



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.19.17.51-TDI

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE SPRITES E OS RELÂMPAGOS DAS TEMPESTADES ASSOCIADAS

Fernanda de São Sabbas Tavares

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Osmar Pinto Júnior e pelo Dr. Odin Mendes Júnior, aprovada em 12 de março de 1999.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38EMG42>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.19.17.51-TDI

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE SPRITES E OS RELÂMPAGOS DAS TEMPESTADES ASSOCIADAS

Fernanda de São Sabbas Tavares

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Osmar Pinto Júnior e pelo Dr. Odin Mendes Júnior, aprovada em 12 de março de 1999.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38EMG42>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T197e Tavares, Fernanda de São Sabbas.
Estudo da relação entre sprites e os relâmpagos das tempestades associadas / Fernanda de São Sabbas Tavares. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xxiv+126 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.19.17.51-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Dr. Osmar Pinto Júnior, e Dr. Odim Mendes Júnior.

1. Sprites. 2. Eventos Luminosos Transientes (ELTs). 3. Relâmpagos. 4. Nuvens de Tempestade. 5. Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). I.Título.

CDU 551.594

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

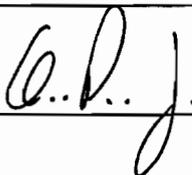
Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Geofísica Espacial.**

Dr. Hisao Takahashi



Presidente

Dr. Osmar Pinto Júnior



Orientador

Dr. Odim Mendes Júnior



Orientador

Dr. José Pissolato Filho



Membro da Banca
Convidado

Dr. Michael J. Taylor



Membro da Banca
Convidado

Candidata: Fernanda de São Sabbas Tavares

São José dos Campos, 12 de março de 1999.

“... Acautela-te, orando e trabalhando incessantemente. Não serás poupado, pois que o êxito da tua produção fraterna na Vinha do Senhor incomoda-os, irrita-os, e, na falta de argumentos justos, usarão estranhas armadilhas e conceitos infelizes para se realizarem ante a chuva de amargura e fel que desabe sobre a tua cabeça. Não obstante, prossegue, sereno e confiante... Diante dessa comovedora realidade, refugia-te nEle ..., ama, e serve sem parar.”

Joana de Ângelis

Dedico esta obra a meus pais,

Edvaldo e Ariete,

e a meus irmãos,

Sandro e Corina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu o respiro da vida e permitiu que eu chegasse até aqui.

Agradeço a meus pais, que me proveram com a indumentária física e foram os meus primeiros orientadores na escola da vida.

Aos amigos do plano invisível pois sem eles jamais teria conseguido.

À minha querida “Tia Nininha” pela orientação e apoio constantes.

Aos orientadores de pesquisa Osmar Pinto Júnior e Odim Mendes Júnior por aceitarem o desafio de realizar este estudo, participando da minha educação acadêmica.

À minha família querida! Mãe, pai, irmão, irmã, tio, tia, vó, vô, primo, papagaio...

A todos os amigos, pela grande contribuição que os amigos sempre nos dão!

Agradeço aos doutores Richard E. Oville e Michael J. Taylor que forneceram grande parte dos dados utilizados neste trabalho, cujas colaborações foram indispensáveis.

Ao Larry Gardner e à Roxanne Dial pela imensa ajuda na extração de informações úteis das fitas com os sprites.

À Global Atmospheric que forneceu a outra grande parte dos dados utilizados!

Agradeço aos doutores Nelson Schuch, Iara R. C. de A. Pinto, Dave D. Sentman, Walter A. Lyons, Richard E. Oville, Michael J. Taylor e a todas as pessoas que contribuíram para a elaboração deste trabalho com suas sugestões.

Ao INPE e aos orientadores acadêmicos.

À CAPES e ao CNPQ que proporcionaram suporte financeiro a esta pesquisa.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos principais: reunir conhecimentos sobre a natureza dos Sprites, que são emissões luminosas na média e alta atmosfera associadas a tempestades e relâmpagos descobertas apenas em 1989; criar uma metodologia própria para análise de relâmpagos de tempestades sobre as quais eles ocorrem e aplicar a metodologia desenvolvida num conjunto de dias nos quais Sprites tivessem sido registrados. Foi estudado um conjunto de sete dias de intensa atividade de Sprites no Meio Oeste dos Estados Unidos, registrados a partir de Yucca Ridge, Colorado. A maioria dos Sprites (65%) ocorreu em associação com relâmpagos positivos nuvem-solo, 34% dos Sprites estavam associados apenas a relâmpagos positivos e 31% a relâmpagos positivos e negativos. A média do pico da intensidade da corrente dos relâmpagos positivos associados a Sprites era maior que a média do pico da intensidade do pico da intensidade de corrente do total de relâmpagos positivos das tempestades analisadas. Observou-se que relâmpagos positivos com picos de intensidade de corrente em torno de 40-50 kA produziram mais Sprites que aqueles com outros valores. Um pequeno número de Sprites (11%) parecia estar associado unicamente a relâmpagos negativos e 24% dos Sprites não estavam associados a nenhum relâmpago. A corrente total dos relâmpagos negativos da tempestade se manteve alta durante o período de ocorrência de sprites. A existência de um número significativo de Sprites para os quais não foi possível encontrar relâmpagos positivos aos quais eles estivessem associados sugere a existência de um possível efeito cumulativo para os relâmpagos positivos, que faria parte dos mecanismos de geração de Sprites, ainda não bem compreendidos. No dia 203, único no qual foi documentado o início do período de ocorrência de sprites, o início da produção de sprites coincidiu com um período de crescimento constante do número de relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente e de crescimento da corrente total de relâmpagos positivos, indicando que parece existir uma relação entre o início da ocorrência de sprites e um crescimento da atividade de relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente na tempestade.

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN SPRITES AND LIGHTNING FROM THE ASSOCIATED STORMS

ABSTRACT

The main directions of this paper were: to gather some knowledge about the nature of Sprites, emissions of light in the medium and high atmosphere associated with thunderstorms and cloud-to-ground lightning, only discovered in 1989. To develop a particular methodology in order to study the lightning of the Sprite associated storms, and to investigate a Sprite data set throughout the developed methodology. An ensemble of seven days with high activity of Sprites over Midwest USA, recorded from Yucca Ridge, Colorado, was study. Most Sprites (65%) were associated with positive cloud-to-ground lightning, 34% were associated with positive lightning and 31% were associated with positive and negative lightning. The average positive peak current of the Sprites associated lightning was higher than the same values for the storm's total lightning population. There were more Sprites associated with 40-50 kA positive lightning than with any other range of peak current value. A small number of Sprites (11%) seemed to be associated with negative lightning and 24% were not associated with lightning of any polarity. The total negative current remained high during the Sprites' period. The existence of a significant number of Sprites without the parent positive lightning suggests the existence of a cumulative effect in the positive lightning population that would be part of the Sprites' generation mechanism, not very well understood yet. In day 203, only day that the beginning of sprites occurrence was recorded, sprites started to be recorded after a continuous growth in the occurrence rate of storm's positive lightning with high peak current, indicating that it seems to exist a relationship between the beginning of the sprites occurrence and a growth in the rate of occurrence of storm's positive lightning with high peak current.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Imagem obtida com uma câmara de vídeo com alta sensibilidade luminosa.....	1
1.2 Vista a bordo da missão STS-55 do ônibus espacial de relâmpagos e luzes de cidades. A imagem foi produzida da cabina da tripulação.....	3
1.3 Locais onde foram relatadas observações de fenômenos luminosos acima de tempestades. Quadrados correspondem a observações múltiplas e triângulos a observações isoladas.....	4
1.4 Imagem de um “pulso vertical” com 49 km de extensão sobre a região da Serra Gaúcha no Sul do Brasil (lat. 29,4° S e long. 52,3° O), obtida pela missão STS-43, órbita 55 do ônibus espacial.....	8
1.5 Mapa mostrando a região correspondente a observada pela missão STS-43, orbita 55, do ônibus espacial. No mapa estão ressaltadas as cidades utilizadas como referência na imagem e a região de ocorrência do sprite (lat. 29,4° e long. 52,3° O).....	9
2.1 Diagrama esquemático da atmosfera terrestre.....	15
2.2 Desenho artístico de uma cumulonimbus.....	17
2.3 Desenho esquemático ilustrando a distribuição dos centros de carga no interior da nuvem e as camadas de blindagem.....	17
2.4 Diagrama esquemático do CEAG.....	20
2.5 Classificação dos sistemas meteorológicos convectivos de mesoescala α de acordo com suas características físicas, organização e localização.....	22
3.1 Dois eventos de sprites observados em 4 de julho de 1994 durante a campanha “Sprites94”. As imagens da esquerda foram obtidas do avião “Jet Comander”, as centrais e da direita (coloridas) mostram o mesmo evento registrado do avião “Westwind 2”. A primeira linha mostra um grupo de sprites e a paralaxe das estrelas de Ursa Maior relativa a eles. A segunda mostra um pacote de sprites, um dos maiores observados, com tentáculos. A separação entre os aviões era aproximadamente 50 km.....	28
3.2 Fotografia de um relâmpago “aranha” estendendo-se por mais de 140 km.....	29
3.3 Seqüência de imagens de vídeo cobrindo mais de 200 ms mostrando uma série de sprites sucessivos que parecem “dançar” através do quadro da direita para esquerda. A nuvem de tempestade que produziu os eventos estava abaixo do horizonte. A linha pontilhada foi adicionada eletronicamente. A altitude estimada para os topos destes eventos está entre 85-90 km.....	29

3.4 Anatomia de um sprite individual e a relação da sua altura com a.....	30
3.5 - Espectro de um sprite ocorrido às 05:16 UT (16/07/1995). A curva mais grossa representa o espectro do sprite e a mais fina mostra o espectro de uma lâmpada de neon utilizada para calibragem.	
3.5 Pico de corrente dos relâmpagos positivos nuvem-solo associados com sprites em função do tempo, durante uma tempestade no Colorado no dia 6 de agosto de 1994.....	34
3.6 Imagem em preto e branco de um Jato Azul.....	35
3.7 A única fotografia conhecida de um jato azul, ocorrido sobre uma tempestade na Austrália.....	36
3.8 Distribuição cumulativa de relâmpagos negativos nuvem-solo dentro de um raio de 50 km e de um intervalo de ± 5 s em relação a 18 precursores azuis.....	39
3.9 Desenho ilustrando todos os eventos luminosos transientes na Estratosfera e Mesosfera induzidos por relâmpagos conhecidos até o momento.....	42
4.1 Localização dos sensores da NLDN. Triângulos representam sensores IMPACT e círculos representam LPATS.....	45
4.2 Fluxo de dados na NLDN (maiores detalhes no texto).....	47
4.3 Imagem de sprite ocorrido na noite 206 de 1996 coletada pela câmera CCD.....	49
4.4 Exemplo de relâmpagos positivos associados a sprites que ocorreram dentro da região englobada pelo ângulo de abertura da câmera centrado no azimute do eixo direcionador. As retas vermelhas e verdes delimitam a região observável para ângulos azimutais (retas centrais) de 47° e 54° respectivamente.....	55
5.1 Localização geográfica de Yucca Ridge, Colorado (USA), dos Relâmpagos Positivos (pontos vermelhos), dos Positivos Associados a Sprites (asterísticos verdes) e dos Negativos (pontos azuis), no período de 0 a 14 h (TU) dentro da região de 30° a 50° N, 110° a 85° W, para os dias 188, 189, 193, 201, 203, 204 e 206. A figura também mostra a Região Analisada em cada tempestade (delimitada por linhas verdes).....	59
5.2 Exemplo de imagens de sprites dos dias 203, 204 e 206 respectivamente, pertencentes ao Grupo I, capturadas pela câmera CCD. Foram aplicados um ajuste automático de níveis e o filtro na região dos sprites para facilitar a visualização dos mesmos.....	61

5.3 Intensidade de corrente dos relâmpagos positivos em função do tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. Os quadrados pretos são relâmpagos não associados a sprites, os círculos vermelhos são relâmpagos únicos associados a sprites, os triângulos verdes são múltiplos relâmpagos associados a sprites e losangos azuis são sprites para os quais não foi encontrado nenhum relâmpago associado.....	66
5.4 Médias suavizadas da Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Positivos (intervalos de 5 min) em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são as médias de todos os relâmpagos positivos, as vermelhas são as médias da intensidade de corrente dos relâmpagos associados a sprites, as retas p as delimitam o período de observação....	69
5.5 Distribuição do Número de relâmpagos positivos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados em função da Corrente (a) e Distribuição do Número total de relâmpagos positivos das tempestades dos dias analisados em função da Corrente (b).....	70
5.6 Distribuição da Porcentagem de relâmpagos positivos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados em função da Corrente (a) e Distribuição da Porcentagem de relâmpagos positivos das tempestades desses dias em função da Corrente (b).....	71
5.7 Gráficos do Número de Relâmpagos Positivos de toda a tempestade, ocorridos em intervalos de 5 min, em função do Tempo, representado pelas curvas pretas, e do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos, em função do Tempo, representado pelas curvas magentas. As retas pretas delimitam o período de observação. Dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996.....	74
5.8 Gráficos da Correlação entre o Número de Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	76
5.9 Corrente Total dos Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min em função do Tempo para os 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são a corrente total de todos os relâmpagos positivos, as magentas são o Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos em função do Tempo, as retas pretas delimitam o período de observação.....	80
5.10 Gráficos da Correlação entre a Corrente Total de Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	82
5.11 Gráficos “recalculados” da Correlação entre o Número de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min (a) e Número de Sprites no mesmo intervalo e da correlação entre a Corrente total de Relâmpagos Negativos e Número de Sprites (b) para o dia 203.....	83

5.12 Distribuição Temporal do N ^o de Relâmpagos Positivos para faixas de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas vermelhas são o n ^o de relâmpagos com $I < 25$ kA, as verdes são o n ^o de relâmpagos com $25 \text{ kA} \leq I < 50$ kA, as azuis são o n ^o de relâmpagos com $50 \text{ kA} \leq I < 75$ kA e as curvas cians são o n ^o de relâmpagos com $I \geq 75$ kA.....	86
5.13 Gráficos do Número de Relâmpagos Positivos em função da Intensidade de Corrente, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	89
5.14 Gráficos da Porcentagem de Relâmpagos Positivos em relação a todos os relâmpagos da tempestade (positivos e negativos) para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	91
5.15 Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos em função do Tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996. Os quadrados pretos são relâmpagos não associados a sprites, os círculos vermelhos são relâmpagos únicos associados a sprites, os triângulos verdes são múltiplos relâmpagos associados a sprites e losangos azuis são sprites para os quais não foi encontrado nenhum relâmpago associado.....	94
5.16 Médias suavizadas da Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos (intervalos de 5 min) em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996. As curvas pretas são as médias de todos os relâmpagos negativos ocorridos nas tempestades, as vermelhas são as médias da intensidade de corrente dos relâmpagos associados a sprites, as retas pretas delimitam o período de observação.....	96
5.17 Distribuição do Número de relâmpagos negativos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados (a) e Distribuição do Número de relâmpagos negativos das tempestades “geradoras” (b) respectivamente.....	97
5.18 Distribuição da Porcentagem de relâmpagos negativos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados (a) e Distribuição da Porcentagem de relâmpagos negativos das tempestades “geradoras” (b) respectivamente.....	98
5.19 Gráficos do Número de Relâmpagos Negativos de toda a tempestade, ocorridos em intervalos de 5 min, em função do Tempo, representado pelas curvas pretas, e do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos, em função do Tempo, representado pelas curvas magentas. Dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	101
5.20 Gráficos da Correlação entre o Número de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	103

5.21 Gráficos da Corrente Total dos Relâmpagos Negativos, em intervalos de 5 min, em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são a corrente total de todos os relâmpagos negativos, as magentas são o Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos em função do Tempo, as retas pretas delimitam o período de observação...	105
5.22 Gráficos da Correlação entre a Corrente Total de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	107
5.23 Distribuição Temporal do N ^o de Relâmpagos Negativos para faixas de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min, , para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas vermelhas são o n ^o de relâmpagos com $I < 25$ kA, as verdes são o n ^o de relâmpagos com $25 \text{ kA} \leq I < 50 \text{ kA}$, as azuis são o n ^o de relâmpagos com $50 \text{ kA} \leq I < 75 \text{ kA}$ e as curvas cians são o n ^o de relâmpagos com $I \geq 75 \text{ kA}$	110
5.24 Gráficos do Número de Relâmpagos Negativos em função do Tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente..	113
5.25 Gráficos Porcentagem de Relâmpagos Negativos em função da Corrente, em relação a todos os relâmpagos da tempestade (positivos e negativos) para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.....	115

LISTA DE TABELAS

2.1 - Características físicas de um MCC.....	23
4.1- Dados originais dos relâmpagos coletados pela NLDN, fornecidos pela global atmospheric	50
4.2 - Dados no formato utilizado para a análise.....	50
5.1 - Agrupamento de observações de acordo com a intensidade da atividade de sprites.....	60
5.2 - Parâmetros da atividade de sprites.....	63
5.3 - Coeficiente de correlação entre o nº de sprites e nº de relâmpagos positivos e entre nº de sprites e corrente total de relâmpagos positivos.....	77
5.4 - Coeficiente de correlação entre o nº de sprites e nº de relâmpagos negativos, e entre nº de Sprites e corrente total de relâmpagos negativos.....	108

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Mreve retrospectiva histórica.....	2
1.2 Motivação.....	6
CAPÍTULO 2 ALGUNS CONCEITOS PERTINENTES A SPRITES	13
2.1 Camadas atmosféricas.....	13
2.2 Circuito elétrico atmosférico global.....	16
2.3 Sistemas convectivos de mesoescala.....	21
CAPÍTULO 3 FENÔMENOS LUMINOSOS ASSOCIADOS A TEMPESTADES.....	25
3.1 Sprites vermelhos ou sprites.....	27
3.2 Jatos azuis ou jatos.....	35
3.3 Precursores azuis ou precursores.....	38
3.4 Elves, emissões de luz e perturbações vlf causadas por fontes de pulsos eletromagnéticos.....	41
CAPÍTULO 4 EQUIPAMENTOS, DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE	43
4.1 Equipamento ótico.....	43
4.2 Sistema de detecção de relâmpagos.....	45
4.3 Metodologia desenvolvida.....	48
CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	57
5.1 Relâmpagos positivos.....	64
5.2 Relâmpagos negativos.....	92
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na noite de 6 de julho de 1989 foi documentada, através de vídeo, a primeira imagem de uma das novas classes de fenômenos óticos da atmosfera superior associados a nuvens de tempestades, conhecida hoje como “**Sprite**” (pronuncia-se “spraite”). Nessa noite, Robert Franz, John Winckler e outros pesquisadores da Universidade de Minnesota testavam uma câmara de vídeo com alta sensibilidade luminosa observando estrelas e uma tempestade que distava aproximadamente 250 km do sítio de observação. As 22:12:22 LT registraram duas emissões de luz acima das nuvens de tempestade (Figura 1.1), “dois relâmpagos gêmeos originados em topos de nuvens distantes descarregando na estratosfera” (FRANZ et al., 1990). As emissões tinham duração menor que 30 ms e extensão vertical de 20 km, com base em 14 km (altura estimada também para o topo das nuvens).



Figura 1.1 Imagem obtida com uma câmara de vídeo com alta sensibilidade luminosa.

Fonte: Franz et al. (1990).

1.1 Breve retrospectiva histórica

Desde o século passado, há relatos na literatura científica de “relâmpagos não usuais” observados na região acima das nuvens de tempestades noturnas. Esses eventos eram descritos como “Dardos de luz contínua ... ascendendo a altitudes consideráveis, assemelhando-se mais a foguetes do que a relâmpagos” (MACKENZIE; TOYNBEE, 1886), “um rastro luminoso que disparou para cima até 15 graus aproximadamente, quase tão veloz quanto, e talvez até mais que um foguete” (EVERETT, 1903), “flamas que pareciam sair do topo da nuvem” (ASHMORE, 1950). A variedade de fenômenos óticos associados a nuvens de tempestades e a falta de um vocabulário próprio para a sua descrição tornavam esses relatos altamente subjetivos e a comunidade científica os ignorou até o início desta década (BOECK et al., 1998).

