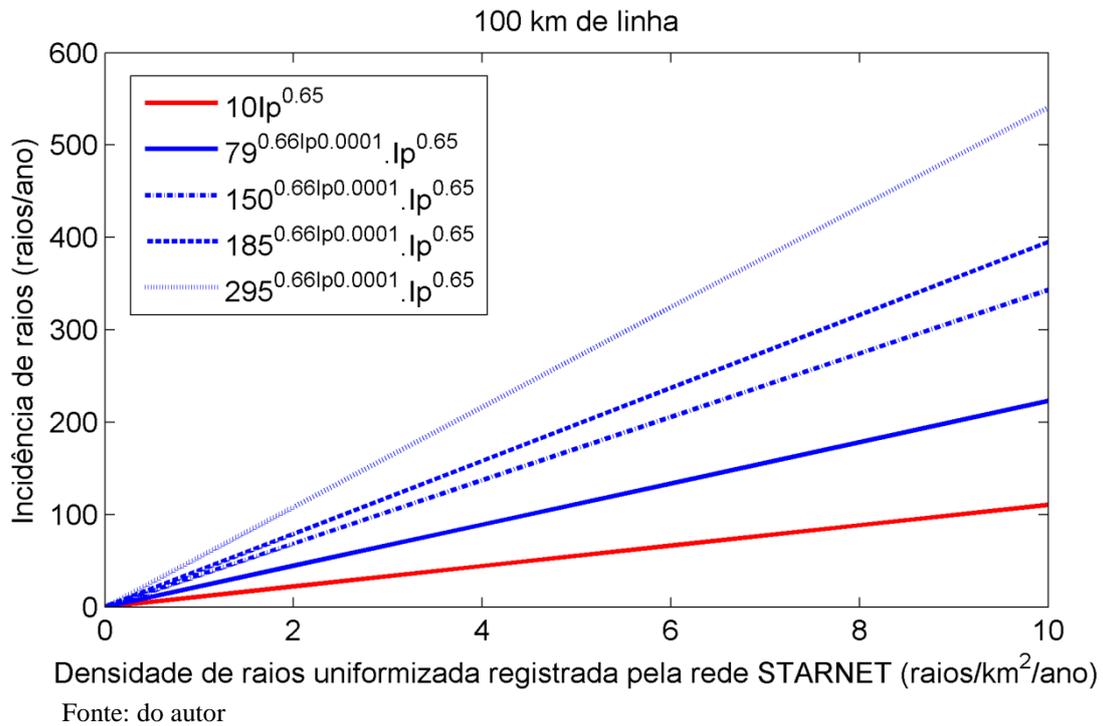
$$I_r = \int_0^{I_{p_{max}}} Ng \cdot f(I_p) \cdot S(I_p) \cdot dI_p = \int_0^{I_{p_{max}}} \frac{Ng_{Kref} \cdot 9,7}{RDE(I_p)} \cdot S(I_p) \cdot dI_p \quad (41)$$

com  $RDE(I_p)$  sendo a Eficiência de Detecção Relativa da STARNET em função do pico de corrente,  $Ng_{Kref}$  a densidade de raios uniformizada da STARNET, e  $S(I_p)$  a superfície de atração da estrutura instalada.

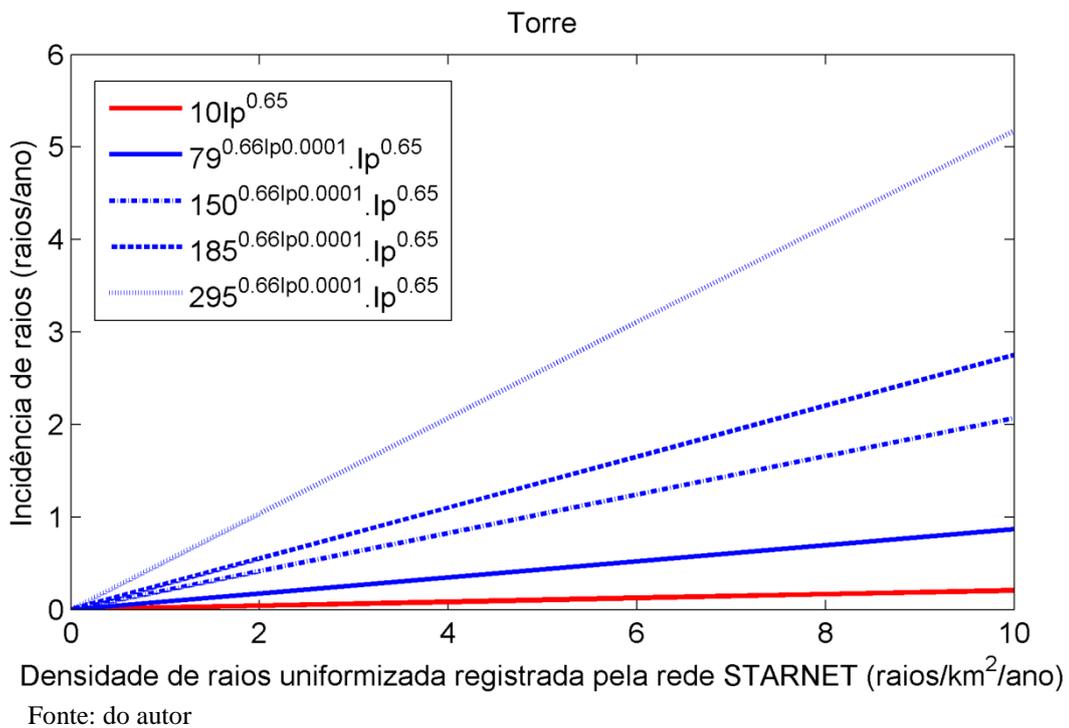
#### 7.4.2 Resultados de estimação da incidência de raios