Em 1989, Vaughan e Vonnegut publicaram 15 relatos de eventos luminosos sobre nuvens de tempestades observados por pilotos de aviões durante vôos sobre os Estados Unidos, Europa (da França para a ilha de Sardenha, Itália) e América Central (próximo a San Juan, Porto Rico). No final do artigo foi incluída uma nota publicada pela NASA no “AOPA Newsletter”, solicitando a pilotos que tivessem visto “relâmpagos verticais saídos do topo de nuvens de tempestade estendendo-se para cima em direção ao espaço” que relatassem o ocorrido.

Antes que o ônibus espacial da NASA começasse a voar em 1981, Vaughan e Vonnegut propuseram que ele fosse utilizado como plataforma para observar e fotografar relâmpagos (Figura 1.2). Durante a 4^a e a 6^a missões do ônibus espacial STS-2 foi realizado o Experimento de Investigação Ótica Diurna/Noturna de Relâmpagos, “Night-Time/Daytime Optical Survey of Lightning Experiment” (NOSL). Os dados obtidos motivaram a realização de outro experimento chamado Experimento de Relâmpagos em Mesoescala, “Mesoscale Lightning Experiment” (MLE), que usava câmaras de vídeo monocromáticas para gravar do espaço atividades noturnas de relâmpagos na Terra (BOECK et al., 1998).



Figura 1.2 - Vista a bordo da missão STS-55 do ônibus espacial de relâmpagos e luzes de cidades. A imagem foi produzida da cabine da tripulação.

Fonte: NASA/MSFC (1998).

Em 1990, estudando as fitas produzidas durante o MLE juntamente com uma cópia da fita de Franz, Boeck e Vaughan identificaram dois ou três eventos. Eles descobriram que apenas quando as fitas de vídeo eram reproduzidas em baixa velocidade a imagem do sprite podia ser confirmada. Na velocidade normal, devido a pequena duração dos sprites, eles apareciam e desapareciam antes que uma impressão mental sólida pudesse ser formada. No Encontro de Outono da União Americana de Geofísica de 1990, eles apresentaram o primeiro documento em vídeo de sprites gravados do ônibus espacial (BOECK et al., 1998).

Durante o período de outubro de 1989 a novembro de 1991, foram adquiridos 17 exemplos de sprites com o MLE no ônibus espacial. A partir desses exemplos foi possível estabelecer que a seqüência de eventos visíveis que originam um sprite inicia-

se com uma descarga elétrica na nuvem de tempestade. Após um intervalo típico de um quarto de segundo, ou meio segundo, ocorriam aumentos significativos na extensão e intensidade da luminosidade da nuvem, simultaneamente, acompanhados do aparecimento do sprite. Esses 17 sprites catalogados demonstraram que a ocorrência de sprites é um fenômeno global que ocorre sobre o continente e sobre o oceano (Figura 1.3). As fitas gravadas durante o MLE foram as primeiras evidências da ocorrência de sprites na Austrália, África, no sul do Pacífico (BOECK et al., 1998) e na América do Sul.

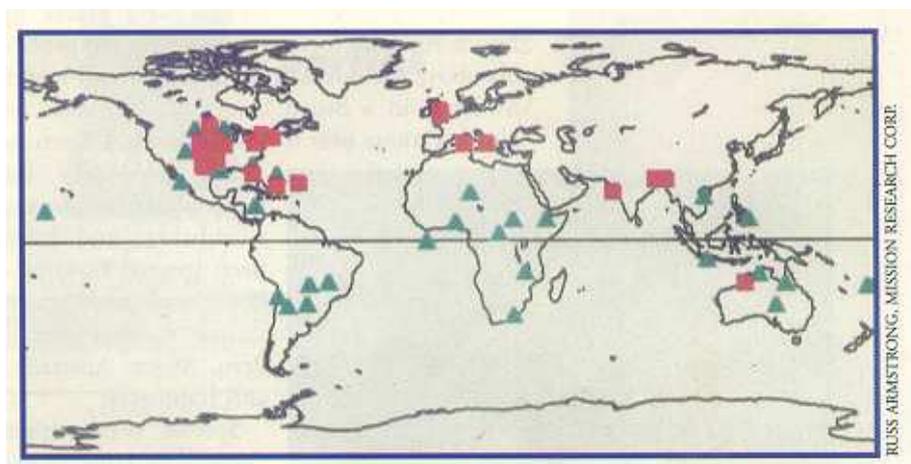


Figura 1.3 - Locais onde foram relatadas observações de fenômenos luminosos acima de tempestades. Quadrados correspondem a observações múltiplas e triângulos a observações isoladas.

Fonte: Lyons (1997).

As imagens de vídeo confirmando a existência dos sprites e demonstrando a sua ocorrência geral e de outros fenômenos luminosos, como os Jatos Azuis (BOECK et al., 1991), os Precursores Azuis (WESCOTT et al., 1996), e os Elves (BOECK et al., 1992), chamaram a atenção de vários pesquisadores. A partir de então foram realizadas diversas campanhas em aviões (SENTMAN; WESCOTT, 1993; SENTMAN et al., 1995a; WESCOTT et al., 1995a), e no solo (LYONS, 1994, 1996; WINCKLER, 1995; WINCKLER et al., 1996; RAIRDEN; MENDE, 1995). Outros tipos de fenômenos,

como pulsos de raios- γ , emissões de raios X e aquecimento da região D ionosférica devido a pulsos eletromagnéticos foram descobertos. Com o aumento da quantidade de dados disponíveis e a sofisticação dos equipamentos de observação, a estrutura fina dos fenômenos começou a ser desvendada, revelando riqueza na variedade de formas. Teorias e hipóteses começaram então a ser elaboradas no intuito de explicar esses fenômenos.

A descoberta desses fenômenos proveu novas evidências do acoplamento entre a Troposfera e a ionosfera, proposto na teoria do Circuito Elétrico Global. Ocorrendo na mesosfera/região D ionosférica, na estratosfera, e tendo como gatilho inicial a atividade elétrica das nuvens de tempestade, localizadas na Troposfera, os Sprites, Elves, Jatos e outros fenômenos óticos que ainda venham a ser descobertos estendem a fronteira do conhecimento existente sobre as interações dos sistemas de tempestade, que antes se acreditava estarem restritas ao solo e à atmosfera ao seu redor, revelando uma atuação direta na dinâmica da atmosfera como um todo.

1.2 Motivação

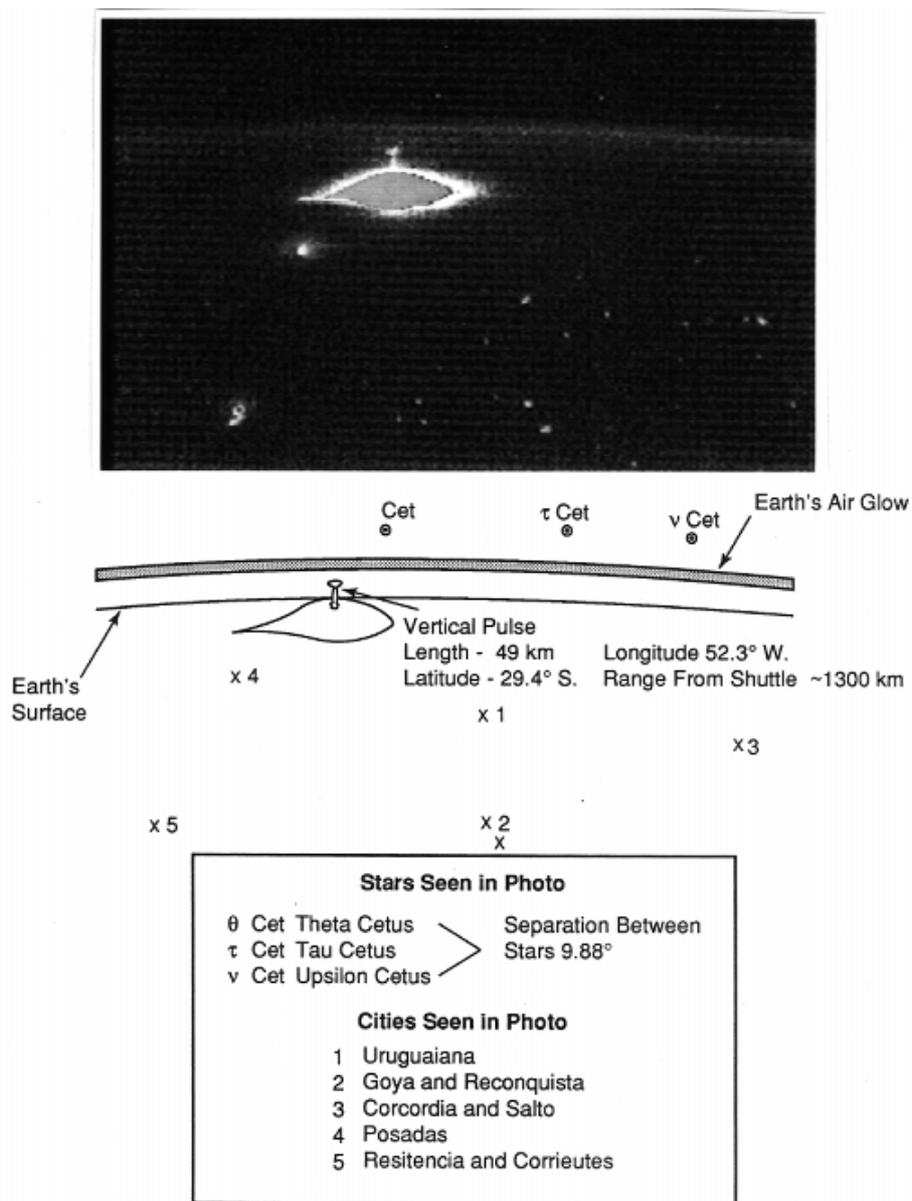
Inicialmente a curiosidade natural do ser humano impulsionou os cientistas em direção a realização de campanhas para estudar essa nova gama de fenômenos atmosféricos. Posteriormente, aliada à curiosidade, estava a preocupação demonstrada pela NASA (National Aeronautic and Space Administration) com os possíveis efeitos desses fenômenos sobre as atividades aeroespaciais realizadas na região de 20 a 100 km, incluindo balões de pesquisa, aviação militar, a próxima geração de transporte civil de alta velocidade e o ônibus espacial (LYONS, 1996). Essa nova geração de transportes de alta velocidade são aeronaves construídas com novos materiais, aptas a voarem sobre células de tempestade (VAUGHAN; VONNEGUT, 1989), reduzindo a duração das viagens aéreas transcontinentais.

Observações feitas de satélite de fenômenos que parecem ser sprites indicam que essas emissões devem ocorrer globalmente, mas as suas reais dimensões e as relações com os sistemas meteorológicos locais ainda são desconhecidas. Em fevereiro e março de 1995, a Universidade do Alasca realizou uma série de observações sobre os Andes e a Bacia Amazônica para investigar a ocorrência de sprites na região equatorial, a maior zona de nuvens de tempestade da Terra . Foram realizados sete vôos sobre uma área que se estendia da Colômbia ao Chile , do Oceano Pacífico à Bolívia e sobre o Brasil ocidental (SENTMAN et al., 1995b). Vinte e cinco grupos de sprites foram notados visualmente durante três dos sete vôos realizados e, posteriormente, foram confirmados numa rápida inspeção visual das fitas de vídeo. Análises preliminares de alguns eventos mostram que os sprites são da mesma cor e forma que os observados sobre os Estados Unidos durante a campanha “Sprites94” (WESCOTT et al., 1995b).

A evidência de que esses fenômenos ocorram em escala mundial e a sua relação com sistemas de tempestade e relâmpagos faz com que o Brasil seja um país potencialmente propício para a sua ocorrência. Com uma taxa estimada de 100 milhões de relâmpagos

por ano (PINTO JR.; PINTO, 1996), o Brasil, em particular a região amazônica, é uma das principais regiões de ocorrência de relâmpagos do mundo.

Em 1991, durante a missão STS-43, órbita 55, do ônibus espacial, observações realizadas pelo MLE registraram a ocorrência de um “pulso vertical” com 49 km de extensão (Figura 1.4) na latitude $29,4^{\circ}$ S e longitude $52,3^{\circ}$ O (BOECK et al., 1995). Essas coordenadas se localizam na região da Serra Gaúcha, no Rio Grande do Sul, região Sul do Brasil. As oito cidades utilizadas como referência na imagem capturada pelo ônibus espacial são facilmente localizáveis no mapa correspondente (Figura 1.5). Várias outras imagens de eventos semelhantes ocorridos sobre a América do Sul foram documentadas durante essa missão.



STS-43 Orbit 55 August 6, 1991 Day 218:01:29:48 GMT

Figura 1.4 - Imagem de um “pulso vertical” com 49 km de extensão sobre a região da Serra Gaúcha no Sul do Brasil (lat. 29,4° S e long. 52,3° O), obtida pela missão STS-43, órbita 55 do ônibus espacial.

Fonte: Boeck et al. (1995).



Figura 1.5 - Mapa mostrando a região correspondente à observada pela missão STS-43, orbita 55, do ônibus espacial. No mapa estão ressaltadas as cidades utilizadas como referência na imagem e a região de ocorrência do sprite (lat. $29,4^{\circ}$ e long. $52,3^{\circ}$ O).

A necessidade de conhecer esses novos fenômenos, seus possíveis efeitos sobre a nova tecnologia aeroespacial, seus possíveis efeitos sobre seres humanos, juntamente com a possibilidade de eles ocorrerem em escala global, motivam a pesquisa de cientistas de várias localidades do globo. A realização de uma campanha bem sucedida no Peru em 1995 (“Peru95 Sprites Campaign”, SENTMAN et al., 1995b) e as imagens de sprites ocorridos sobre a América do Sul, particularmente sobre o território brasileiro, capturadas pelo ônibus espacial, demonstraram a importância de iniciar essa pesquisa no Brasil.

Este trabalho teve como principais objetivos: 1) reunir o conhecimento existente sobre os sprites até o momento, fenômeno de descoberta tão recente; e 2) desenvolver uma metodologia de análise própria para investigar a relação entre sprites e relâmpagos propostas na literatura. Foi analisada a atividade elétrica de relâmpagos dos sete dias com maior ocorrência de sprites dentro do período de 4 a 29 de julho de 1996, no Meio Oeste dos Estados Unidos, registrados durante a Campanha Sprites96.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão sucinta de conceitos importantes para a compreensão dos sprites e outros fenômenos luminosos da atmosfera superior associados a tempestades. Inicia com a subdivisão da atmosfera em camadas de acordo com suas várias propriedades físicas, segue com o Circuito Elétrico Atmosférico Global, onde são discriminados os mecanismos de eletrificação das nuvens de tempestade e os tipos de relâmpagos conhecidos, e termina com as características gerais de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS), tipo de estrutura meteorológica sobre a qual os sprites são mais observados.

O Capítulo 3 apresenta a conceituação dos Fenômenos Luminosos da Atmosfera Superior Associados a Tempestades conhecidos até então: Sprites, Jatos Azuis, Precursores Azuis e Elves. As características físicas dos Sprites, sua região de ocorrência, “anatomia”, relação com relâmpagos positivos e com MCS são apresentadas com maior nível de detalhamento.

O Capítulo 4 apresenta os equipamentos utilizados na obtenção dos dados e a metodologia desenvolvida para análise dos mesmos. Inicia com as características das câmeras que registraram o fenômeno, segue com as características e método de detecção de relâmpagos da Rede Nacional de Detecção de Relâmpagos americana, “National Lightning Detection Network” (NLDN), e termina com a descrição da metodologia.

O Capítulo 5 apresenta os resultados juntamente com a discussão e análise desses resultados. Finalmente o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões deste trabalho e sugestões para a continuidade do estudo desse fenômeno.

CAPÍTULO 2

ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS PERTINENTES A SPRITES

Os fenômenos luminosos associados a nuvens de tempestade ocorrem na estratosfera e na mesosfera, incluindo a região D ionosférica. A classificação da atmosfera utilizada na frase anterior reúne informações de características físicas das suas regiões quanto à temperatura, à densidade eletrônica e, de modo implícito, quanto à sua composição. A atmosfera pode ser dividida em diferentes camadas de acordo com os processos físicos ocorrentes nas várias altitudes, algumas das classificações atmosféricas são apresentadas a seguir.

2.1 Camadas atmosféricas

As classificações mais importantes são quanto à temperatura, quanto aos constituintes atmosféricos e quanto à densidade eletrônica. A Figura 2.1 apresenta um diagrama esquemático da atmosfera terrestre.

Quanto à temperatura, a atmosfera é dividida em 4 camadas: **Troposfera**, **Estratosfera**, **Mesosfera** e **Termosfera**. A **Troposfera** é a região mais próxima da superfície onde a temperatura é função decrescente com a altitude, com um decréscimo médio de $6,5^{\circ}$ C por km. Estende-se até a Tropopausa, região onde a temperatura atinge um mínimo, em média em 12 km, e começa a crescer. A altitude da Tropopausa varia com a latitude, sendo da ordem de 8 km nos pólos e 16 km no equador. Toda a precipitação e a grande maioria das nuvens ocorrem na Troposfera. A região acima da Troposfera onde a temperatura cresce com a altitude é a **Estratosfera**. Esta camada está limitada pela Estratopausa, em torno de 50 km. Na Estratopausa a temperatura atinge um máximo devido à absorção direta da radiação ultravioleta pelo ozônio e vapor d'água. Na camada seguinte, denominada **Mesosfera**, a temperatura volta a decrescer com a altitude até atingir um mínimo absoluto, na Mesopausa, em torno de 85 – 95 km, com

temperaturas da ordem de -100° C. A estratosfera e a mesosfera constituem a média atmosfera. Acima da Mesopausa está a **Termosfera**. Nessa camada o aquecimento pela absorção da radiação solar no ultravioleta por átomos de oxigênio e moléculas de nitrogênio assegura um gradiente de temperatura positivo até um limite assintótico denominado temperatura exosférica, da ordem de 730° a 1230° C, dependendo da atividade solar.

Quanto à composição, a atmosfera divide-se em 2 camadas: **Homosfera** e **Heterosfera**. A **Homosfera** é a região cujos constituintes majoritários N_2 e O_2 formam aproximadamente 80 e 20%, respectivamente, da densidade numérica total, tal que o peso molecular desta mistura varia pouco com a altitude. Essa região se estende até 100 – 110 km, onde é limitada pela turbopausa. Na **Heterosfera** (acima de 100 – 110 km), o peso molecular médio do ar varia com a altitude e os gases separam-se sob o efeito da gravidade, resultando numa composição.

Quanto à densidade eletrônica, a atmosfera divide-se em: **Atmosfera neutra**, **Ionosfera** e **Magnetosfera**. A **Atmosfera neutra**, onde predominam as partículas neutras, estende-se até aproximadamente 60 km de altitude. A **Ionosfera** é a região ionizada da atmosfera onde a densidade de íons e elétrons é suficiente para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas. Situada entre 60 – 1.000 km, é subdividida pelas características físicas em regiões: **D**, **E**, **F**, com densidades eletrônicas crescentes. A região **D** estende-se aproximadamente de 60 a 90 km, a região **E** estende-se de aproximadamente 90 a 150 km e acima dela encontra-se a região **F** com as suas subdivisões. A **Magnetosfera** é a região mais externa da atmosfera, acima da ionosfera, onde o campo magnético controla o movimento das partículas (íons e elétrons). Esta região é subdividida em: **Magnetosfera externa**, onde as linhas de campo magnético são abertas e **Magnetosfera interna**, onde as linhas de campo são fechadas.

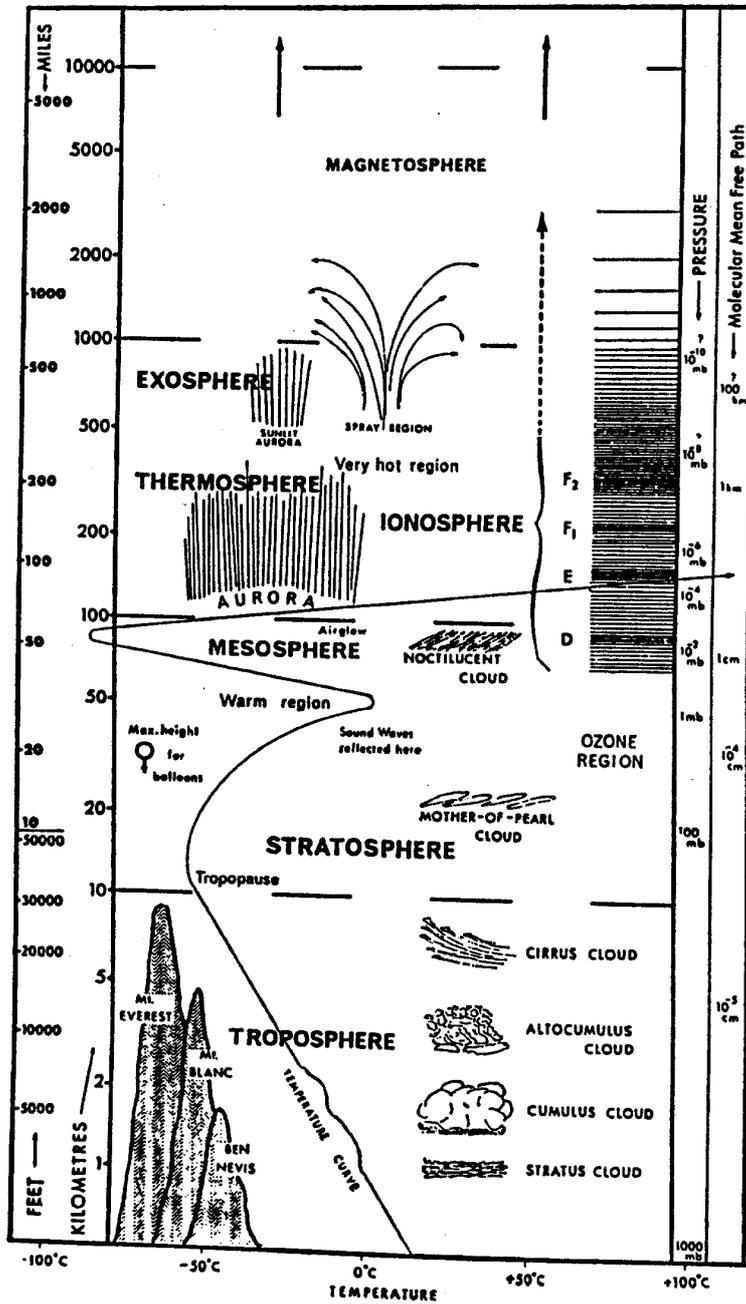


Figura 2.1 - Diagrama esquemático da atmosfera terrestre.

Fonte: Gobbi (1997).

2.2 Circuito elétrico atmosférico global

Os sprites, bem como os outros fenômenos óticos relacionados a tempestades recém descobertos, constituem um elemento importante no balanço elétrico do planeta. A Terra possui um campo elétrico vertical permanente, mensurável no solo e que diminui exponencialmente com a altura. Esse é denominado de campo elétrico de tempo bom quando sua magnitude é de aproximadamente 120 V/m e está orientado em direção ao solo. Quando há presença de nuvens com processos de separação de cargas e perturbações elétricas na atmosfera, o campo é denominado de campo elétrico perturbado. O campo perturbado apresenta-se normalmente invertido em relação ao de tempo bom, entretanto há registros de intensificação do campo elétrico de tempo bom por nuvens de tempestade (SABA, 1997).

A presença de nuvens com processo de separação de cargas altera o campo elétrico atmosférico. Este processo ocorre de modo mais significativo nas nuvens com grande desenvolvimento vertical, chamadas cumulonimbus, ou nuvens de tempestade ilustrada na Figura 2.2. Medidas de campo elétrico dentro das nuvens e nas proximidades indicam que a maioria das nuvens de tempestade possui um campo elétrico do tipo dipolo, com um centro de cargas negativas entre as isoterms de -15°C e 0°C e um centro de cargas positivas situado entre 1 e 1,5 km abaixo do topo. Há ainda um pequeno centro de cargas positivas na base da nuvem, na isoterma de temperatura igual ou superior a 0°C (SABA, 1997). Nos contornos da nuvem, devido a condutividade diferenciada da atmosfera e a presença dos centros de carga no interior da nuvem, pode haver camadas de blindagem formadas por gotículas ou cristais de gelo com cargas de polaridade oposta a dos centros (Figura 2.3).

O mecanismo de eletrificação das nuvens de tempestade ainda não é totalmente conhecido. As teorias mais aceitas baseiam-se na transferência de cargas durante a colisão de partículas em precipitação e dividem-se em dois grupos: o das que

consideram determinante a ação do campo elétrico atmosférico (processo indutivo), e o das que não o consideram determinante (processo não-indutivo).

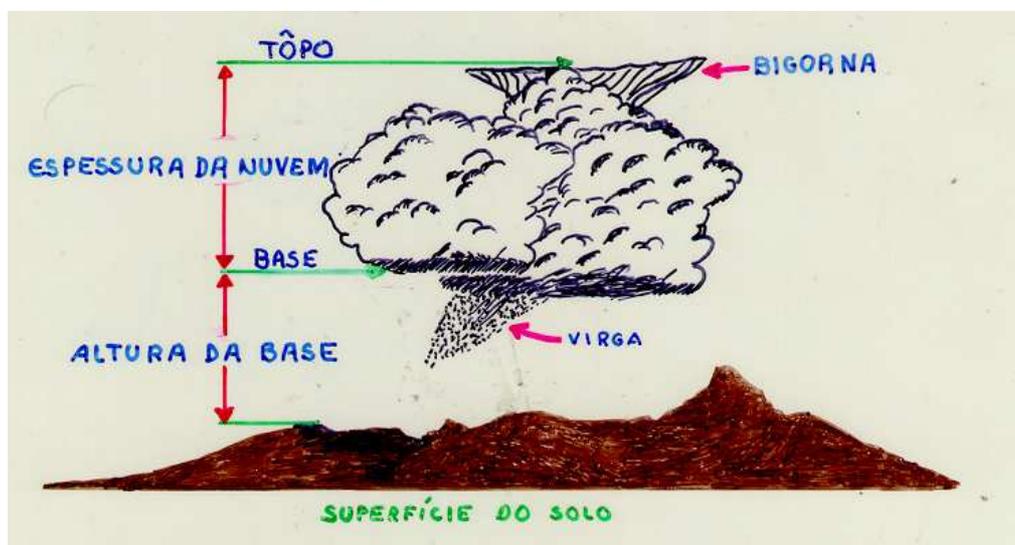


Figura 2.2 - Desenho artístico de uma cumulonimbus.

FONTE: Miranda (1998).

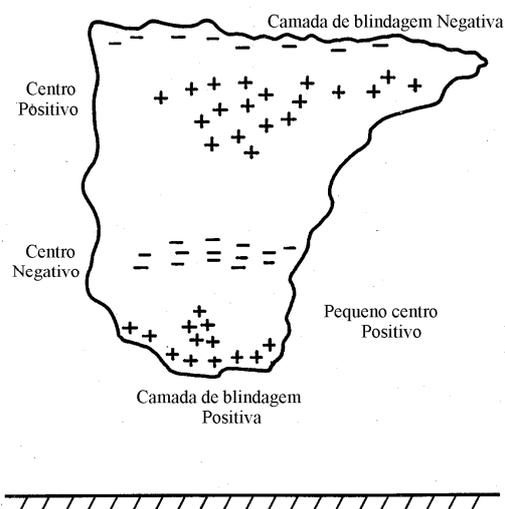


Figura 2.3 - Desenho esquemático ilustrando a distribuição dos centros de carga no interior da nuvem e as camadas de blindagem.

Fonte: Adaptada de Pinto (1996).

No processo indutivo, o campo elétrico descendente da atmosfera polariza eletricamente partículas grandes como gotas de chuva e granizo, ficando a parte inferior dessas positivamente carregada e a parte superior negativamente carregada. Essas partículas, em queda no campo gravitacional, colidem na sua parte inferior com cristais de gelo, partículas menores levadas por correntes de ar ascendentes, que adquirem carga positiva. Os cristais de gelo formam o centro de cargas positivo na parte superior da nuvem e as gotas de chuva e granizo formam o centro negativo na parte inferior. Nesse processo o campo elétrico no interior da nuvem é reforçado (SABA, 1997; FARIA, 1998).

No processo não-indutivo conhecido como termoeletrico, a transferência de cargas está relacionada com a temperatura do local onde ocorre a colisão. Se a colisão entre partículas pesadas (gotas de chuva e granizo) e leves (cristais de gelo) ocorrer em regiões cujas temperaturas estejam acima da chamada temperatura de inversão de cargas, estimada em -15°C , as partículas pesadas ficarão positivamente carregadas e as leves ficarão negativamente carregadas. O valor da temperatura de inversão é compatível com a temperatura do centro de cargas negativas. Caso a temperatura da região seja inferior à temperatura de inversão, as partículas maiores ficarão negativamente carregadas e as menores positivamente carregadas. Nesse modelo os centros de carga da nuvem se distribuem segundo as isotermas. O centro positivo, constituído por cristais de gelo, forma-se na região superior da nuvem, onde a temperatura é inferior à temperatura de inversão. Na região intermediária próxima a isoterma de inversão, localiza-se o centro negativo constituído de granizo e cristais de gelo. Na região inferior da nuvem, onde a temperatura é superior à de inversão, é formado um pequeno centro positivo constituído por granizo (SABA, 1997; FARIA, 1998).

Acredita-se que os sprites estejam relacionados com relâmpagos positivos nuvem-solo. Para cada sprite foi encontrado um relâmpago positivo nuvem-solo a 3ms do evento e dentro de um raio de 50 km (WINCKLER, 1996). Os relâmpagos podem ser classificados em função da polaridade e em função da sua origem ou do ponto onde

terminam. Quanto a polaridade podem ser **positivos**, se iniciarem em cargas positivas, ou **negativos**, se iniciarem em negativas. Quanto a origem podem ser: **nuvem-solo**, se iniciarem na nuvem e se desenvolverem em direção ao solo; **solo-nuvem**, se iniciarem no solo e se desenvolverem em direção a nuvem; **intranuvem**, se ocorrerem no interior da nuvem (tipo mais comum), **nuvem-ar**, ou “horizontais”, se iniciarem na nuvem e terminarem no ar; **entre-nuvens**, de uma nuvem para outra; **nuvem-ionosfera**, ou “verticais”, se iniciarem na nuvem e se desenvolverem em direção a atmosfera superior.

As nuvens eletrificadas associadas a tempestades elétricas constituem um mecanismo de carregamento da atmosfera em relação à Terra. Um total estimado de aproximadamente 2.000 tempestades ocorre a cada instante no globo. Elas mantêm a diferença de potencial existente entre a superfície da Terra e a ionosfera, compensando a corrente vertical de tempo bom e possibilitando a existência do campo elétrico atmosférico. O sistema Terra-ionosfera pode ser considerado um capacitor de esferas condutoras concêntricas, separadas pelo ar, um meio levemente condutor. Esse conjunto de fenômenos elétricos da atmosfera, somados agora de sprites, jatos azuis, elves, precursores azuis e outros, integram o chamado Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG). Este modelo (Figura 2.4), além de considerar tempestades como fontes pontuais de corrente que podem ser distribuídas aleatoriamente em várias regiões ao redor da Terra, inclui também os efeitos da orografia e do acoplamento, ao longo das linhas de campo geomagnético, entre a ionosfera e magnetosfera, na distribuição global do potencial e das correntes elétricas .

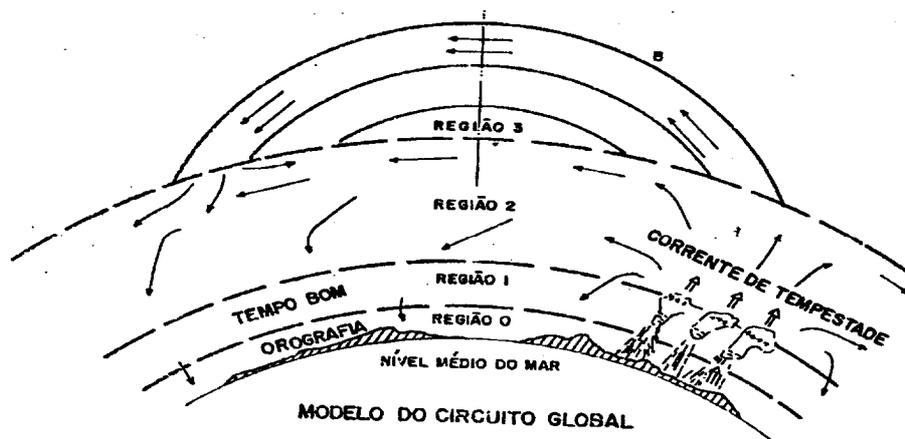


Figura 2.4 - Diagrama esquemático do CEAG.

- Região 0 – região da baixa Troposfera.
- Região 1 – parte superior da Troposfera, abaixo do centro de cargas positivas da tempestade.
- Região 2 – Estratosfera e Mesosfera acima do centro de cargas positivas da tempestade.
- Região 3 – Ionosfera acima da região do dínamo e a Magnetosfera.

Fonte: Pinto (1987).

2.3 Sistemas convectivos de mesoescala

A maioria dos sprites, jatos azuis e os outros fenômenos luminosos foram observados acima de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS, Mesoscale Convective System), mais especificamente sobre Complexos Convectivos de Mesoescala, “Mesoscale Convective Complex” (MCC), um tipo particular de MCS.

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala são sistemas formados por uma ou mais nuvens de tempestade individuais, frequentemente identificados por uma área estratiforme desde a Troposfera média até à região da bigorna de algumas centenas de quilômetros quadrados. Estes sistemas ocorrem predominantemente no período noturno e têm um tempo de vida de 6 a 12 horas, alguns podendo perdurar até 43 horas (CONFORTE, 1997).

Os fenômenos meteorológicos são classificados de acordo com suas características espaciais e temporais em três escalas principais: microescala, mesoescala e macroescala. A mesoescala engloba fenômenos atmosféricos meteorológicos com dimensões horizontais de aproximadamente 2 a 2.000 km e duração de horas a dias. Orlanski (1975) classificou a mesoescala em α , β e γ de acordo com as dimensões horizontais dos sistemas meteorológicos. A mesoescala α se estende de 200 a 2.000 km, a meso β de 20 a 200 km e a meso γ de 2 a 20 km (Ray, 1986). Os fenômenos da meso α têm duração de ordem de dias, os da meso β da ordem de um dia e os da meso γ da ordem de horas. Maddox (1980) definiu a mesoescala α para dimensões da ordem de 250 a 2.500 km com duração maior ou igual a 6 horas, a mesoescala β de 25 a 250 km com duração menor que 6 horas. A microescala engloba os fenômenos com dimensões e duração inferiores aos de mesoescala e a macroescala os de dimensões e duração superiores.

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (MCC, Mesoscale Convective Complex) são um tipo particular de MCS α , que podem ser classificados quanto as suas

características físicas, a organização e ao local de ocorrência, conforme o quadro abaixo (Figura 2.5):

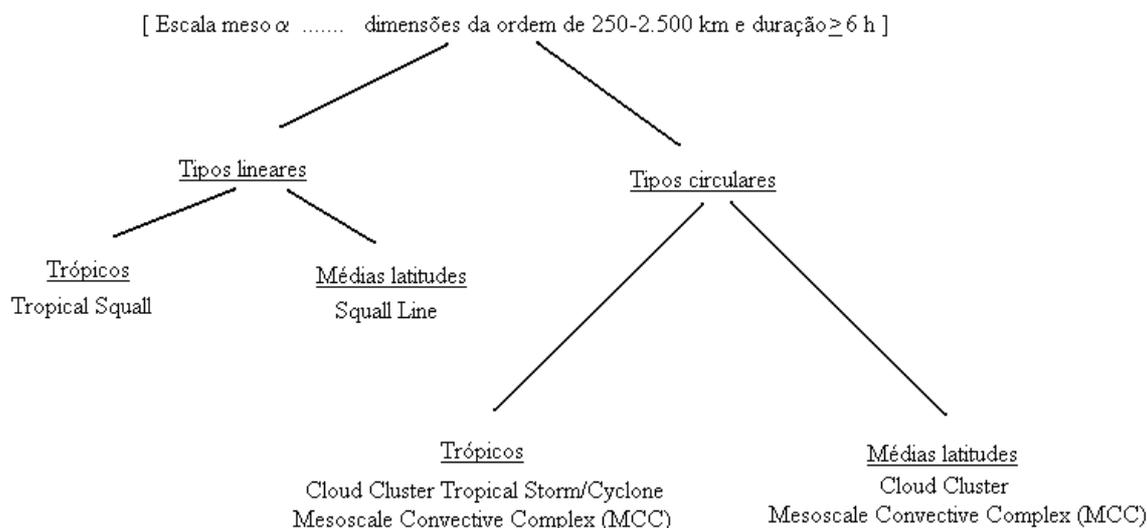


Figura 2.5 - Classificação dos sistemas meteorológicos convectivos de mesoescala α de acordo com suas características físicas, organização e localização.

Fonte: Adaptada de Maddox (1980).

Maddox (1980) definiu os MCC a partir das características físicas observáveis em imagens de satélite no canal infravermelho (IR) realçadas. Esta definição é apresentada na **Tabela 2.1**.

Os critérios de tamanho e duração garantem que apenas sistemas convectivos grandes e persistentes sejam considerados. A exigência de que uma grande porção da cobertura de nuvens do MCC tenha uma temperatura IR de corpo negro $T_{CN} \leq -52^{\circ} \text{C}$ garante que o sistema esteja ativo e que haja precipitação sobre uma área significativa. O critério de forma foi arbitrariamente especificado para evitar que sistemas lineares fossem classificados como MCC (MADDOX, 1980).

Tabela 2.1 - Características físicas de um MCC

Tamanho	<p>A – Cobertura contínua de nuvens com temperatura IR $\leq -32^{\circ}$ C deve ter área ≥ 100.000 km².</p> <p>B – Região de nuvens interiores com temperatura $\leq -52^{\circ}$ C deve ter área ≥ 50.000 km².</p>
Início	Critérios de tamanho A e B são satisfeitos.
Duração	Os critérios A e B devem ser satisfeitos por um período ≥ 6 horas.
Extensão máxima	Cobertura contínua de nuvens com temperatura IR $\leq -32^{\circ}$ C atinge área máxima.
Forma	Excentricidade (eixo menor/eixo maior) $\geq 0,7$ durante a extensão máxima.
Fim	Critérios de tamanho A e B não são mais satisfeitos.

Fonte: Maddox (1980).

A escala de um MCC é grande em comparação a de nuvens de tempestade individuais. Por exemplo, imagens no infravermelho de nuvens de tempestade maduras indicam que a área da região com temperatura $\leq -32^{\circ}$ C é aproximadamente 700 km². Reynolds e Vonder Haar (1979) documentaram 38 nuvens de tempestade multicelulares sobre a região leste de Montana (EUA) e encontraram que a área total média do topo das nuvens estava em torno de 1.400 km². De acordo com a definição da Tabela 2.1, a área

do topo das nuvens de um MCC é 100.000 km² ou maior, portanto o tamanho de um MCC excede o de uma nuvem de tempestade individual em mais de 2 ordens de magnitude (MADDOX, 1980).