A estimação da incidência de raios em função da expressão de cálculo da distância de atração e em função da densidade de raios uniformizada registrada pela rede STARNET aplica-se numa secção de 100 km de uma linha de transmissão (Figura 90) e nas torres (Figura 91) instaladas na Amazônia brasileira. No mapa de densidade de raios uniformizado, no trajeto da linha de transmissão entre Tucuruí e Manaus (Figura 84), o valor da densidade varia entre 2 e 9 raios/km<sup>2</sup>/ano. Então a incidência de raios estimada numa secção de 100 km de uma linha de transmissão varia entre 50 raios/ano (para uma altura de 79 m) a 490 raios/ano (para uma altura de 295 m). Da mesma maneira, a incidência de raios estimada numa torre de alta tensão varia entre 0,2 raios/ano (para uma altura de 79 m) e 4,6 raios/ano (para uma altura de 295 m).

**Figura 90** - Estimação da incidência de raios numa secção de 100 km de linha de transmissão em função da expressão de cálculo da distância de atração e da densidade de raios uniformizada registrada pela rede STARNET.



**Figura 91** Estimação da incidência de raios numa torre em função da expressão de cálculo da distância de atração e da densidade de raios uniformizada registrada pela rede STARNET.



### **7.4.3 Conclusão**

O objetivo do capítulo 7 era de avaliar os riscos relacionados a descargas atmosféricas, no trajeto das novas linhas de transmissão instaladas na região Amazônica brasileira com torres extremamente altas (até 295m de altura) para a otimização dos sistemas de proteção. Para isso, primeiramente o modelo de uniformização foi aplicado na geração de mapas cerânicos e de densidades de raios anuais na região Amazônica. A partir dos mapas de densidade de raios anuais uniformizadas foram calculadas mapas de padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissão para determinar as áreas críticas e depois estimar a incidência de raios nas linhas de transmissão e nas torres com um modelo eletrogeométrico.

Os mapas de índice cerânico e densidade de raios mostram os padrões de descargas atmosféricas na Amazônia. Contudo, existem regiões da Amazônia que sempre apresentam anomalias de densidade de raios positivas como as regiões de Belém e Manaus, bem como o estado do Tocantins. As características de densidade de raios permitem avaliar o nível de proteção através da estimativa da incidência de raios a ser considerado para as linhas de transmissão e torres de alta tensão instaladas na região. Assim na região amazônica a incidência de raios foi estimada a partir da distribuição de pico de correntes registrada pela RDR-SIPAM e da densidade de raios registrada pela rede STARNET e corrigida pelo modelo de uniformização, e para duas expressões da distância de atração.

## Capítulo 8 – CONCLUSÃO

O objetivo desta tese de doutorado foi de elaborar mapas de índice cerâmico e de densidades de raios confiáveis para o planejamento das linhas de transmissão do setor elétrico na Amazônia e para a otimização dos sistemas de proteção. A rede STARNET foi escolhida para a geração desses produtos climáticos relacionados à ocorrência de descargas atmosféricas por ser atualmente o único sistema terrestre, gratuito, e contínuo, cobrindo toda a Região Amazônica.

### 8.1 Base de dados

O Capítulo 3 analisou, em detalhe, a partir da base de dados histórica da rede STARNET entre 2008 e 2011, o comportamento temporal e espacial da rede modelizando os Diagramas Operacionais e simulando a Cobertura Teórica da rede em função da localização das estações ativas.

De um lado, a simulação da cobertura mostrou que a rede STARNET possui uma cobertura global e uniforme sobre toda a região Amazônica devido à distribuição dos sensores. Contudo, essa simulação supõe que cada sensor da rede tem o mesmo padrão de detecção, estável e contínuo no espaço.