Vendavais, chuvas torrenciais, inundações, precipitação de granizo, e tornados em médias latitudes estão geralmente associados a MCC. Estudos climatológicos mostram que esses sistemas são comuns nas Altas Planícies americanas, nas regiões tropicais oceânicas e continentais, especialmente na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e sobre as latitudes médias da América do Sul. Conforte (1997) encontrou, na América do Sul, a maior concentração de MCC (23% do total de 157 ocorrências) durante os anos de 1993 e 1994 sobre a região norte da Argentina e Paraguai, com vários sistemas ocorrendo sobre o Brasil.

CAPÍTULO 3

FENÔMENOS LUMINOSOS ASSOCIADOS A TEMPESTADES

No início desta década, Franz et al. (1990) registrou, com uma câmara de vídeo de alta sensibilidade luminosa, as primeiras imagens de fenômenos luminosos acima de tempestades. Desde então, diversos pesquisadores os têm investigado. Vaughan et al. (1992) e Boeck et al. (1995) relataram observações feitas do ônibus espacial desses fenômenos. Durante o verão americano de 1993-1994, um número significativo de pesquisadores realizou campanhas de observação no solo (LYONS, 1994, 1996; WINCKLER, 1995; WINCKLER et al., 1996; RAIRDEN; MENDE, 1995) e em aviões (SENTMAN, WESCOTT, 1993; SENTMAN et al., 1995a; WESCOTT et al., 1995a), iniciando uma nova etapa na sua investigação.

Como resultado das campanhas iniciais, duas classes de fenômenos foram identificadas: os **Sprites Vermelhos** (*Red Sprites*), ou simplesmente **Sprites** (*Sprites*), e os **Jatos Azuis** (*Blue Jets*), ou **Jatos** (*Jets*). Os Sprites são predominantemente vermelhos e ocorrem na região intermediária entre a mesosfera e a região D da ionosfera, com sua região mais brilhante entre 66 e 74 km de altitude (Sentman et al., 1995a). Os Jatos Azuis são cones colimados de coloração azul, aparentemente, expelidos do topo da nuvem em direção à ionosfera que atingem uma altura média de 40 km (WESCOTT et al., 1996).

Com o crescente interesse da comunidade científica pelo assunto, o número de campanhas experimentais que vem sendo realizadas todos os anos aumentou significativamente. Atualmente elas estão sendo realizadas em diversos países. Novas classes desses fenômenos têm sido identificadas: os **Precursores Azuis** (*Blue Starters*), ou **Precursores** (WESCOTT et al., 1996) e os **E.L.V.E.S.** (*Emissions Of Light And Very Low Frequency Perturbations From Electromagnetic Pulse Sources*) ou simplesmente **Elves** (BOECK et al., 1992). Devido à facilidade de observação dos

sprites nas campanhas realizadas no solo, é sobre este fenômeno que há maior quantidade de informações até o momento. Pouco se conhece a respeito dos jatos e precursores azuis, devido à dificuldade em observá-los (só foram documentados em campanhas realizadas em aviões), e sobre os elves.

3.1 Sprites vermelhos ou Sprites

O nome “sprite” só foi adotado em 1994 após a campanha “Sprites94” (LYONS et al., 1994b) e a divulgação do vídeo “Red Sprites and Blue Jets” (SENTMAN; WESCOTT, 1994). Ele foi escolhido por não estar associado a nenhum conceito físico, evitando a formação de idéias errôneas sobre o fenômeno, como acontecia quando eram usadas expressões como “grandes descargas elétricas para cima” (FRANZ et al., 1990), “descargas elétricas do tipo nuvem-estratosfera” (LYONS, 1994), ou “descargas elétricas do tipo nuvem-ionosfera” (WINCKLER, 1995) .

A palavra “**Sprite**” originalmente significa “**duende**” na língua inglesa. Sua adoção foi inspirada na peça de William Shakespeare intitulada “A Tempestade” (“The Tempest”), fazendo-se uma analogia com natureza efêmera e transiente dessas emissões luminosas associadas a tempestades (LYONS, 1998). Atualmente, o nome Sprite designa uma classe de fenômenos óticos da atmosfera superior associados a nuvens de tempestades, tendo adquirido um significado próprio no meio da comunidade científica que os estuda.

Sprites são fenômenos mesosféricos, estendendo-se a região D da ionosfera. Atingem uma altura máxima média de aproximadamente 88 km (± 5 km). Nos mais brilhantes foi observada uma altura terminal que excedia 95 km, atingindo a região mais baixa da camada E da ionosfera. Podem ocorrer individualmente, mas geralmente ocorrem em grupos de 2 ou mais. Quando agrupados podem estar muito próximos, formando “pacotes”, estruturas da ordem de 40 km de largura, ou distribuídos individualmente no espaço (Figura 3.1). Alguns dos eventos mais brilhantes parecem ser pacotes bem “apertados” de vários sprites individuais (SENTMAN et al., 1995a).



Figura 3.1- Dois eventos de sprites observados em 4 de julho de 1994 durante a campanha “Sprites94”. As imagens da esquerda foram obtidas do avião “Jet Comander”, as centrais e da direita (coloridas) mostram o mesmo evento registrado do avião “Westwind 2”. A primeira linha mostra um grupo de sprites e a paralaxe das estrelas de Ursa Maior relativa a eles. A segunda mostra um pacote de sprites, um dos maiores observados, com tentáculos. A separação entre os aviões era aproximadamente 50 km.
 FONTE: Sentman et al. (1995a).

Às vezes os grupos de sprites parecem “dançar” ao longo do topo da nuvem, como se estivessem se propagando em sincronia com um extenso relâmpago horizontal que se propaga na parte inferior da região da bigorna. Este relâmpago é denominado de relâmpago “aranha” (Figura 3.2). Alguns avançam até uma distância estimada de 200 km em menos de 1 s (Figura 3.3). Outras formações parecem estar “congeladas” (Lyons, 1994). Devido à limitação de 16,7 ms na resolução temporal das câmeras utilizadas até o momento, não foi possível verificar nenhum tipo de propagação vertical dos sprites. A duração dos sprites varia, em geral, de 2 a 16 quadros de filmagem (33 a 267 ms), com uma média de 7 quadros (117 ms). Alguns dos eventos mais longos são na verdade grupos de elementos que se formam e dissipam, possivelmente em resposta a descargas elétricas intra-nuvem de longa duração (Lyons, 1996).



Figura 3.2 - Fotografia de um relâmpago “aranha” estendendo-se por mais de 140 km.
Fonte: National Geographic (1998).

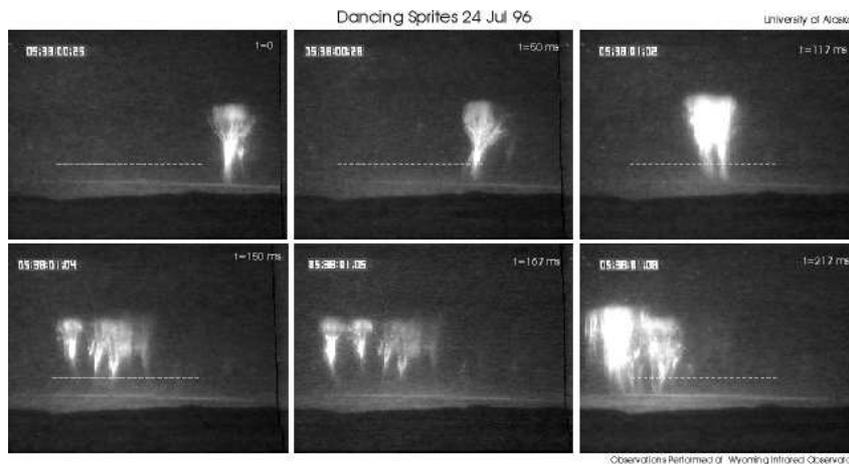


Figura 3.3 - Seqüência de imagens de vídeo cobrindo mais de 200 ms mostrando uma série de sprites sucessivos que parecem “dançar” através do quadro da direita para esquerda. A nuvem de tempestade que produziu os eventos estava abaixo do horizonte. A linha pontilhada foi adicionada eletronicamente. A altitude estimada para os tops destes eventos está entre 85-90 km.
Fonte: <http://sprites.gi.alaska.edu/html/sprites.html>, 28/05/98 (1998).

Como resultado da Campanha “Sprites94”, em que foram obtidas as primeiras imagens coloridas dos sprites, Sentman et al. (1995) puderam construir uma anatomia preliminar do fenômeno (Figura 3.4) baseados na análise de 29 sprites (individuais e agrupados). O número estimado de sprites registrados nessa campanha foi de 500.

A coloração do sprites é predominantemente vermelha, sua região mais brilhante, denominada “cabeça” (“head”), se encontra entre 66 e 74 km (± 4 km) de altitude. Acima da cabeça há uma região cujo brilho é menos intenso, que apresenta uma estrutura de finas estrias, denominada “cabeleira” (“hair”). A cabeleira se estende até 88 ± 5 km e está separada da cabeça por uma banda escura denominada “linha calva” (“hair line”). Nos eventos mais brilhantes foi observada uma banda escura, denominada “colar” (“collar”), logo abaixo da cabeça. Abaixo do colar estendem-se estruturas filamentosas que se assemelham a tentáculos, ou gavinhas, lembrando as medusas do mar. A cor dos “tentáculos” (“tendrils”) é vermelha logo abaixo do colar passando gradualmente para o azul conforme se estende para baixo. A triangulação estabeleceu uma altura mínima para os tentáculos de 40 km. Abaixo dessa altitude, o espalhamento Rayleigh e o alto nível de luminosidade das descargas dentro da nuvem impediram a identificação de detalhes estruturais necessários à triangulação.

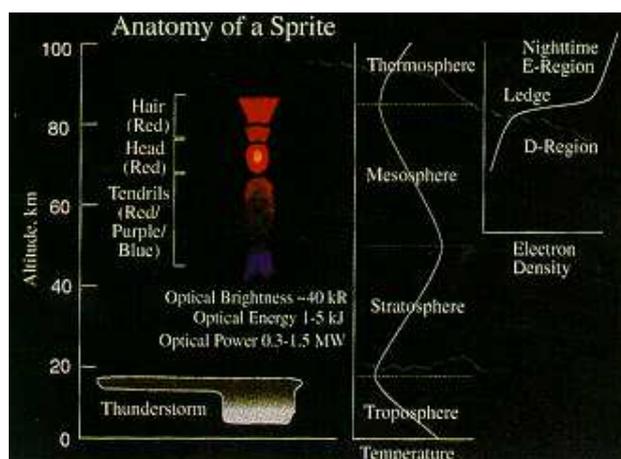


Figura 3.4 - Anatomia de um sprite individual e a relação da sua altura com a temperatura atmosférica e o perfil típico da densidade eletrônica noturna.
Fonte: Sentman et al. (1995).

Considera-se que o processo de emissões luminosas na atmosfera, causadas por elétrons energéticos acelerados por campos elétricos de nuvens de tempestade (sprites), seja bastante similar ao processo de geração da aurora. Entretanto, devido ao fato dos sprites ocorrerem em altitude mais baixa que a aurora, onde a frequência de colisão entre as partículas é maior, a ocorrência das emissões de vida longa não é esperada. Os sprites seriam então o resultado das transições rápidas, permitidas nessas altitudes (MENDE et al., 1995). Medidas do espectro de sprites (**Figura 3.5**), realizadas por Mende et al. (1995), utilizando um espectrômetro abrangendo a faixa de 430-850 nm, mostraram que o sprites são compostos por emissões das primeiras bandas positivas do N_2 (N_2 1PG). O sistema N_2 1PG está associado ao bombardeamento eletrônico da atmosfera por elétrons aurorais, sendo o resultado de impacto eletrônico secundário no N_2 atmosférico. Não foram constatadas evidências das bandas Meinel do N_2^+ (MENDE et al., 1995; HAMPTON et al., 1996), que possuem vida curta e são produzidas por elétrons com alta energia, indicando que os elétrons geradores de sprites não possuem energia suficiente para ionizar o nitrogênio (MENDE et al., 1995).

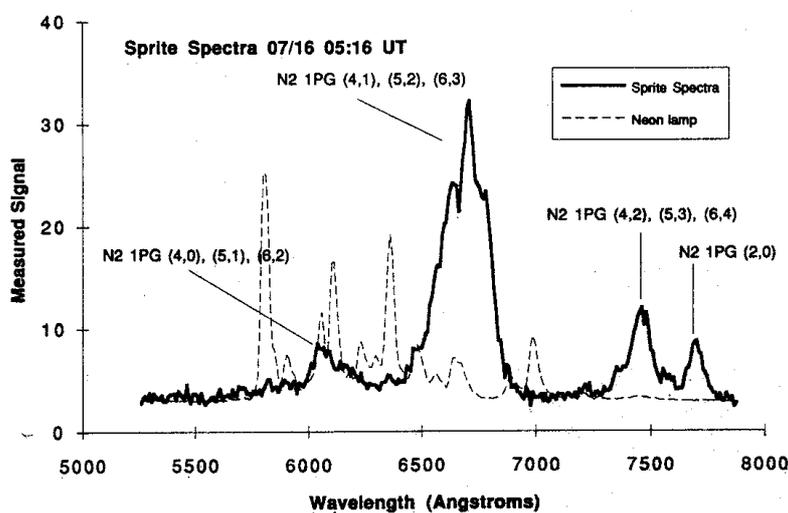


Figura 3.5 - Espectro de um sprite ocorrido às 05:16 UT (16/07/1995). A curva mais grossa representa o espectro do sprite e a mais fina mostra o espectro de uma lâmpada de neon utilizada para calibragem.

Fonte: Mende et al. (1995).

O brilho aparente dos sprites pode ser estimado tendo o brilho dos corpos celestes presentes nos quadros das filmagens como referência. Com as características espectrais e a magnitude de Júpiter e de sete estrelas de referência, e considerando a resposta espectral da câmera por eles utilizada, Sentman e Wescott (1993) estimaram a intensidade ótica média dos sprites em 10-50 kR, comparável a uma aurora de brilho moderado. O evento mais brilhante tinha uma intensidade máxima de 600 kR.

Devido ao baixo nível de intensidade luminosa e a curta duração do fenômeno, o olho humano, quando totalmente adaptado ao escuro, consegue perceber apenas os sprites mais brilhantes. Nas observações realizadas por Lyons (1996) em 6 de agosto de 1994, ele notou que o olho humano tinha percebido 37,5% deles como sendo verde, 25% como laranja, e apenas 37,5% como vermelho ou rosa salmão. Segundo ele, isso se deve a uma baixa resposta do olho às cores quando há baixo nível de luminosidade, sendo esta provavelmente a razão para a variedade das cores dos sprites nos relatos históricos existentes.

Os sprites ocorrem em associação a tempestades com alta atividade elétrica, cujos topos das nuvens geralmente atingem a Tropopausa. Essas tempestades podem ser sistemas tropicais, massas de ar isoladas, frentes frias, Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS), sendo observados mais comumente sobre Complexos Convectivos de Mesoescala (MCC), um tipo particular de MCS. Lyons (1994), com base em observações de grandes MCS, realizadas no sítio de Yucca Ridge, no planalto central americano, sugere que os sprites tendem a ocorrer durante o período de alta atividade elétrica no MCS como um todo, acima das extensas regiões estratiformes chamadas bigornas (“anvils”). Estas regiões são caracterizadas por ocorrência de relâmpagos positivos. Lyons (1994) também sugere que deve haver algum tipo de preparação da atmosfera superior para a ocorrência dos sprites, uma vez que eles só se tornam evidentes após várias horas de atividade elétrica.

Em observações posteriores, Lyons (1996) notou que os sprites tendem a se concentrar em uma região relativamente pequena da tempestade e as denominou células geradoras de sprites. No sistema por ele estudado, essas células estavam restritas a uma área de 2000 a 5000 km². Mais de 50% dos sprites então observados ocorreram com uma separação azimutal de 5° em relação a seus antecessores. Ele sugeriu que apenas uma porção relativamente pequena da extensa região estratiforme gera condições que propiciam a ocorrência de sprites.

O tamanho do sistema de tempestade e a sua atividade elétrica (ocorrência de relâmpagos) têm sido utilizados como critérios de seleção do sistema a ser monitorado durante a busca de documentação desses fenômenos. Durante as campanhas realizadas no Colorado em 1994 e 1995, Lyons (1996) “previa” a ocorrência de sprites acima de MCS cujo eco do radar ou imagem de satélite tivesse uma área contígua maior ou igual a 20.000 – 25.000 km² e a incidência de relâmpagos positivos fosse 5% ou mais do total. Essas “previsões” eram realizadas poucas horas antes de iniciar as medições utilizando informações meteorológicas disponíveis e dados da NLDN obtidos em tempo real. Em 1994, sprites foram observados sobre 27 dos 31 MCS que satisfaziam esses critérios. A probabilidade de acerto estimada para previsões de 1994 foi de 0,89 e o índice crítico de sucesso foi de 0,82. Resultados preliminares de 1995 e 1996 mostraram que durante as 25 noites para as quais foi prevista a observação de sprites a partir do sítio de observação, um ou mais foram registrados em cada noite.

Sprites e elves parecem estar univocamente relacionados a relâmpagos positivos nuvem-solo. Estes relâmpagos costumam apresentar corrente maior que a média da população de relâmpagos positivos nuvem-solo, embora nem todos os positivos nuvem-solo com corrente alta dêem origem a sprites. Lyons (1996) observou que durante o período de máxima ocorrência de sprites (0100 – 0300 LT), durante as medidas realizadas no Colorado, no dia 6 de agosto de 1994, 22% do relâmpagos positivos nuvem-solo detectados produziram sprites. O pico da corrente dos relâmpagos geradores de sprites apresentou um crescimento com o tempo, atingindo um máximo de 196 kA no final do

evento (Figura 3.6). Este comportamento não foi verificado nos relâmpagos que não produziram sprites.

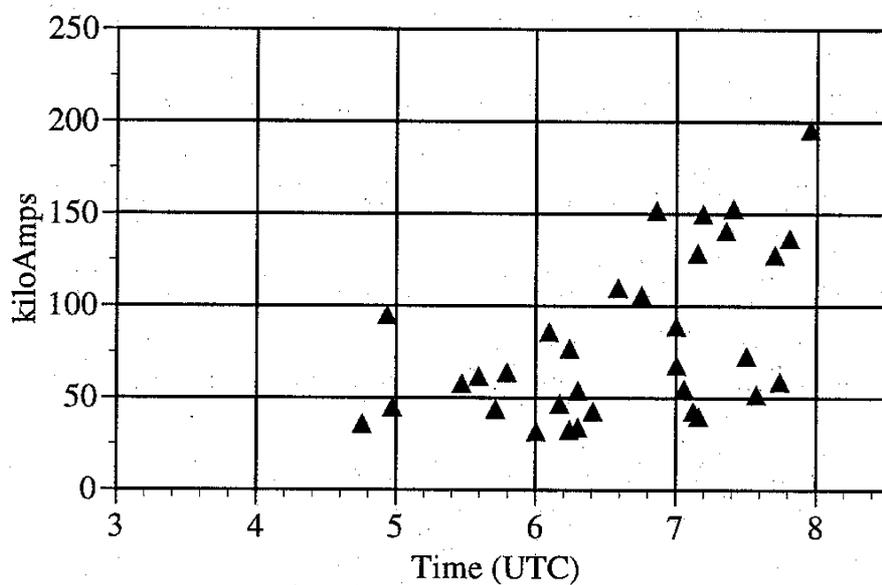


Figura 3.6 - Pico de corrente dos relâmpagos positivos nuvem-solo associados com sprites em função do tempo, durante uma tempestade no Colorado no dia 6 de agosto de 1994.

Fonte: Lyons (1996).

3.2 Jatos azuis ou jatos

Jatos azuis são feixes colimados de luz azul que saem do topo de nuvens de tempestade e se propagam para cima. Os feixes colimados são cones cujo ângulo médio é de $14,7^\circ \pm 7,5^\circ$, o máximo é de $31,5^\circ$, e o mínimo é de $6,5^\circ$ (valores medidos até o momento). Todos os jatos observados eram quasi-verticais e nenhum estava alinhado com o campo magnético (Figura 3.7 e Figura 3.8). Foram documentados pela primeira vez, através de vídeo, durante a Campanha “Sprites94” (WESCOTT et al., 1995a).

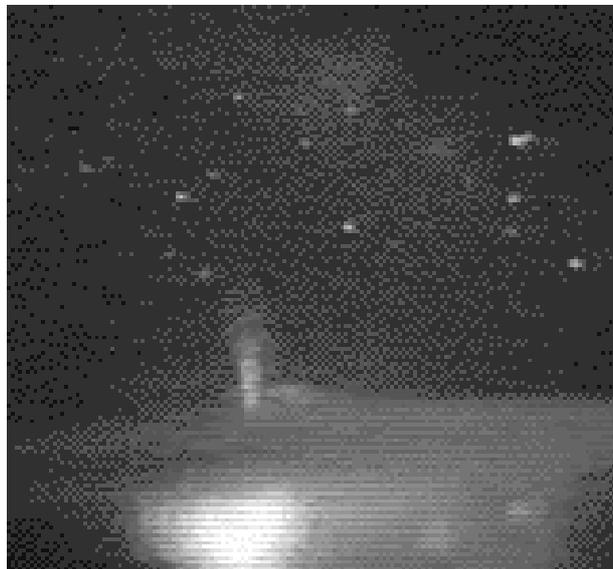


Figura 3.7 - Imagem em preto e branco de um Jato Azul.

Fonte: Sentman, (1998).

Os jatos atingem uma altitude terminal da ordem de 40 km. As extremidades frontais dos jatos perdem brilho e contraste em relação ao fundo da imagem conforme eles se propagam a altitudes superiores a 30km. Uma triangulação razoável pode ser feita até a faixa de altitude de 30-40 km, além disso o processo de digitalização das imagens utilizado na análise dos dados produz perda de informação. Quando observados em tempo real utilizando-se as fitas de vídeo originais, pôde-se observar em alguns uma

“onda de choque hemisférica” que continuava com a velocidade original até aproximadamente 50 km (WESCOTT et al., 1995a).



Figura 3.8 - A única fotografia conhecida de um jato azul, ocorrido sobre uma tempestade na Austrália.

Fonte: Lyons (1997).

Na maioria dos casos, a luminosidade do jato azul parece decair em toda extensão do cone simultaneamente em aproximadamente 200 ms após o seu início. Esta é a duração aproximada de um jato. Sua velocidade vertical média é de 98 ± 14 km/s, sendo a mínima de 78,9 km/s e a máxima de 114,4 km/s. Com esta velocidade, a onda de choque sônica produzida durante a sua propagação teria o número de Mach igual a 300 e produziria luminosidade na região onde passasse. A dificuldade está em explicar a colimação do feixe e a longa duração do fenômeno pois as moléculas assim excitadas não poderiam continuar a emitir durante 200 ms (WESCOTT et al., 1995a).

Até o momento ainda não foram realizadas medidas do espectro dos jatos azuis. Entretanto, Wescott et al. (1995a), analisando o nível de intensidade dos três sinais (vermelho, verde e azul) da câmera colorida obtiveram o resultado preliminar da taxa de azul em relação ao verde de 5:1, sem componente vermelha detectável. Como a taxa de mistura das moléculas da atmosfera na região de ocorrência dos jatos é semelhante a da região próxima ao solo, possuindo um valor de aproximadamente 77% N₂ e 11% de O₂, eles sugeriram que os jatos azuis provavelmente viriam dessas moléculas e seus íons (WESCOTT et al., 1995a).

3.3 Precursores azuis ou precursores

Os precursores azuis foram inicialmente interpretados como relâmpagos para cima. Foram documentados durante a campanha “Sprites94”, e assim denominados por Wescott et al. (1996). São visualmente semelhantes aos jatos azuis e provavelmente estão relacionados as suas fases iniciais, mas se distinguem destes por terem altitude terminal muito menor. Com a base no topo da nuvem em $(17,7 \pm 0,9 \text{ km})$ se estendem no máximo até 25,5 km e em média até $20,8 \pm 1,8 \text{ km}$. Sua ocorrência foi observada em 2 regiões de precipitação de granizo (“células”) distintas, uma com granizos de 7,0 cm de diâmetro e a outra com os diâmetros variando entre 5,0 e 2,3 cm.

Não parece haver nenhuma relação clara entre os precursores e relâmpagos intra-nuvem, pois sua ocorrência foi observada durante intervalos calmos. Tão pouco foi observada coincidência de precursores com relâmpagos nuvem-solo positivos ou negativos. Entretanto os precursores ocorrem na mesma área geral que os nuvem-solo negativos e uma relação estatística significativa com a distribuição cumulativa destes com respeito a sua ocorrência foi observada. Para relâmpagos dentro de um raio de 50 km e num intervalo de $\pm 5 \text{ s}$ em relação a 18 precursores (Figura 3.9), nos três segundos que antecediam o evento a taxa de relâmpagos era aproximadamente constante de 0,50/s. No instante dos eventos houve um decréscimo abrupto no número de relâmpagos para 0,09/s que persistiu por 3 s, seguido por uma retomada da atividade na taxa anterior ao evento (WESCOTT et al., 1996).

A análise de 59 jatos azuis que ocorreram nas mesmas células revelaram um comportamento similar, porém com alguma diferença. Para os jatos azuis, a distribuição cumulativa dos relâmpagos mostra um aumento da sua taxa de ocorrência pouco antes do jato, seguida de uma lacuna de aproximadamente 2 s e então a retomada da atividade anterior. Análises cumulativas para relâmpagos nuvem-solo negativos de alta intensidade ($I > 100 \text{ kA}$) e para um grande número de relâmpagos positivos com

respeito aos precursores também foram feitas e nenhum decréscimo na taxa de ocorrência posterior ao evento foi observada (WESCOTT et al., 1996).

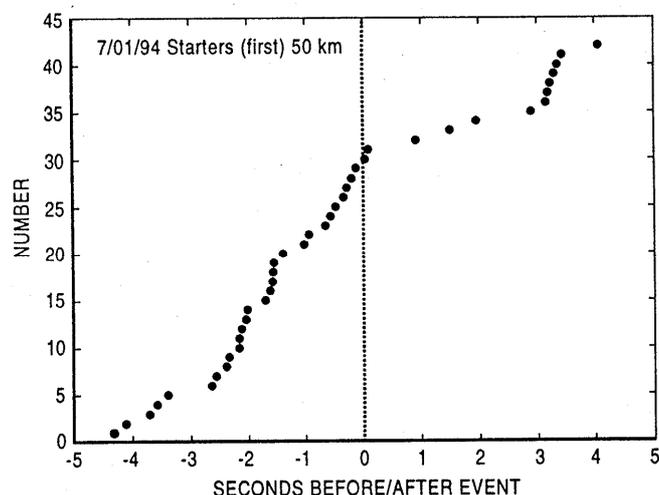


Figura 3.9 - Distribuição cumulativa de relâmpagos negativos nuvem-solo dentro de um raio de 50 km e de um intervalo de ± 5 s em relação a 18 precursores azuis.

Fonte: Wescott et al. (1996).

A associação de granizo com os precursores azuis sugere que eles devem derivar da mesma fonte convectiva isolada de energia. Chagnon (1992) relatou uma associação estreita entre relâmpagos negativos e granizo. Os centros de origem dos relâmpagos associados ao granizo em geral se desenvolveram 9 minutos antes do granizo num local 5 km acima do primeiro granizo. A atividade de relâmpagos tendeu a ocorrer na região do centro da tempestade, enquanto que o granizo geralmente se precipita para o “flanco direito ou esquerdo” da tempestade. Provavelmente a forte convecção ascendente associada ao granizo é que produz as descargas nuvem-solo negativas e a carga positiva do topo da tempestade que produz os precursores. Vonnegut e Moore (1958) estudaram uma tempestade elétrica gigante que atingiu uma altitude de 20 km ou mais e inferiram velocidades verticais associadas da ordem de 100 m/s (WESCOTT et al., 1996).

Todos esses fatos sugerem que correntes ascendentes muito fortes estavam presentes nas duas áreas onde os precursores foram observados e que essas fortes correntes devem

ser necessárias para a produção da separação de cargas e da configuração espacial necessária a formação desses eventos. A ocorrência simultânea de grandes pedras de granizos sugere ainda que a polaridade da separação deve ser tal que o centro de cargas positivo se localize abaixo do centro negativo. Grandes pedras de granizo podem não ser uma condição necessária aos precursores azuis, mas tempestades com precipitação de grandes pedras de granizo podem ser as melhores oportunidades para a observação de precursores e jatos azuis (WESCOTT et al., 1996).

3.4 Elves, emissões de luz e perturbações VLF causadas por fontes de pulsos eletromagnéticos

Boeck et al. (1992) identificou o primeiro elve sobre uma tempestade na costa da Guiana Francesa, numa fita de vídeo do ônibus espacial. Apenas em 1995 foram realizadas outras medidas bem sucedidas do fenômeno, que foi assim denominado por Lyons neste mesmo ano (BOECK et al., 1998).

Os elves se apresentam como um aumento de luminosidade na camada de luminescência atmosférica, na altitude da camada D ionosférica (BOECK et al., 1992). São anéis de luminosidade com extensão horizontal da ordem de 100 a 300 km (FUKUNISHI et al., 1996). Expandem-se muito rápido, com uma duração menor que 1ms. Ocorrem logo após o início do relâmpago nuvem-solo precedendo o início dos sprites, podendo ser seguidos ou não de sprites. Ocorrem numa estreita faixa de altitude, de aproximadamente 85 a 95 km (INAN et al., 1997) ou de 75 a 105 km (FUKUNISHI et al., 1996).

Utilizando um fotômetro com 30 μ s de resolução temporal e especialmente desenvolvido para essas observações, Inan et al. (1997) estimaram a velocidade aparente de expansão lateral dos elves observados em aproximadamente $3,1 \pm 0,8$ vezes a velocidade da luz. O valor encontrado concordava bem com estimativas teóricas anteriores (INAN et al., 1996).

Os elves aparentemente ocorrem em resposta a alguns relâmpagos nuvem-solo positivos, especialmente energéticos. A magnitude dos relâmpagos associados a elves, com ou sem sprites, estudados por Fukunishi et al. (1996) era muito maior que a dos relâmpagos associados a sprites sem elves, 148 kA contra 63 kA. Lyons et al. (1996) observou o mesmo comportamento utilizando um conjunto de dados diferente, obtido durante a campanha “Sprites95”.

A alta luminosidade dos eventos observados, da ordem de 1 a 10 MR, sugere que a baixa ionosfera é significativamente aquecida por efeito Joule causado pelos pulsos eletromagnéticos gerados pelos relâmpagos durante esses eventos, como já havia sido previsto por Inan (1990), Inan et al. (1991) e Taranenko et al. (1993). Deste modo os elves devem ter um efeito significativo na baixa ionosfera e na propagação das ondas de rádio (FUKUNISHI et al., 1996). Por ser um fenômeno muito novo, pouco se sabe a seu respeito.

A figura abaixo sintetiza todos os eventos luminosos transientes na Estratosfera e Mesosfera induzidos por relâmpagos conhecidos até o momento.

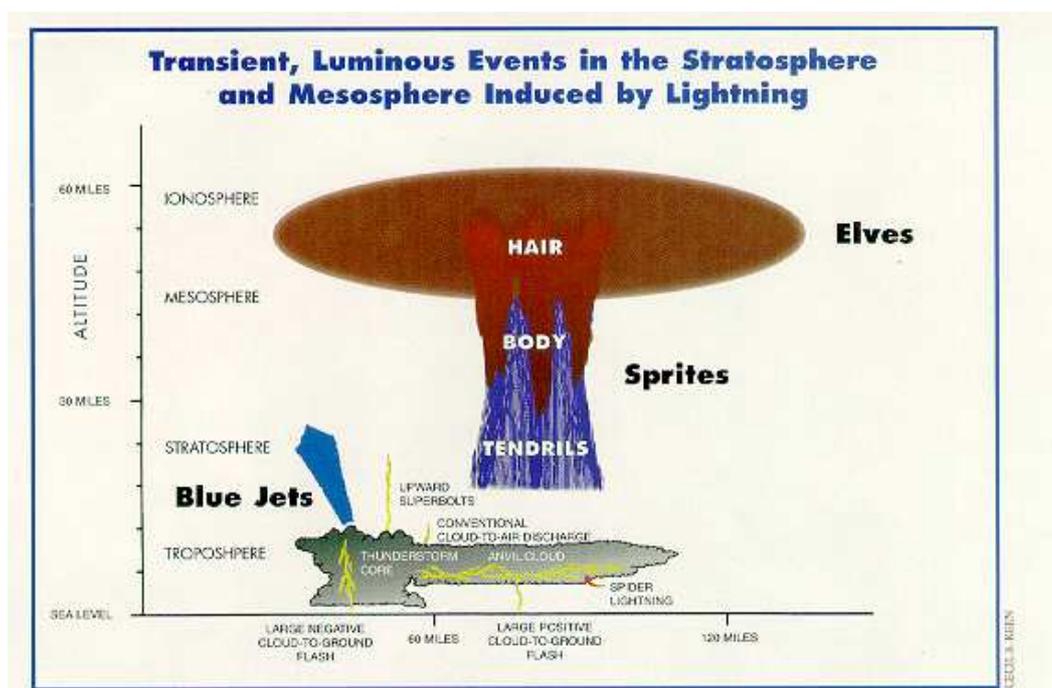


Figura 3.10 - Desenho ilustrando todos os eventos luminosos transientes na Estratosfera e Mesosfera induzidos por relâmpagos conhecidos até o momento.

Fonte: Lyons (1997).

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS, DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para o estudo do comportamento elétrico das tempestades geradoras de sprites, do ponto de vista da ocorrência de relâmpagos, foram utilizados dados de sprites (imagens) coletados durante a campanha Sprites96 realizada nos Estados Unidos por câmeras montadas num sítio de observação localizado em Yucca Ridge, Colorado (USA) e dados de relâmpagos da Rede Nacional de Detecção de Relâmpagos americana.

4.1 Equipamento ótico

Para o registro dos sprites foram utilizados três sistemas de imageamento diferentes: duas câmeras de vídeo intensificadas Isocon inglesas e uma câmera CCD. As três câmeras foram montadas num suporte motorizado, controlado remotamente, que permitia o ajuste do ângulo azimutal e da elevação através de um eixo direcionador. O console operador do sistema produzia uma leitura eletrônica fornecendo o azimute e a elevação do eixo com uma precisão de aproximadamente 1° na elevação e 2° no azimute. Os três instrumentos estavam oticamente alinhados com o eixo direcionador do suporte.

As câmeras Isocon eram utilizadas na obtenção de imagens com boa resolução temporal, 50 imagens/s, e possuíam um intensificador de imagem com 76,2 mm de diâmetro acoplado a um tubo de TV através de fibra ótica. As câmeras possuíam uma sensibilidade luminosa de 10 a 6 lux e estavam equipadas com lentes Nikon 55 mm, f1.4. As imagens coletadas eram gravadas em fitas de vídeo VHS, com uma resolução temporal por imagem de 20 ms (50 quadros/s). Um relógio com uma precisão de 10 ms foi utilizado para imprimir o horário em cada quadro, entretanto, como o relógio era ajustado manualmente, em cada dia a sua acurácia teve valores diferentes. Para a análise

dos dados deste trabalho foi estimada uma acurácia média de 60 ms, adotando-se esse valor para todos os dias analisados.

Uma das câmeras Isocon (câmera 1) possuía um ângulo de abertura (fov, field of view) de aproximadamente 22° , e um filtro de interferência centrado em 665 nm para a investigação das características dos sprites na primeira emissão positiva do N_2 em 665 nm. A outra câmera Isocon (câmera 2) não utilizava filtro, possuía um ângulo de abertura um pouco maior de $\sim 28^\circ$ e era usada para monitorar a ocorrência de sprites sobre as tempestades (Armstrong et al., 1998).

A câmera CCD era utilizada na obtenção de imagens com alta resolução espacial, 1024x1024 pixels. As imagens obtidas eram digitalizadas no formato 16 bit em tempo real e armazenadas no disco rígido de um computador a elas conectado. Como esse processo levava aproximadamente 10 s, um tempo de exposição de 20 s era utilizado para maximizar a probabilidade de captura dos sprites. A CCD estava equipada com lentes primárias 300 mm e f1.4, possuindo um ângulo de abertura de 17° , que permitia a obtenção de imagens com alta definição de eventos até 650 km de distância. Dois filtros, um centrado em 665 nm e o outro em 886 nm foram utilizados para investigar as características “vermelhas” dos sprites nas primeiras emissões positivas do N_2 .

Os dados de sprites foram gentilmente cedidos pelo Dr. Michael J. Taylor da Utah State University.

4.2 Sistema de detecção de relâmpagos

Para a análise do comportamento elétrico dos relâmpagos das tempestades foram utilizados os dados de relâmpagos da Rede Nacional de Detecção de Relâmpagos (NLDN, National Lightning Detection Network) dos Estados Unidos, fornecidos pela Global Atmospherics Inc., empresa que gerencia e que é a proprietária da NLDN. A NLDN é formada por um conjunto de 59 sensores do tipo LPATS-III (Lightning Positioning and Tracking System) e 47 do tipo IMPACT (Improved Accuracy From Combined Technology) formando um total de 106 sensores distribuídos por todo o país (**Figura 4.1**) sincronizados com GPS.



Figura 4.1 - Localização dos sensores da NLDN. Triângulos representam sensores IMPACT e círculos representam LPATS.

Fonte: Cummins et al. (1998).

Os sensores LPATS detectam a componente elétrica da radiação eletromagnética produzida pelas descargas de retorno e as características das descargas medidas por esse tipo de sensor são calculadas utilizando um método denominado método do tempo de chegada (TOA, time-of-arrival). Nesse método, o tempo absoluto de chegada da descarga em cada sensor é medido e a posição e instante de ocorrência da descarga são estimados. Utilizando a diferença entre o instante de ocorrência estimado e o tempo de chegada medido é estabelecido um raio de distância que determina um círculo de

localizações possíveis para a descarga. A localização é determinada por interseções circulares, através de um método que emprega um algoritmo iterativo (GLOBAL ATMOSPHERICS, 1997).

Os sensores do tipo IMPACT detectam separadamente as duas componentes da radiação, elétrica e magnética, e o cálculo das características das descargas envolve uma combinação do método TOA e do método da determinação magnética da direção (MDF, magnetic detection finding) que utiliza a medida da componente magnética da radiação. No método MDF, o ângulo azimutal entre o sensor e a descarga é medido (através da detecção do campo magnético). Os dados obtidos pelos dois métodos são empregados simultaneamente, numa generalização do método de interseções circulares, para obter uma estimativa otimizada da localização da descarga (GLOBAL ATMOSPHERICS, 1997).

Os parâmetros medidos pelos sensores são transmitidos (1) para o Centro de Controle da Rede (CCR) localizado em Tucson, Arizona, via um sistema de satélite (2-3) de duas vias (**Figura 4.2**). No CCR os dados são processados (4) para selecionar apenas as descargas nuvem-solo e fornecer o instante de ocorrência, a localização e o pico de corrente de cada descarga. A informação processada é enviada de volta a rede de comunicação via satélite (5) e é disponibilizada a usuários de dados em tempo real (6), com um atraso de 30 a 40 s que é a duração de todo o processo (CUMMINS et al., 1998).