De outro lado, a rede STARNET sofreu desde o início de um funcionamento intermitente das várias estações instaladas ao longo do tempo e operava geralmente com menos sensores do que o número máximo de sensores disponíveis. De uma hora a outra a rede mudava de número de sensores ativos. A rede encontrou também vários períodos de falhas onde nenhuma descarga foi registrada, quando o número de sensores disponíveis era inferior ao mínimo necessário do método ATD de localização de descargas atmosféricas que seja 4 sensores. Porém, o desempenho de uma rede terrestre de detecção de raios (a cobertura, a Eficiência de Detecção e o Erro de Localização) depende do número e do espaçamento entre as várias estações. Observa-se um impacto do número de sensores ativos na Eficiência de Detecção da rede STARNET.

Então, a rede STARNET tem uma cobertura global na Amazônia, mas sua Eficiência de Detecção não é constante devido ao funcionamento intermitente dos

sensores. Nesse contexto, o desempenho da rede STARNET precisa ser avaliado na Amazônia em função da configuração dos sensores em operação para uniformizar a base de dados de raios em relação a uma configuração de Referência e realizar cálculos estatísticos dos padrões de descargas atmosféricas confiáveis.

Por fim, o desempenho da rede STARNET foi avaliado em relação à rede RDR-SIPAM de tipo LF/VLF com o cálculo da Diferença Temporal, Erro de Localização, e Eficiência de Detecção Relativa em função do pico de corrente.

O desempenho da rede STARNET, operando com cinco estações ativas e cobrindo toda a Região Amazônica foi avaliado em relação à rede RDR-SIPAM, o único sistema de alta resolução cobrindo parcialmente a Amazônia oriental. Os critérios do método usado de inter comparação de rede (uma janela temporal de 1 ms e uma faixa espacial de 50 km) foram validados através da distribuição de Diferença Temporal e de Localização: 94% dos raios NS coincidentes teve uma Diferença Temporal  $< 300 \mu\text{s}$  e 89% dos raios NS coincidentes teve um Erro Espacial  $< 30 \text{ km}$ .

Além da Eficiência de Detecção das descargas atmosféricas de tipo NS (em torno de 10%) e do Erro de Localização (em torno de 16 km), que usualmente caracterizam o desempenho de um sistema, a dependência entre a Eficiência de Detecção e os valores de pico de correntes deve também ser considerada na análise de dados. Os resultados mostraram uma forte dependência da eficiência de detecção das descargas atmosféricas de tipo NS da rede STARNET em função do pico de corrente: os raios com pico de corrente entre 0 e 20 kA têm a Eficiência de Detecção Relativa baixa ( $< 10\%$ ) e os raios com pico de corrente  $> 40 \text{ kA}$  têm uma Eficiência de Detecção Relativa alta (entre 30% e 55%).

A dependência da Eficiência de Detecção em função do pico de corrente é uma informação relevante para a análise de dados de descargas atmosféricas em regiões tropicais úmidas, como a Amazônia. Os valores dos parâmetros médios resultantes são importantes (entre outros) para a proteção dos sistemas elétricos e das linhas de transmissão de energia de longa distância que atualmente estão sendo instalados na região.

## **8.2 Exploração das configurações estáveis**

O capítulo 4 apresentou uma avaliação estatística do desempenho da rede STARNET em função da configuração (definida como a combinação das estações em operação) através o calculo de vários parâmetros como: a densidades de raios para comparar o nível de detecção das configurações da rede em função do numero de sensores ativos; a Taxa de Participação dos sensores ativos para avaliar a eficiência relativa de um sensor dentro de uma configuração da rede; o número médio de sensores que participam na solução de localização para avaliar o comportamento de uma configuração de sensor da rede; e a Taxa de Localização das combinações de sensores para avaliar a eficiência relativa de uma combinação de sensores dentro de uma configuração da rede.

A exploração estatística das configurações estáveis mostrou que o nível de detecção da rede STARNET era muito afetado pelas falhas de sensores ativos principalmente quando apenas 4 sensores estavam funcionando. A Eficiência de Detecção dos sensores disponíveis da rede apresentou grandes variações espaciais, então a perda de um sensor de alta eficiência (como o sensor de São Martinho) numa zona, tem um impacto maior na Eficiência de Localização da rede que a perda de um sensor fraco (como o sensor de Fortaleza ou pior o sensor de São Paulo Test). Cada sensor tem um padrão de detecção próprio, então cada combinação de sensores tem um padrão de participação na detecção próprio. A Eficiência de Localização de uma configuração da rede se relaciona á os níveis de detecção das suas várias combinações de sensores. Então, os resultados estatísticos de Taxa de Localização podem ser usados para construir um modelo de uniformização dos níveis de detecção da rede em função das estações ativas da rede.

## **8.3 Modelo de uniformização**

O capítulo 5 apresentou o modelo de uniformização. O objetivo do modelo de uniformização era de corrigir o nível de detecção de cada configuração de sensores da rede (número e localização dos sensores em operação) em relação a uma configuração de Referencia.

Para construir o modelo de uniformização supõe-se que cada sensor tem um padrão de detecção estável, então cada combinação de sensores tem um padrão de participação na detecção estável. Além disso, cada descarga atmosférica é detectada por vários sensores, mas localizada por uma única combinação de sensor. Então, o padrão de localização de uma configuração da rede se relacionou á o padrão de participação de suas combinações de sensores. O modelo foi baseado nos resultados estatísticos das configurações da rede estáveis calculando os Fatores de Localização entre duas configurações da rede e o Fator de Uniformização entre a melhor configuração da rede e as outras identificadas na base de dados. Assim, esse modelo de uniformização responde ao problema de serviço intermitente dos sensores observados nos Diagramas de Operação e se adapta ao problema dos padrões próprios de detecção de cada sensor da rede.

Os Mapas de Fator de Uniformização para cada configuração encontrada na base histórica entre janeiro de 2008 até dezembro de 2011 foram calculadas em relação à uma configuração de referencia com 7 sensores ativos, '7.3' (Ma.Cu.Cg.Sm.Gl.Ft.Cp). Os Mapas de Fator de Uniformização apresentam grandes variações em função do número e da localização dos sensores ativos na configuração por causa da variação entre os padrões de detecção dos sensores disponíveis da rede.

Contudo, os valores dos Mapas de Fator de Uniformarão sofrem de divergência devido à distribuição da Eficiência de Detecção caótica dos sensores fracos (como os sensores de Brasília e Fortaleza), especialmente quando o Fator de Uniformização resulta do produto de 3 outros Fatores de Uniformarão como no caso das configurações Ponte. Por isso, o modelo precisa de um fator de saturação da correção, baseado em um limite físico.

Além disso, a forma multiplicativa do modelo de uniformização não permite a correção da falta de dados quando a rede tem um nível de eficiência tão baixa que ela não consegue detectar nenhuma descarga ou quando tem menos de 4 sensores ativos. A uniformização da base de descargas atmosféricas é limitada pelo desempenho de cada configuração da rede com seu limite mínimo de detecção. Por isso o modelo precisa de um Offset, calculado com um modelo de estimação de descargas atmosféricas.

## **8.4 Validação do modelo de uniformização**

O capítulo 6 apresentou a validação do modelo de uniformização com dois métodos matemáticos: calculando com modelo e comparando os Fatores de Localização de uma cadeia de configurações estáveis inclusivas; calculando com o modelo as Taxas de Participação de cada sensor de uma configuração estável e comparando os resultados com as Taxas de Participação calculadas estatisticamente.

Os resultados de validação matemática foram afetados pelas variações no tempo das eficiências de detecção dos sensores mais instáveis, devido provavelmente às variações das interferências ou do ruído eletromagnético. Contudo, os resultados obtidos são aceitáveis para a validação do modelo de uniformização, uma vez que a média dos desvios na área estudada é inferior a 0,1.

## **8.5 Proteção dos sistemas elétricos**

O objetivo do capítulo 7 era de avaliar os riscos relacionados a descargas atmosféricas, no trajeto das novas linhas de transmissão instaladas na região Amazônica brasileira com torres extremamente altas (ate 295m de altura) para a otimização dos sistemas de proteção. Por isso, primeiro o modelo de uniformização foi aplicado na geração de mapas cerâmicas e de densidades de raios anuais na região Amazônica. A partir dos mapas de densidade de raios anuais uniformizadas foram calculadas mapas de padrões de descargas atmosféricas no trajeto das linhas de transmissões para determinar as áreas críticas e depois estimar a incidência de raios nas linhas de transmissões e nas torres com um modelo eletrogeométrico.

Os mapas de índice cerâmico e densidade de raios mostram os padrões de descargas atmosféricas na Amazônia. Existem regiões da Amazônia que sempre apresentam anomalias de densidade de raios positivas como as regiões de Belém e Manaus, bem como o estado do Tocantins. As características de densidade de raios permitem de avaliar o nível de proteção através da estimação da incidência de raios a ser considerado por as linhas de transmissões e torres de alta tensão instaladas na região. Assim na região amazônica a incidência de raios foi estimada a partir da distribuição de pico de correntes registrada pela RDR-SIPAM e da densidade de raios registrada pela

rede STARNET e corrigida pelo modelo de uniformização, e para duas expressões da distância de atração.