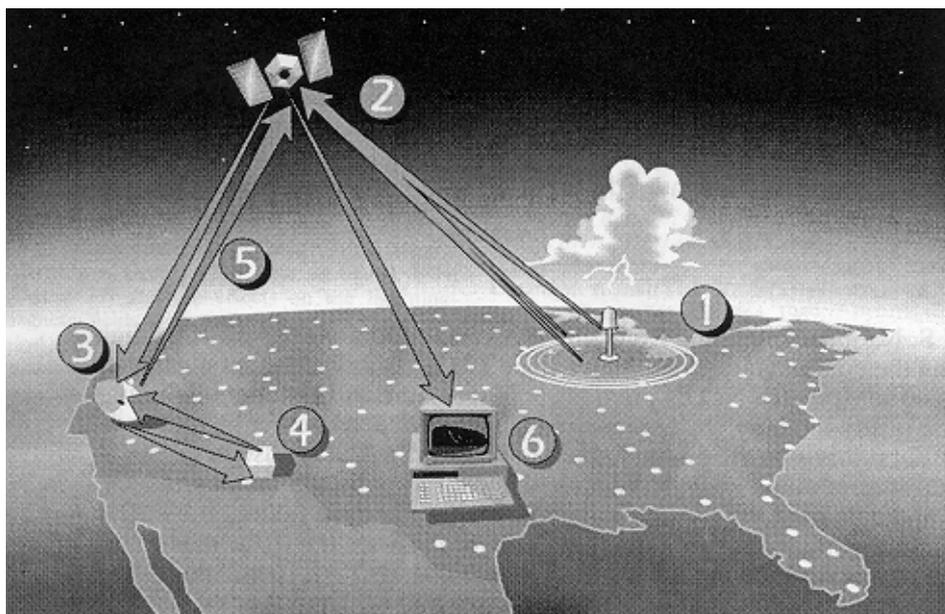


Figura 4.2 - Fluxo de dados na NLDN (maiores detalhes no texto).

FONTE: Cummins et al. (1998).

As descargas de retorno ocorridas num intervalo de 1 s após a primeira, dentro de um raio de 10 km de distância da primeira descarga e de um intervalo de até 500 ms da descarga anterior são agrupadas em relâmpagos até a multiplicidade atingir o valor limite de 15 descargas por relâmpago, qualquer descarga após a décima quinta é considerada como sendo parte de um novo relâmpago. A localização, a corrente de pico e a polaridade fornecidas para o relâmpago são os valores correspondentes para primeira descarga de retorno, embora descargas de diferentes polaridades sejam consideradas num mesmo relâmpago. A acurácia na estimativa do instante de ocorrência da descarga é de 1.0 μ s e na localização das descargas é em média um raio de 500 m. A eficiência de detecção das descargas é estimada em 80 a 90% para as primeiras descargas de retorno com pico de corrente superior a 5 kA (CUMINS et al, 1998).

Os dados de relâmpago foram gentilmente cedidos pela Global Atmospheric Inc. e pelo Dr. Richard E Orville da Universidade A&M do Texas (dia 203/96).

4.3 Metodologia de análise desenvolvida

Sprites associados a tempestades sobre o Meio Oeste dos Estados Unidos foram registrados durante o período de 4 a 29 de julho de 1996 do sítio de observação localizado em Yucca Ridge, Colorado (USA), durante a Campanha Sprites96. O comportamento da atividade elétrica de relâmpagos de tempestades “geradoras” de sprites foi analisado para as sete noites de maior incidência de sprites. Para essa análise foram utilizados os dados da NLDN fornecidos para uma região retangular de 30° a 50° N de latitude e 110° a 85° W de longitude com uma precisão temporal de 0,1 ms.

A observação das fitas gravadas com as câmeras 1 e 2 permitiu a familiarização com a dinâmica de ocorrência dos sprites e as imagens geradas pela câmera CCD foram utilizadas para o conhecimento da estrutura fina dos sprites (**Figura 4.1**). A partir das imagens coletadas pela câmera 1 foram obtidos os instantes de ocorrência dos sprites e os ângulos azimutais entre a câmera e as regiões de ocorrência dos mesmos. Com os azimutes foram identificadas as tempestades “geradoras” dos sprites registrados. Os relâmpagos das tempestades identificadas foram separados em arquivos utilizando programas que selecionavam regiões quadriláteras de latitude e longitude.

Para o processamento dos dados de relâmpagos foram desenvolvidos 15 programas na linguagem de programação “Interactive Data Language” (IDL) que trataram os dados desde sua forma “bruta” até a obtenção dos resultados finais.

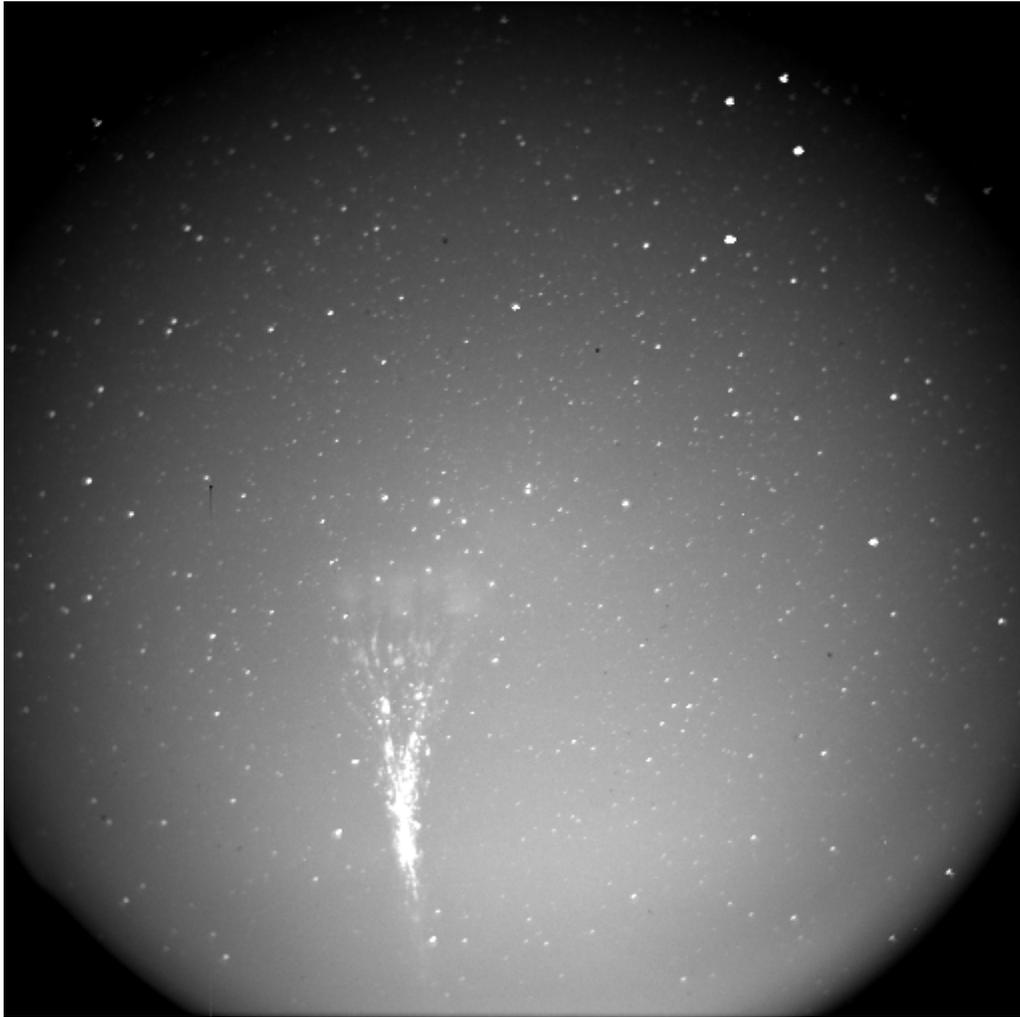


Figura 4.3 - Imagem de sprite ocorrido na noite 206 de 1996 coletada pela câmera CCD.

Os dados em sua forma original, ilustrados na **Tabela 4.1**, forneciam as seguintes informações: Coluna 1 – Data (dia/mês/ano); Coluna 2 – Tempo (h:min:s) em TU; Coluna 3 – Latitude em formato decimal; Coluna 4 – Longitude em formato decimal; Coluna 5 – Sinal de Alcance Normalizado, que multiplicado por um fator de 5,1 fornece o pico da intensidade da corrente em kA; Coluna 6 – Multiplicidade (n° de descargas de retorno de um relâmpago); Coluna 7 – Ângulo da elipse de erro a partir do Norte; Coluna 8 – Tamanho em km do semi-eixo maior da elipse de erro, para uma elipse de 50%; Coluna 9 – Excentricidade da elipse de erro; Coluna 10 – Valor do *Chi Square*.

Tabela 4.1- Dados originais dos relâmpagos coletados pela NLDN, fornecidos pela global atmospheric

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
07/06/96	00:00:06.964	47.025	-98.135	-142.6	1	175	0.3	1.0	1
07/06/96	00:00:07.262	47.211	-98.125	-93.2	2	35	0.8	2.0	1
07/06/96	00:00:07.528	44.015	-100.263	+119.7	1	106	0.4	1.3	1
07/06/96	00:00:07.618	46.816	-98.244	+52.8	1	140	0.6	1.5	1
07/06/96	00:00:08.249	44.012	-100.270	-148.1	5	53	0.3	1.0	1

Apenas as colunas C1 a C6 foram utilizadas neste trabalho. Os arquivos contendo esses dados foram modificados e dispostos num formato mais conveniente para o cálculo dos parâmetros desejados, conforme ilustrado na Tabela 4.2 .

Tabela 4.2 Dados no formato utilizado para a análise

Mês	H	Min	Seg	Lat	Long.	Cor. (kA)	Min. decimal	Seg. decimal	H decimal
7	0	0	6.964	47.025	-98.135	-28.4631	0.0000	0.0017	0.0017
7	0	0	7.262	47.211	-98.125	-18.6028	0.0000	0.0019	0.0019
7	0	0	7.528	44.015	-100.263	23.8922	0.0000	0.0019	0.0019
7	0	0	7.618	46.816	-98.244	10.5389	0.0000	0.0019	0.0019
7	0	0	8.249	44.012	-100.270	-29.5609	0.0000	0.0022	0.0022

Os programas desenvolvidos, além de colocar os dados no formato acima, realizaram os seguintes processamentos:

- 1) Separação dos relâmpagos positivos dos negativos.
- 2) Separação dos relâmpagos das tempestades “geradoras” de sprites utilizando regiões quadriláteras de latitude e longitude. Em alguns casos a geometria da tempestade não permitiu que ela fosse englobada por uma única região quadrilátera. Nesses casos foram separadas diversas regiões quadriláteras para cada tempestade e essas regiões foram posteriormente reunidas. Os relâmpagos positivos e negativos foram processados separadamente.
- 3) Seleção dos relâmpagos dentro do horário escolhido.
- 4) Cálculo os seguintes parâmetros:
 - a) Média da intensidade da corrente em intervalos de 5, 30 e 60 min.
 - b) Número de relâmpagos em intervalos de 5, 30 e 60 min.
 - c) Corrente total em intervalos de 5 min.
 - d) Número de relâmpagos em intervalos de 30 min para faixas da corrente de 25 kA.
 - e) Número de relâmpagos para faixas da corrente de 10 kA.
 - f) Porcentagem de relâmpagos em relação ao número total de relâmpagos (positivos + negativos) para faixas da corrente de 10 kA.

g) Seleção temporal dos relâmpagos associados a sprites (critérios descritos nas páginas a seguir).

h) O mesmo cálculo das letras a, b e e para os relâmpagos associados a sprites.

Todos os cálculos acima descritos foram realizados para relâmpagos positivos e negativos utilizando os programas desenvolvidos para tal. Também foram analisadas:

- a) A correlação entre o número de sprites e número de relâmpagos (positivos e negativos).
- b) A correlação entre o número de sprites e a corrente total de relâmpagos (positivos e negativos).
- c) Número e porcentagem de relâmpagos (positivos e negativos) associados a todos os sprites ocorridos nos sete dias analisados, para faixas da corrente de 10 kA.
- d) Número e porcentagem de todos os relâmpagos (positivos e negativos) associados aos sprites ocorridos nos sete dias analisados, para faixas da corrente de 10 kA.
- e) Número e porcentagem do total de relâmpagos (positivos e negativos) dos sete dias analisados, para faixas da corrente de 10 kA.

Todos os parâmetros calculados foram dispostos em gráficos que foram gerados utilizando programas desenvolvidos na linguagem LabTalk do ORIGIN para essa finalidade.

A média da intensidade de corrente e número de relâmpagos foram calculados para intervalos de 5, 30 e 60 min e representados em gráficos temporais para as 24 h de cada dia utilizando a hora universal (TU). Os intervalos de 30 e 60 min foram a princípio considerados por serem um padrão adotado em estudos de relâmpago e em permitirem análises combinadas de relâmpagos com estruturas meteorológicas.

Intervalos de 5 min foram considerados por 5 min ser aproximadamente o tempo de relaxação da atmosfera em torno de 10 km de altitude após a ocorrência de relâmpagos (SABBA, 1997). Considerando que o centro de cargas positivas das nuvens de tempestade estivesse em torno dessa altitude, procurou-se investigar a existência de algum efeito cumulativo na ocorrência de relâmpagos positivos que influenciasse de alguma forma a ocorrência de sprites.

Comparando as curvas da média de intensidade de corrente e do número de relâmpagos calculados para intervalos de 5, 30 e 60 min, constatou-se que as que utilizavam intervalos de 5 min se mostravam mais significativas do que as outras, sendo estas selecionadas. Foi adotado um método de suavização denominado “Running Average” de três pontos, que é o cálculo da média de cada ponto da curva com o ponto imediatamente anterior e subsequente, para a média da intensidade de corrente.

Observou-se que o período significativo para o estudo relacionado aos sprites deveria compreender a fase inicial da tempestade e a noturna, quando os sprites são observados, sendo então selecionado o período das 0 às 14 h (TU) como o mais significativo para este estudo. Escolhido o melhor intervalo de tempo e o melhor período para a análise das tempestades foram construídos os gráficos de todos os parâmetros calculados.

Após a identificação das tempestades “geradoras” de sprites através da informação azimutal fornecida pelo sistema que gerenciava as câmeras, os instantes de ocorrência dos eventos coletados das fitas gravadas pela câmera 1, juntamente com a informação azimutal combinada com o ângulo de abertura da câmera, foram utilizados para a

determinação dos relâmpagos positivos aos quais os sprites poderiam estar associados empregando os seguintes critérios de seleção:

- 1) Quando havia disponível uma precisão de 60 ms para o instante de ocorrência dos sprites os relâmpagos selecionados deveriam ter ocorrido até 360 ms antes ou 60 ms depois do sprites. O intervalo de 300 ms foi utilizado com máxima distância temporal entre os relâmpagos e os sprites, uma vez que já foram medidos sprites com duração de 283 ms e desvio padrão de 54 ms (LYONS, 1994), e 60 ms é a acurácia do relógio acoplado as câmeras. Caso mais de um relâmpago tivesse ocorrido nesse intervalo eram selecionados os relâmpagos que estivessem dentro ou mais próximos da região englobada pelo ângulo de abertura da câmera centralizado no azimute relativo àquele período de observação (**Figura 4.4**). Caso os relâmpagos tivessem ocorridos muito próximos uns dos outros (menos de 100 km) nenhum relâmpago era desconsiderado. Considera-se que os sprites ocorram dentro de um raio médio de 50 km dos relâmpagos associados, mas já foram observados sprites com um afastamento de até 111 km (LYONS, 1996).
- 2) Quando não havia disponível uma precisão de 60 ms para os sprites os relâmpagos deveriam ter ocorrido dentro do mesmo segundo que os sprites. Caso nenhum relâmpago tivesse ocorrido nesse intervalo eram selecionados os que tivessem ocorrido no segundo anterior até 360 ms antes do valor inteiro do segundo dos sprites (0 ms). Caso mais de um relâmpago tivesse ocorrido o mesmo critério de seleção espacial anteriormente descrito era empregado.

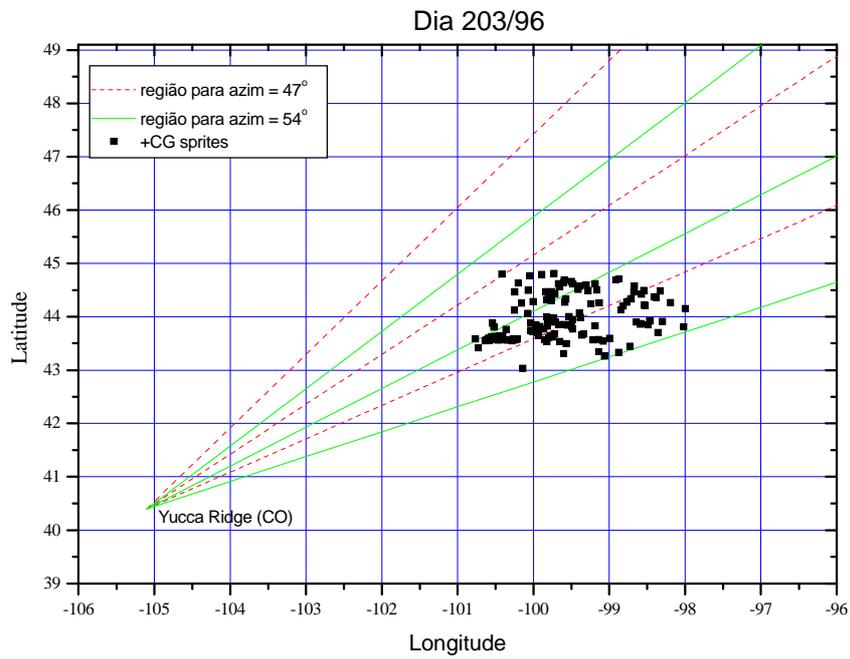


Figura 4.4 - Exemplo de relâmpagos positivos associados a sprites que ocorreram dentro da região englobada pelo ângulo de abertura da câmera centrado no azimute do eixo direcionador. As retas vermelhas e verdes delimitam a região observável para ângulos azimutais (retas centrais) de 47° e 54° respectivamente, dia 203/96.

CAPÍTULO 5

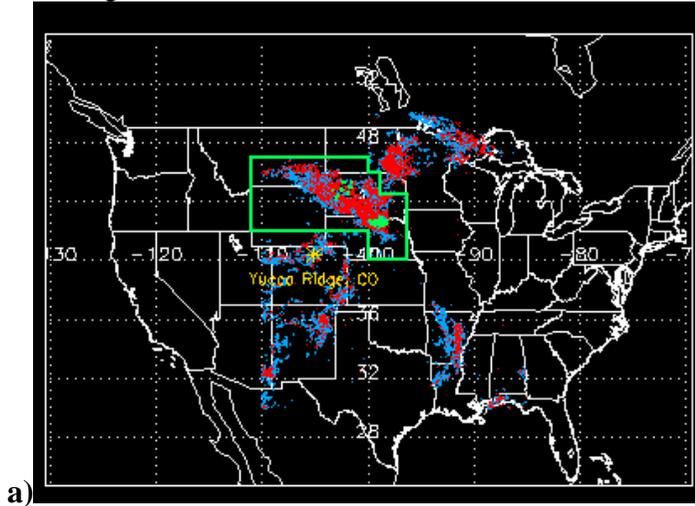
APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O comportamento elétrico, do ponto de vista da ocorrência de relâmpagos, de tempestades “geradoras” de sprites dos dias 6 (188), 7 (189), 11 (193), 19 (201), 21 (203), 22 (204) e 24 (206) de 1996, observadas durante a Campanha Sprites96 do sítio de Yucca Ridge, localizado em $40,4^{\circ}$ N e $105,1^{\circ}$ O, foi analisado utilizando os dados fornecidos pela NLDN em associação com as imagens gravadas do sítio de observação.