## **8.6 Futuros trabalhos**

Para melhorar o modelo de uniformização se pode desenvolver um modelo híbrido paralelo que combine um modelo de uniformização estatístico de matemática combinatória (fator de escala) com um modelo de estimação de descargas atmosféricas, a partir de um ou vários parâmetros meteorológicos (offset e saturação).

Para melhorar a estabilidade da rede STARNET e aumentar a sua eficiência de detecção e conseqüentemente o número de raios detectados (como os raios com um pico de corrente fraco), novas estações foram instaladas: em Belém, (agosto de 2012), Cabo Verde e Ilhéus em 2013. Contudo, a instalação de novos sensores aumenta de forma exponencial também, o número de configurações possíveis. Então o nível de correção das novas configurações da base de dados histórica da rede STARNET entre 2012 e 2013 precisa ser avaliado. Parece que o nível de correção aumenta com o número de sensores ativos. Então, quando aumentar o número de sensores disponível da rede, deveria aumentar a uniformidade temporal e espacial de detecção da rede. Em seguida, se pode calcular os padrões de descargas atmosféricas sobre 6 anos de dados de descargas atmosféricas da rede STARNET de 2008 até 2013 e depois melhorar a estimação da incidência de raios nas linhas e torre de transmissão na Amazônia.

## Bibliografia

ABARCA, S. K.; CORBOSIERO, L. K.; GALARNEAU, T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. **J. Geophys. Res.**, p. 115, 2010.

ALMEIDA, A. C.; ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; MONTEIRO, J. H. A.; SOUZA, W. A. **Statistical Analysis of High Intensity Lightning Strokes Detected by SIPAM'S LDN over the Amazon Region**. GROUND 2008 & 3d LPE. Florianopolis, Brazil: [s.n.]. 2008.

ALMEIDA, A. C.; ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; SÁ, J. A. S.; PISSOLATO FILHO, J. A. Cloud-to-ground lightning observations over the eastern Amazon Region. **Atmospheric Research**, v. 117, p. 86-90, 2012.

ASSIS, M. S. **Comments on Some Radio Wave Propagation Mechanisms in the Amazon Region**. Electromagnetics Research Symposium. Malaysia: [s.n.]. 2012.

BENT, R. B.; LYONS, W. A. **Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (lightning position and tracking system) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique**. Atmos. Electricity. Albany: [s.n.]. 1984.

BETZ, H. D.; SCHMIDT, K.; LAROCHE, P.; BLANCHET, P.; OETTINGER, W. P.; DEFER, E.; DZIEWIT, Z.; KONARSKI, J. LINET – An international lightning detection network in Europe. **LINET – An international lightning detection network in Europe**, v. 91, p. 564–573, 2009.

CECIL, D. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. **Atmospheric Research**, p. 1-11, 2012.

CHAMBERS, J.; CLEVELAND, W.; KLEINER, B.; TUKEY, P. **Graphical Methods for Data Analysis**. [S.l.]: Wadsworth, 1983.

CHRISTIAN, H. J. et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. **J. Geophys. Res.**, p. 108(D1), 4005, 2003.

CHRONIS, T. G.; ANAGNOSTOU, E. N. Error analysis for a long-range lightning monitoring network of ground-based receivers in Europe. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, p. 1984–2012, 2003.

CHRONIS, T. G.; ANAGNOSTOU, E. N. Evaluation of a Long-Range Lightning Detection Network With Receivers in Europe and Africa. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society**, v. 44, p. 1504-1510, 2006.

- CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 499-518, 2009.
- CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, E. A. A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **J. Geophys. Res.**, v. 103(D8), p. 9035–9044, 1998.
- DOWDEN, R. L.; BRUNDELL, J. B.; RODGER, C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 817–830, 2002.
- ERIKSSON, A. J. The incidence of lightning strikes to power lines. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 2, n. 3, p. 859-870, 1987.
- FINKE, U.; KREYER, O. **Review of existing lightning location systems**. [S.l.]. 2002.
- GAFFARD, C.; NASH, J.; ATKINSON, N.; BENNETT, A.; CALLAGHAN, G.; HIBBETT, E.; TAYLOR, P.; TURP, M.; SCHULZ, W. **Observing Lightning Around the Globe from the Surface**. 20th International Lightning Detection Conference. Tuscon, Arizona, USA: [s.n.]. 2008.
- GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281, p. 180-195, 2009.
- HOCHBERG, Y.; TAMHANE, A. C. **Multiple Comparison Procedures**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1987.
- HOLLE, R. L.; LOPEZ, R. E. **Overview of real-time lightning detection systems for use by meteorological services**. [S.l.]. 1993.
- IEEE. **Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**. [S.l.]. 2004.
- JERAULD, J.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; RAMBO, K. J.; JORDAN, D. M. An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning, p. 110, D19106, 2005.
- KINDERMANN, G. **Proteção Contra Descargas Atmosféricas em Estruturas Edificadas**. [S.l.]. 2009.
- LACERDA, M.; JAQUES, R. **Diurnal variation of lightning activity based on data recorded by the global lightning location system STARNET**. XIV International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.]. 2011.
- LAFKOVICI, A.; HUSSEIN, A. M.; JANISCHEWSKYJ, W.; CUMMINS, K. L. Evaluation of the Performance Characteristics of the North American Lightning Detection Network Based on Tall-Structure Lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, n. 3, p. 630-641, 2008.

LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V.; BETZ, H. D.; SCHMIDT, K. A comparison of lightning data provided by ZEUS and LINET networks over Western Europe. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 9, p. 1713–1717, 2009.

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

LESSA, L. A. S.; ALBUQUERQUE, J. C.; ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; ALMEIDA, A. C.; MONTEIRO, J. H. A.; SOUZA, W. A. P.; ESTEVES, E. A. C. **Lightning strikes along an electric energy transmission line in Belém – PA – Brazil.** GROUND2008 & 3rd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects. Florianópolis, Brasil: [s.n.]. 2008. p. 512-514.

LEWIS, E. A.; HARVEY, R. B.; RASMUSSEN, J. E. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin. **J. Geophys. Res.**, v. 65, p. 1879–1905, 1960.

LOJOU, J. Y.; MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L.; DEMETRIADES, N. W. S. Nowcasting of thunderstorms using VHF measurements. In: BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. **Lightning: Principles, Instruments and Applications.** Dordrecht, NL: Springer-Verlag, 2008.

MACGORMAN, D.; RUST, W. **The Electrical Nature of Storms.** New York: Oxford University Press, 1998. 442 p.

MALAN, D. J. Les Décharges dans l'air et la charge inférieure positive d'un nuage orageuse. **Annales de Geophysique**, v. 8, p. 385, 1952.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, ; ALVES, L.; SOARES,. **Eventos extremos sazonais: secas de 2005 e 2010 e enchentes de 2009.** [S.l.]. 2011.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia.** Brasília, Brasil. 2010.

MORALES, C. A. **Continuous thunderstorm monitoring: Retrieval of precipitation parameters from lightning observations.** USA. 2001.

MORALES, C. A. R.; ANAGNOSTOU, E.; WILLIAMS, K. Evaluation of Peak Current Polarity Retrieved by the ZEUS Long-Range Lightning Monitoring System. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, p. 32-36, 2007.

MORALES, C. A.; ANAGNOSTOU, E. N. Extending the Capabilities of High-Frequency Rainfall Estimation from Geostationary Based Satellite Infrared via a Network of Long-Range Lightning Observations. **American Meteorological Society**, p. 4, 141-159, 2003.

MORALES, C. A.; NEVES, J. R.; ANSELMO, E. M. **Sferics Timing and Ranging Network – STARNET: Evaluation over South America.** XIV International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.]. 2011.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O. **Comparison of Cloud-to-Ground Lightning Flash Data in Brazil using Different Techniques**. X International Symposium on Lightning Protection. Curitiba, Brazil: [s.n.]. 2009.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). **Atmospheric Research**, v. 91, p. 546–563, 2009.

PEREIRA, C. S.; ALMEIDA, A. C.; ROCHA, E. J. P.; SIMOES NETO, B.; ROCHA, B. R. P. **Lightning Frequency Of Occurrence Distribution Over Eastern Amazonia**. GROUND2008 & 3rd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects. Florianopolis, Brasil: [s.n.]. 2008. p. 8, 459-462.

PESSI, A. T.; BUSINGER, S.; CUMMINS, K. L.; DEMETRIADES, M. W. S.; MURPHY, M.; PIFER, B. Development of a Long-Range Lightning Detection Network for the Pacific: Construction, Calibration, and Performance. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, p. 145-166, 2009.

POMPEU, M. M.; SOUZA, J. R. S.; MOTA, M. A. S.; RIBEIRO, W. M. N.; ALMEIDA, A. C. **Lightning Observations During CAPE Experiment BARCA, in Santarem – PA – Brazil**. XIV International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.]. 2011.

RAKOV, V. A. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection. **Journal of Lightning Research**, v. 4, p. 3-11, 2012.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.

RICHARD, P.; SOULAGE, A.; BROUTET, F. **The SAFIR lightning warning system**. International Conference of Lightning Static Electricity. Bath, U.K: Ministry of Defence Procurement Executive. 1989. p. 2.