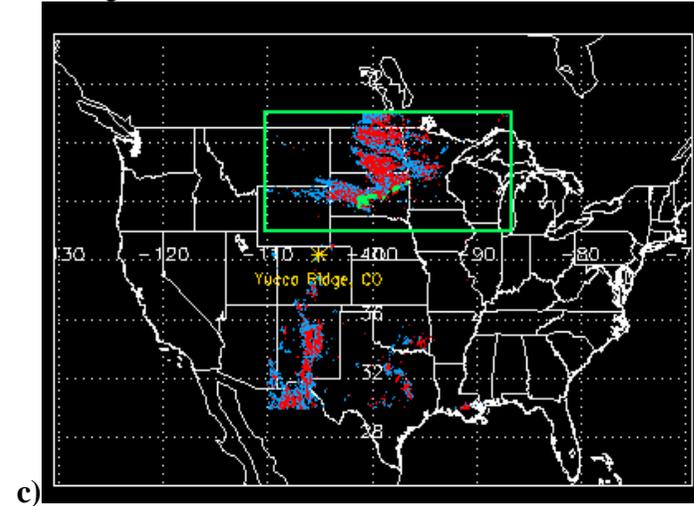
A **Figura 5.1** mostra, para os sete dias estudados, a Localização do Sítio de Observação, dos Relâmpagos Positivos (pontos vermelhos), Negativos (pontos azuis) e dos Relâmpagos Positivos Associados a Sprites (asterísticos verdes) que ocorreram no período de 0 a 14 h (TU) na região retangular de 30° a 50° N de latitude e 110° a 85° W de longitude para a qual os dados foram fornecidos. A figura também mostra a Região Analisada em cada tempestade (delimitada por linhas verdes).

Os dias analisados foram separados em dois grupos, Grupo I e Grupo II, de acordo com a “intensidade da atividade” de sprites, avaliada através dos seguintes critérios: o número total de eventos, o máximo número de sprites ocorridos em intervalos de 5 min e um terceiro critério mais subjetivo, baseado na inspeção visual das fitas gravadas pela câmeras Isocon, relativo ao tamanho dos sprites, ao detalhamento da estrutura fina dos eventos e sua intensidade luminosa. Essa subdivisão é apresentada na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2. A Tabela 5.1 mostra o período de observação de sprites seguido da sua duração, o período de registro de sprites seguido da sua duração e número total de sprites em cada dia . A Tabela 5.2 lista o número máximo de sprites em intervalos de 5 min, o n° médio de sprites no mesmo intervalo e o intervalo de tempo médio entre sprites.

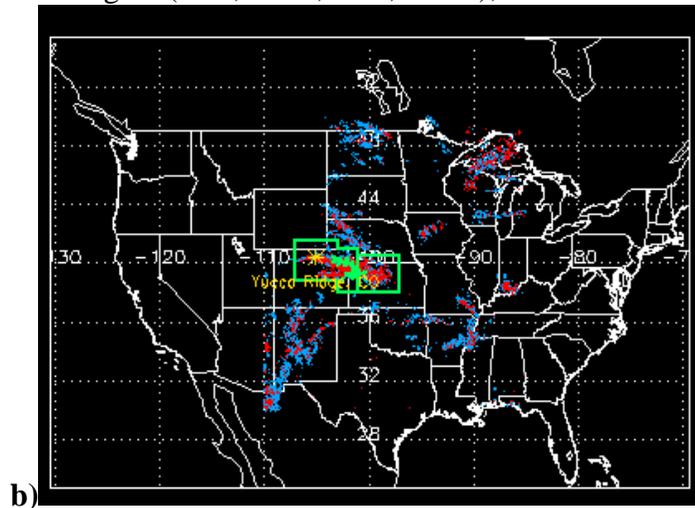
Região (40.0,-96.3 ; 47.0,-111.0), dia 188/96



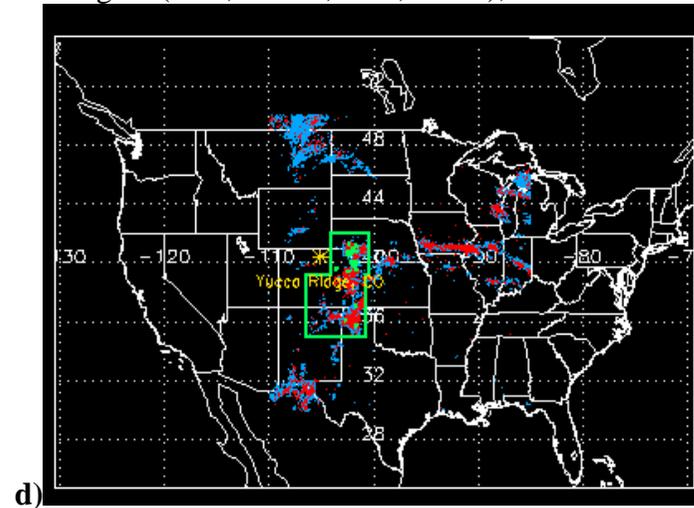
Região (42.0,-86.5 ; 50.0,-110.3), dia 193/96



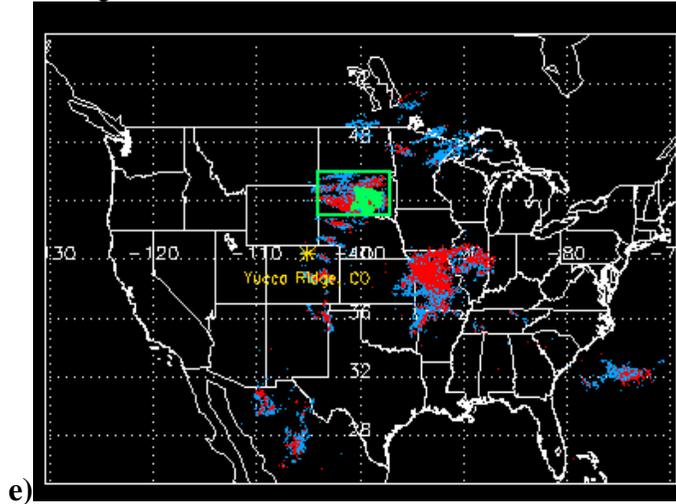
Região (38.0,-97.0 ; 41.0,-107.0), dia 189/96



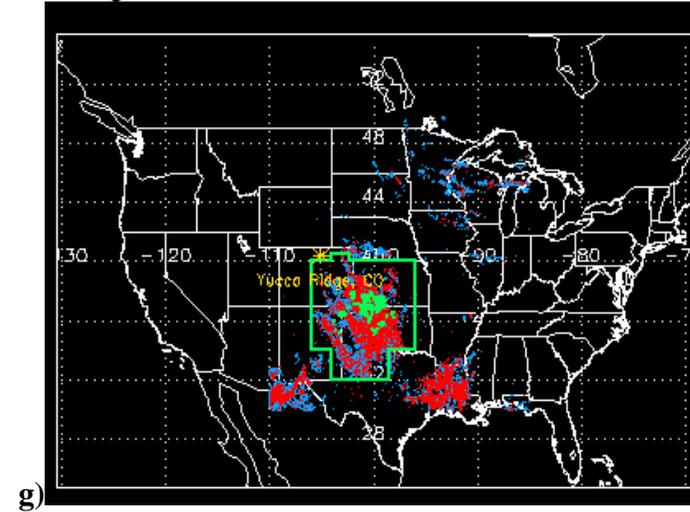
Região (34.9,-100.4 ; 42.0,-106.5), dia 201/96



Região (43.0,-97.0 ; 46.0,-104.0), dia 203/96



Região (32.0,-96.0 ; 40.5,-106.0), dia 206/96



Região (35.0,-90.0 ; 40.0,-105.9), dia 204/96

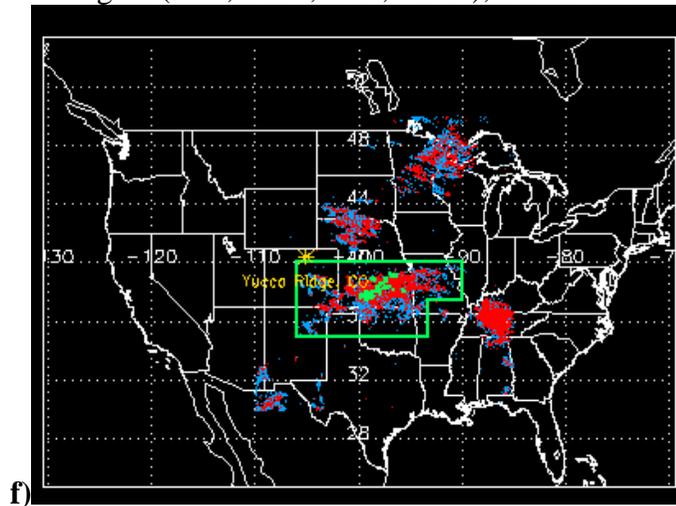


Figura 5.1 - Localização geográfica de Yucca Ridge, Colorado (USA), dos Relâmpagos Positivos (pontos vermelhos), dos Positivos Associados a Sprites (asterísticos verdes) e dos Negativos (pontos azuis), no período de 0 a 14 h (TU) dentro da região de 30° a 50° N, 110° a 85° W, para os dias 188, 189, 193, 201, 203, 204 e 206. A figura também mostra a Região Analisada em cada tempestade (delimitada por linhas verdes).

Tabela 5.1 – Agrupamento de observações de acordo com a intensidade da atividade de sprites

Grupo I					
Dia	Período de observação (TU)	Duração	Período de registro de sprites (TU)	Duração	Nº total de sprites
189	03:49 – 08:35 ?	4 h e 46 min ?	03:57 – 08:35	4 h e 22 min	88
201	03:30 – 08:28	4 h e 58 min	04:12 – 07:17	3 h e 5 min	83
203	03:34 – 10:10	6 h e 44 min	06:40 – 10:07	3 h e 27 min	212
204	03:23 – 08:41	5 h e 4 min	04:22 – 08:29	4 h e 7 min	84
206	03:32 – 08:56	5 h e 24 min	03:36 – 08:56	5 h e 20 min	205
Grupo II					
Dia	Período de observação (TU)	Duração	Período de registro de sprites (TU)	Duração	Nº total de sprites
188	04:54 – 08:20	3 h e 26 min	05:03 – 07:37	2 h e 34 min	36
193	3:55 – 08:50	4 h e 55 min	06:59 – 08:31	1 h e 32 min	38

O Grupo I é formado pelos dias considerados de alta atividade, dias 189, 201, 203, 204 e 206. Nesses dias foi registrada uma grande quantidade de eventos, mais de 80, durante o período de observação da tempestade. O máximo número de sprites ocorridos em intervalos de 5 min, mostrado na Tabela 5.2, variou de 6 a 21 eventos. Os sprites desse grupo eram “grandes”, era possível distinguir sua estrutura fina e possuíam uma “alta” intensidade luminosa (**Figura. 5.2**).

O Grupo II é formado pelos dias 188 e 193, considerados de baixa atividade de sprites. Nesses dias foi registrada uma pequena quantidade de eventos, menos de 40, durante o

período de observação, e o máximo número de sprites variou de 3 a 6. Os sprites desses dias eram “relativamente pequenos”, sua luminosidade era “pouco intensa” e de um modo geral não apresentavam características visuais muito “impressionantes”.

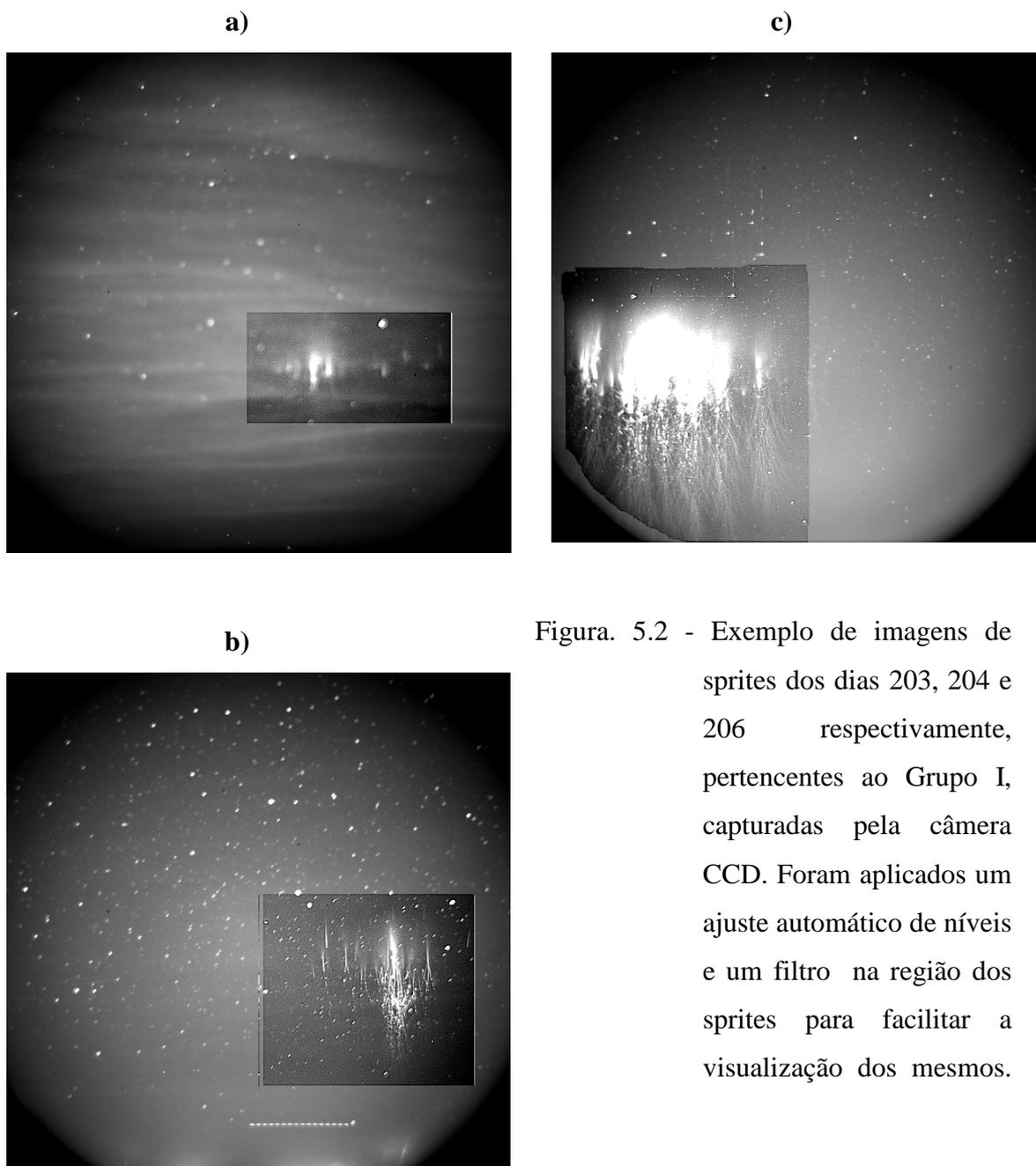


Figura. 5.2 - Exemplo de imagens de sprites dos dias 203, 204 e 206 respectivamente, pertencentes ao Grupo I, capturadas pela câmera CCD. Foram aplicados um ajuste automático de níveis e um filtro na região dos sprites para facilitar a visualização dos mesmos.

Nota-se na Tabela 5.1 que o período de registro dos sprites apresentou uma duração bastante próxima a duração do período de observação. O período de observação foi 4 min a 1 h e 53 min maior que o período de registro de sprites, com exceção dos dias 193 e 203. O fato de sprites começarem a ser registrados logo que iniciava o período de observação e de terem sido registrados até o fim desse período na maioria dos dias indica que os sprites podem ter começado a ocorrer antes do início das observações e se prolongado após as mesmas. O término das observações estava associado a proximidade da luminosidade do amanhecer, uma vez que essa luminosidade ofuscaria os sprites.

No dia 203 a observação começou às 3 h e 34 min, a tempestade começou a produzir relâmpagos às 5 h e os sprites começaram a ser registrados às 6 h e 40 min, sugerindo que nesse dia pode ter sido documentado o início do período de ocorrência de sprites. No dia 203 o início da produção de sprites coincidiu com um crescimento constante do número de relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente, que atingiu seu máximo aproximadamente 1 h depois, conforme pode ser verificado na **Figura 5.3** e e na **Figura 5.12** e, tendo ocorrido o mesmo para a corrente total (**Figura 5.9** e). Aproximadamente 30 min após o máximo número de relâmpagos positivos com alta corrente e o máximo valor da corrente total serem atingidos ocorreu o máximo número de sprites do período de observação desse dia.

Tabela 5.2 - Parâmetros da atividade de sprites

Grupo I			
Dia	Máximo nº de sprites em intervalos de 5 min	Nº médio de sprites em intervalos de 5 min	Intervalo de tempo médio entre sprites
189	8	2,2	3,0 min
201	21	3,6	2,4 min
203	15	5,7	0,6 min
204	6	2,1	2,4 min
206	10	3,5	1,2 min
Grupo II			
Dia	Máximo nº de sprites em intervalos de 5 min	Nº médio de sprites em intervalos de 5 min	Intervalo de tempo médio entre sprites
188	3	1,6	4,2 min
193	6	2,2	2,4 min

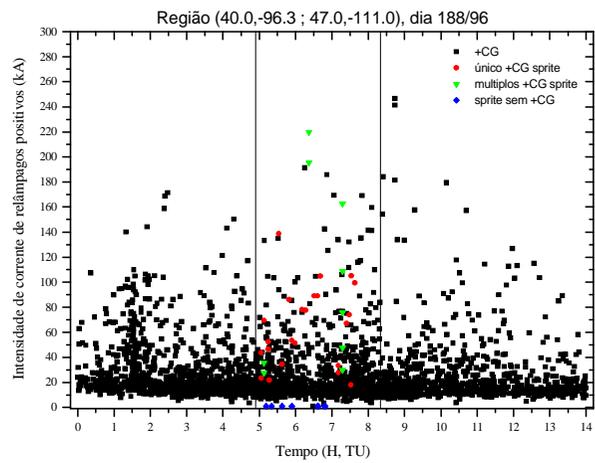
Na Tabela 5.2 são mostrados o máximo número de sprites ocorridos em intervalos de 5 min, o número médio de sprites nesses intervalos e o intervalo de tempo médio entre sprites para os grupos I e II. O o máximo número de sprites ocorridos em intervalos de 5 min é maior no Grupo I. Há uma tendência de o número médio de sprites nesses intervalos, ou seja a frequência de ocorrência dos sprites, ser maior no Grupo I. O intervalo de tempo médio entre sprites não parece apresentar nenhuma tendência de ser menor ou maior em algum dos grupos, entretanto, nos dias 203 e 206, quando foram registrados 212 e 205 sprites (Tabela 5.1) respectivamente, o intervalo de tempo médio entre os sprites foi de 0,6 e 1,2 min.

5.1 Relâmpagos positivos

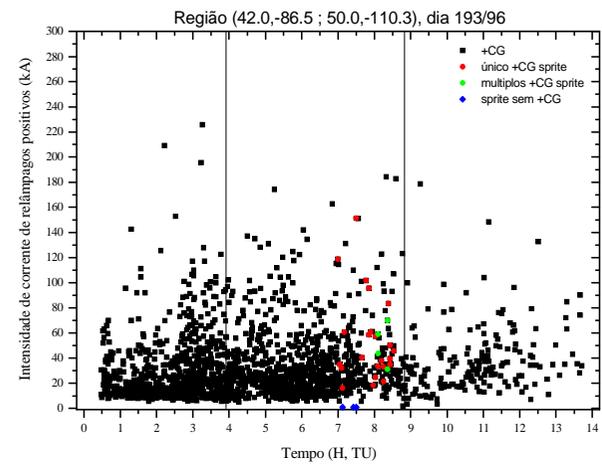
Na **Figura. 5.3** estão representadas os Picos das Intensidade de Corrente Estimadas (tratados a partir daqui como Intensidade de Correntes ou simplesmente Correntes), de Relâmpagos Positivos em função do Tempo para todos os dias analisados. Os relâmpagos positivos associados a sprites que não foram acompanhados por outros relâmpagos positivos no intervalo de tempo definido nos critérios apresentados no Capítulo 4, Seção 4.3 (Metodologia), foram representados por círculos vermelhos e denominados relâmpagos únicos, significando que eram os únicos associados aos respectivos sprites. Os triângulos verdes representam relâmpagos positivos associados a sprites que foram acompanhados por outro, ou outros relâmpagos positivos no intervalo de tempo mencionado, significando que não foi possível isolar um único relâmpago associado ao sprite. Os losangos azuis representam sprites que não tiveram nenhum relâmpago positivo associado no intervalo de tempo mencionado.