ROCHA, B. R. P.; ANDRADE JR, J. G.; RIBEIRO, W. M. N.; SANTOS, M. M. N.; SOUZA, J. R. S. **Efeitos de Descargas Eléctricas Nuvem-Solo no Sistema Telefônico de Belém no Período 95-96**. First International Conference on Grounding and Earthing. Belo Horizonte. Brasil: [s.n.]. 1998. p. 1. 89-92.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; COSTA, M. J. **Electric and Magnetic Fields from Lightning in Belem**. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Ouro Preto: [s.n.]. 1996. p. 55-58.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; PEREIRA, C. S.; MOTA, G. S.; ROCHA, E. J. P.; LOBATO, M. P.; LESSA, L. A. S.; MONTEIRO, J. H. A. **Lightning Characteristics Time Distribution over Four Locations in Eastern Amazonia**. IX International Symposium on Lightning Protection. Foz do Iguaçu, Brasil: [s.n.]. 2007. p. 1, 31-34.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; ROCHA, A. O. F.; CONDE, C. L. R.; NEVES, A. J. A. **Efeito de Descargas Eléctricas no Sistema de Distribuição de Belém**. IV

SIMOPA, IV Seminário Integrado de Manutenção, Operação e Administração da ELETRONORTE. Belém, Brasil: [s.n.]. 1996. p. 237-242.

RODGER, C. J.; BRUNDELL, J. B.; DOWDEN, L. R.; THOMSON, N. R. Location accuracy of long distance VLF lightning location network. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 747–758, 2004.

RODGER, C. J.; WERNER, S.; BRUNDELL, J. B.; LAY, E. H.; THOMSON, N. R.; HOLZWORTH, R. H.; DOWDEN, R. L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study. **Ann. Geophys.**, v. 24, p. 3197–3214, 2006.

SÁ, A. J. S.; ALMEIDA, A. C.; ROCHA, B. R. P.; MOTA, M. A. S.; SOUZA, J. R. S.; DENTEL, L. M. Lightning Forecast Using Data Mining Techniques on Hourly Evolution of the Convective Available Potential Energy. **CBIC**, 2011.

SAID, R. K.; INAN, U. S.; CUMMINS, K. L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank. **J. Geophys. Res.**, v. 113, p. D23108, 2010.

SAID, R. K.; MURPHY, M. J.; DEMETRIADES, N. W. S.; CUMMINS, K. L.; INAN, U. S. **Methodology and Performance Estimates of the GLD360 Lightning Detection Network**. XIV International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.]. 2011.

SHAO, X. M.; STANLEY, M.; REGAN, A.; HARLIN, J.; PONGRATZ, M.; STOCK, M. Total Lightning Observations with the New and Improved Los Alamos Sferic Array (LASA). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, p. 1273-1288, 2006.

SHIGA, A. A.; PIANTINI, A.; PEGOLLO, C. A. G. **Custos e Conseqüências das Descargas Atmosféricas no Sistema Elétrico**. Brasil. 2008.

SOUZA, J. R. S.; ROCHA, B. R. P.; CARREIRA, G. T. **CG - Lightning Observation (and applications) Around Belém, During the 1995-1998 Period**. International Symposium on Lighting Protection. São Paulo: [s.n.]. 1999. p. 17-21.

SOUZA, J. R. S.; ROCHA, B. R. P.; COSTA, J. M.; DUTRA, S. L. G. **Características dos Eventos de Raios Nuvem-Solo e sua Distribuição em Área no Leste do Pará**. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. São Paulo: [s.n.]. 1997. p. 1152-1155.

SOUZA, W. A. P.; ROCHA, B. R. P.; LESSA, L. A. S.; MONTEIRO, J. H. A.; ALMEIDA, A. C.; SOUZA, J. R. S. **A Performance Analysis of SIPAM s Amazonian Lightning Detection and Location Network**. GROUND2008 & 3rd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 503-505.

STUTZMAN, W. N.; THIELE, G. A. **Antenna Theory and Design**. Danvers, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

THÉRY, C. Evaluation of LPATS data using VHF interferometric observations of lightning flashes during the Eulinox experiment. **Atmospheric Research**, v. 56, p. 397-409, 2001.

THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P. R.; RISON, W.; HUNYADY, S. J.; WINN, W. P.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. Accuracy of the lightning mapping array. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. D14207, 2004.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. Orlando, Florida, USA: Academic Press Inc., 1987.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. [S.l.]: Dover Publications, Inc, 2001.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; KRIDER, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, p. 33-38, 1975.

VOLLAND, H. **Atmospheric Electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995.

WEIDMAN, C. D.; KRIDER, E. P.; UMAN, M. A. Lightning amplitude spectra in the interval from 100 kHz to 20 MHz. **Journal of Geophysical Research Letter**, v. 8, p. 931-934, 1981.

YOSHIDA, S. **Radiations in Association with Lightning Discharges**. [S.l.]. 2008.

## Anexo A - REDE RDR-SIPAM

O anexo A detalha algumas características da rede RDR-SIPAM como as coordenadas dos sensores e os campos dos arquivos da base de dados de descargas atmosféricas.

**Tabela 18** - Coordenadas dos sensores da rede RDR-SIPAM.

<b>Localidade</b>	<b>Uf</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
IMPERATRIZ	MA	-5.53278017	-47.456699
BARRA DO CORDA	MA	-5.500830173	-45.216702
CAROLINA	MA	-7.324999809	-47.464199
SÃO FÉLIX DO ARAGUAIA	MT	-11.6328001	-50.669701
BELÉM	PA	-1.411939979	-48.465
BREVES	PA	-1.678060055	-50.474701
PARAGOMINAS	PA	-3.009170055	-47.340801
TUCURUÍ	PA	-3.782779932	-49.7178
PARAUPEBAS	PA	-6.067500114	-49.902199
REDENÇÃO	PA	-8.20361042	-49.981899
NATIVIDADE	TO	-11.69779968	-47.726398
SÃO LUIS	MA	-2.5814828	-44.234401

**Tabela 19** - Campos dos arquivos da rede RDR-SIPAM.

<b>Campos dos arquivos</b>	<b>Informação</b>	<b>Nome do Campo</b>	<b>Nº</b>
VERSÃO UALF	UALF = Universal ASCII Lightning Format	INDEX1	1
ANO	[ano]	ANO	2
MÊS	[mês]	MÊS ou M0xF2S	3
DIA	[dia]	DIA	4
HORA	[h] em UTC	HORA	5
MINUTO	[mn]	MINUTO	6
SEGUNDO	[s]	SEG	7
NANOSEGUNDO	[ns], campo 'shape' errado	MILISEG	8
LATITUDE	[°]	LAT	9
LONGITUDE	[°]	LONG	10
CORRENTE DE PICO	[kA] → polaridade	IC	11
MULTIPLICIDADE		MULT	12
NUMERO DE SENSORES	Participando na solução	N_SENS	13
GRAUS DE LIBERDADE		A	14
ÂNGULO HORARIO A PARTIR DE 0N		B	15
COMPRIM MAIOR EIXO ELIPSE	[km]	C	16
COMPRIM MENOR EIXO ELIPSE	[km[	D	17
Q QUADRADO		E	18
TEMPO SUBIDA	[µs[	F	19
DECAIMENTO	[µs]	G	20
MAX TAXA DE SUBIDA	[kA/µs]	H	21
CC 1 CG 0	Tipo de raio NS ou NN	TIPO	22
IND ÂNGULO		x0xB6NGULO	23
IND SINAL		SINAL	24
IND TEMPO		TEMPO	25

## **Anexo B: REDE STARNET**

O anexo B detalha algumas características da rede STARNET como as coordenadas dos sensores e os campos dos arquivos da base de dados de descargas atmosféricas.

**Tabela 20** - Coordenadas dos sensores da rede STARNET.

<b>Localidade</b>	<b>Uf</b>	<b>Pais</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Brasília		Brasil	-15,778	-47,928
Manaus	AM	Brasil	-3,106	-60,026
Campo Grande		Brasil	-20,444	-54,648
São Martinho da Serra		Brasil	-29,539	-53,855
Guadalupe	-	França	17,003	-62,064
Fortaleza		Brasil	-3,718	-38,543
São Paulo	SP	Brasil	-23,548	-46,638

**Tabela 21** - Campos dos arquivos da rede STARNET.

<b>Campos dos arquivos</b>	<b>Informação</b>	<b>N°</b>
ANO	[ano]	1
MÊS	[mês]	2
DIA	[dia]	3
HORA	[h] em UTC	4
MINUTO	[mn]	5
SEGUNDO	[s]	6
MICROSSEGUNDO	[ $\mu$ s]	7
LATITUDE	[°]	8
LONGITUDE	[°]	9
Erro espacial	[m], Maior erro de elipse d0 ATD	10
Erro temporal	[ $\mu$ s], Erro do ATD	11
Qualidade	0=bom, 1=suspeito, 2=ruim	12
Numero de sensores usados	4, 5, 6 ou 7	13
Numero de pares de ATD usadas	2*numero de sensores	14
Sensor Brasília	1=participando na solução, Fora do arquivo README (21= Portugal)	21
Sensor Manaus	1=participando na solução, Fora do arquivo README (22= Ethiopia)	22
Sensor Campo Grande	1=participando na solução	25
Sensor Martinho da Serra	1=participando na solução	26
Sensor Guadalupe	1=participando na solução	27
Sensor Fortaleza	1=participando na solução	28
Sensor São Paulo	1=participando na solução	29