A **Figura. 5.3** mostra que foi possível isolar um único relâmpago positivo associado ao sprite para a maioria dos eventos, apenas para um pequeno número de eventos não foi possível isolar um único relâmpago. Entretanto, para um número significativo de sprites não foram identificados relâmpagos positivos a eles associados.

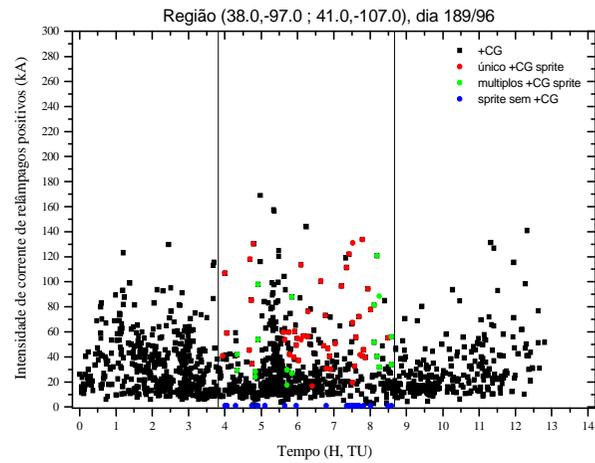
As correntes dos relâmpagos associados a sprites se distribuíram por toda a escala, demonstrando que ocorreram sprites associados a relâmpagos que apresentavam desde valores de corrente muito baixos (abaixo de 20 kA) até bem elevados (acima de 150 kA). Comparando a **Figura. 5.3** com a **Figura 5.15** é possível perceber que além de haver uma maior quantidade de relâmpagos positivos associados a sprites que negativos, a correntes dos relâmpagos positivos associados a sprites era maior que a dos relâmpagos negativos.



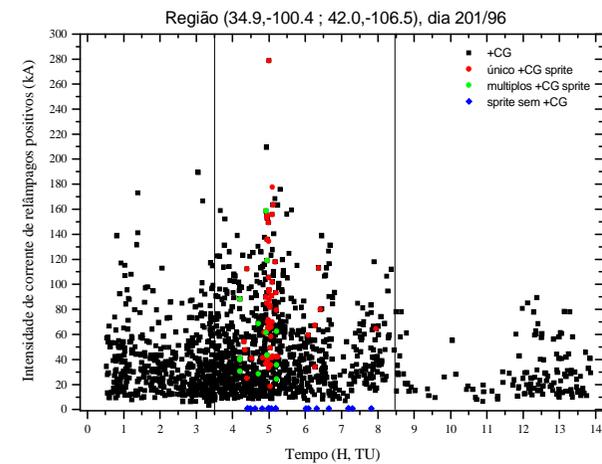
a)



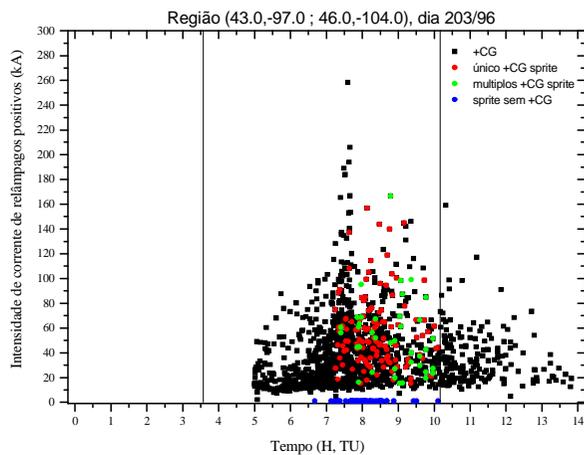
c)



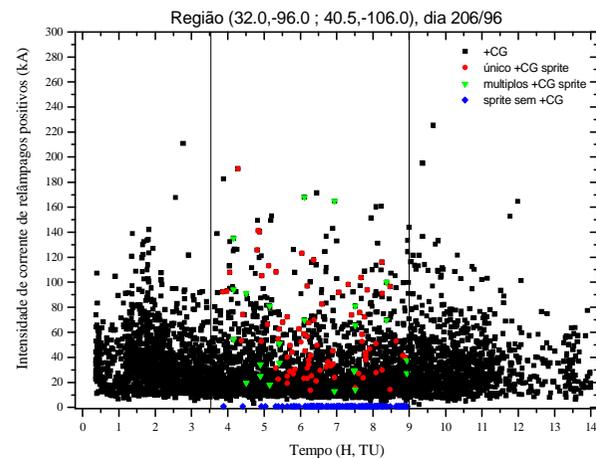
b)



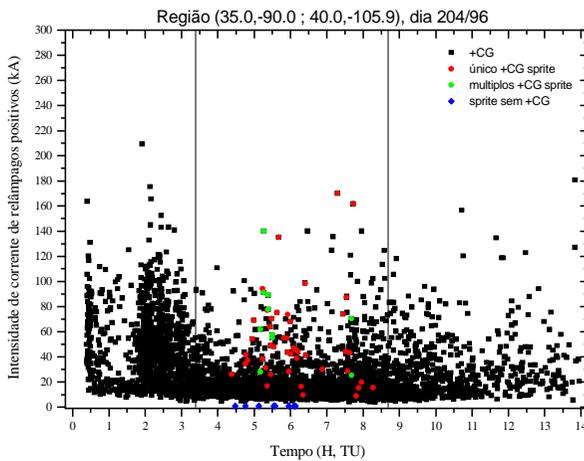
d)



e)



g)



f)

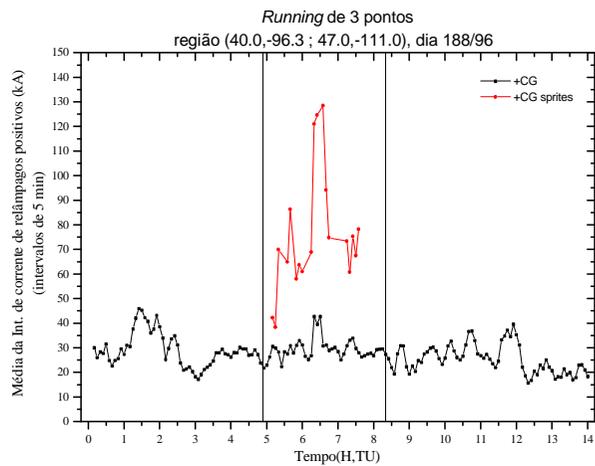
Figura. 5.3 - Intensidade de corrente dos relâmpagos positivos em função do tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. Os quadrados pretos são relâmpagos não associados a sprites, os círculos vermelhos são relâmpagos únicos associados a sprites, os triângulos verdes são múltiplos relâmpagos associados a sprites e losangos azuis são sprites para os quais não foi encontrado nenhum relâmpago associado.

A Figura 5.4, apresenta as Médias, suavizadas, da Corrente dos Relâmpagos positivos calculadas em intervalos de 5 min em função do Tempo, para os dias analisados. As curvas pretas representam as médias das correntes de todos os relâmpagos positivos ocorridos nas tempestades, e as vermelhas mostram a média da corrente dos relâmpagos associados a sprites.

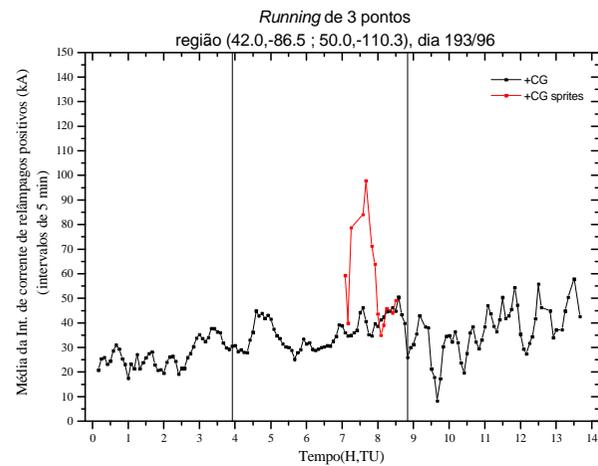
De um modo geral a média da corrente de todos os relâmpagos positivos (curva preta), mesmo tendo apresentado diversas oscilações, se manteve em valores mais elevados durante o período de registro de sprites do que em outros períodos da tempestade. Não foi observada uma diminuição bem caracterizada da média da intensidade de corrente dos relâmpagos positivos durante o período de registro de sprites, conforme relatado por Nelson (1997) num estudo realizado para o dia 206.

Durante a maior parte do período de registro de sprites, a média da corrente dos relâmpagos positivos associados a sprites apresentou valores maiores que a média da corrente de todos os relâmpagos positivos da tempestade, sugerindo que a corrente dos relâmpagos associados a sprites é alta. Entretanto, nos dias 193, 201, 203 e 204, mostrados nas figuras c, d, e e f respectivamente, em alguns momentos, a média da corrente dos relâmpagos positivos associados a sprites atingiu valores menores que a média da corrente dos relâmpagos positivos de toda a tempestade. Numa análise conjunta da **Figura. 5.3** com a Figura 5.4 percebeu-se a existência de um número significativo de relâmpagos positivos de baixa corrente associados a sprites que influenciaram a média da corrente desses relâmpagos.

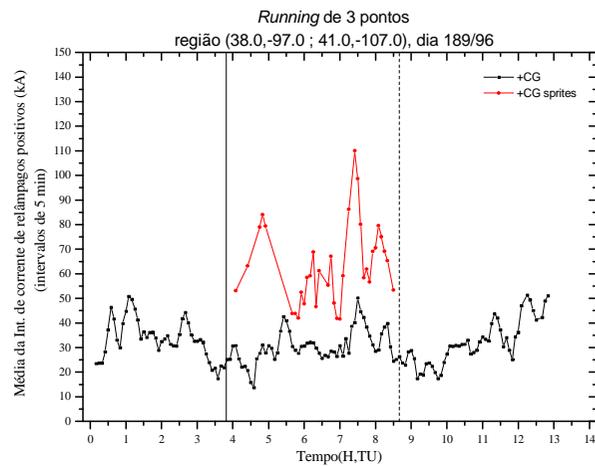
Para avaliar a distribuição das correntes dos relâmpagos positivos associados a sprites foram construídos diagramas do número e da porcentagem de relâmpagos positivos associados a todos os sprites dos sete dias estudados em função da corrente, mostrados na **Figura. 5.5** a e na **Figura. 5.6** a. Essas distribuições foram comparadas às do número e da porcentagem de relâmpagos positivos de toda a tempestade em função da corrente, mostrados na **Figura. 5.5** e na **Figura. 5.6** respectivamente.



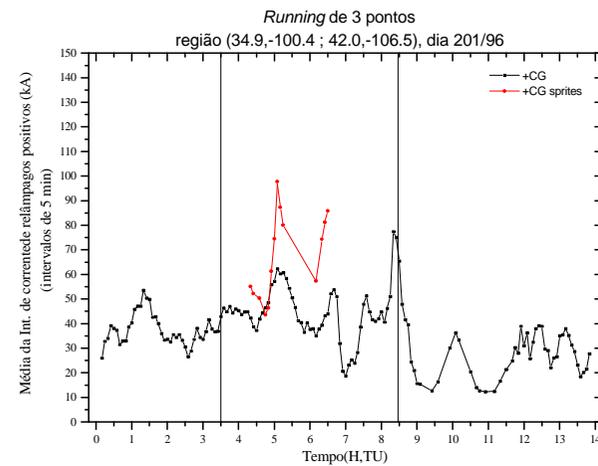
a)



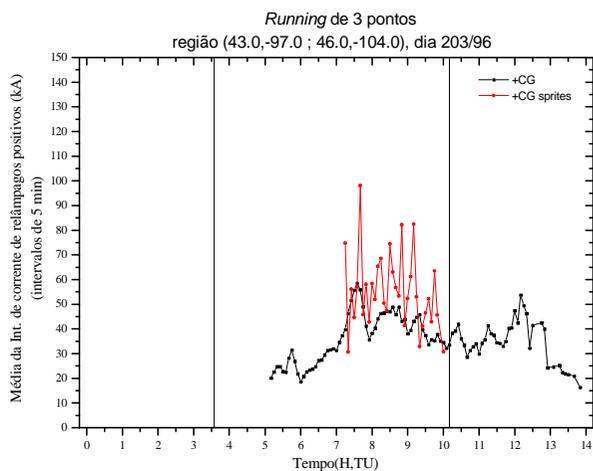
c)



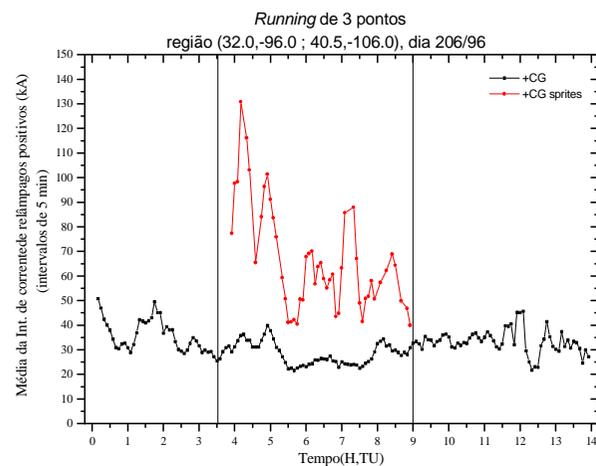
b)



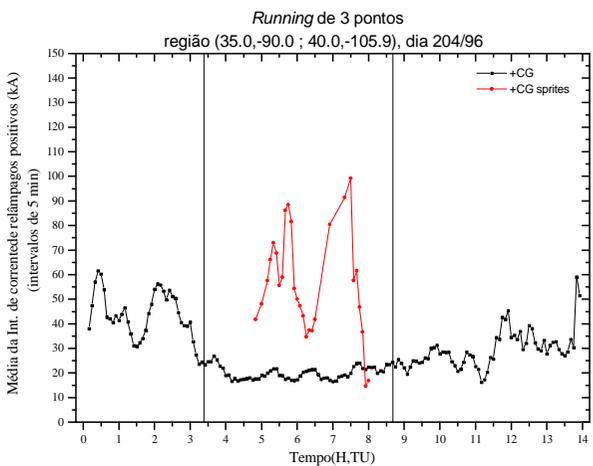
d)



e)

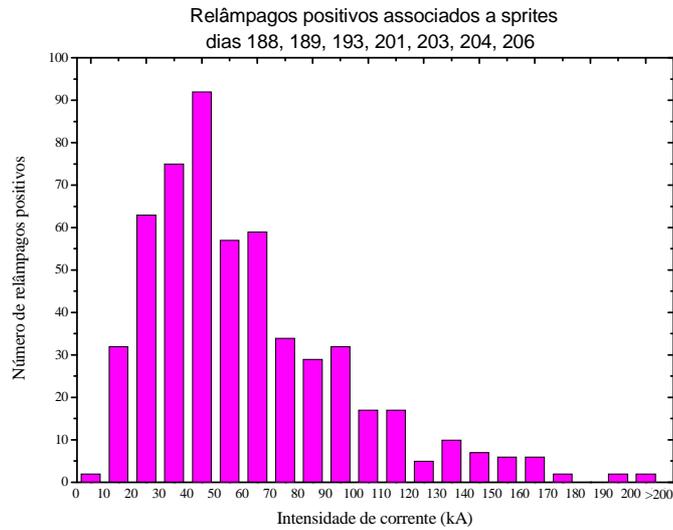


g)

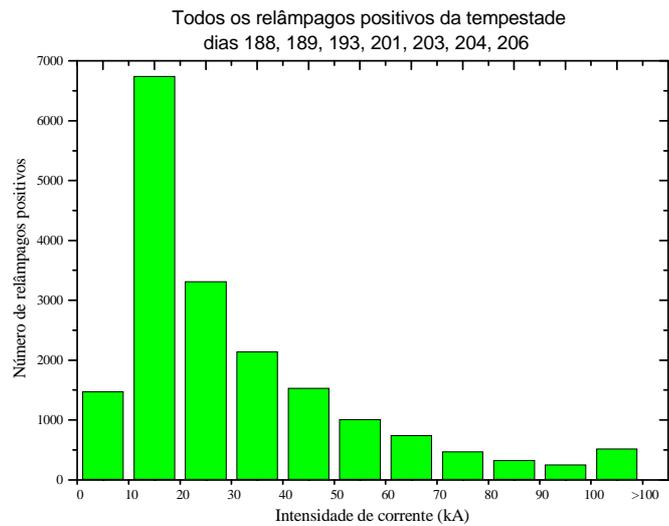


f)

Figura 5.4 - Médias suavizadas da Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Positivos (intervalos de 5 min) em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são as médias de todos os relâmpagos positivos, as vermelhas são as médias da intensidade de corrente dos relâmpagos associados a sprites, as retas pretas delimitam o período de observação.

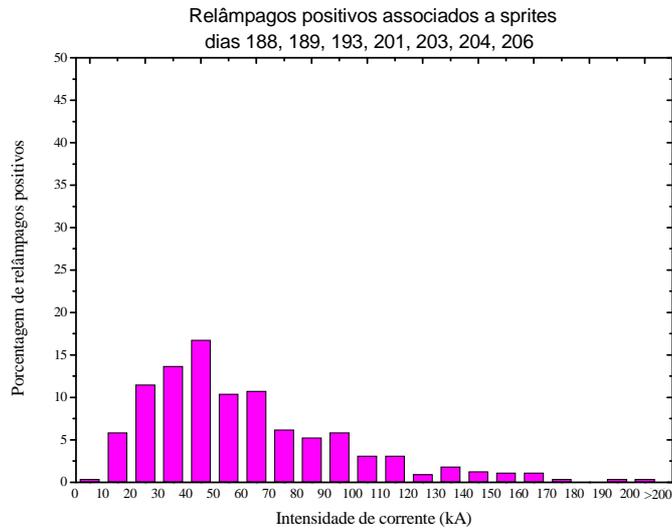


a)

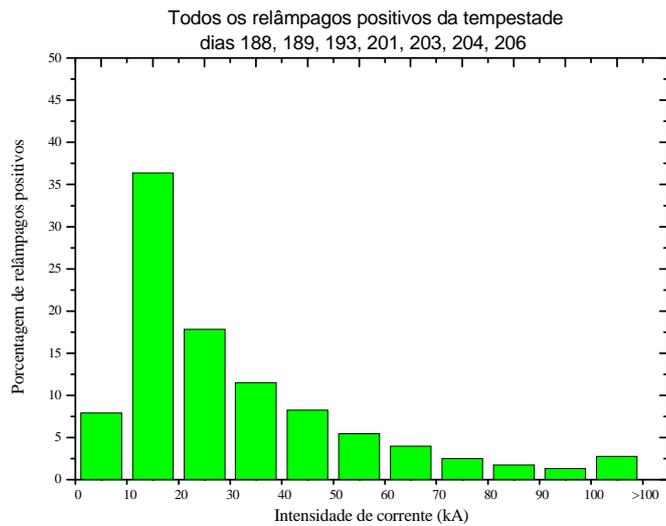


b)

Figura. 5.5 - Número de relâmpagos positivos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados em função da Corrente (a) e Distribuição do Número total de relâmpagos positivos das tempestades dos dias analisados em função da Corrente (b). As últimas colunas representam todos os relâmpagos maiores que 200 kA e 100 kA em a e b respectivamente.



a)



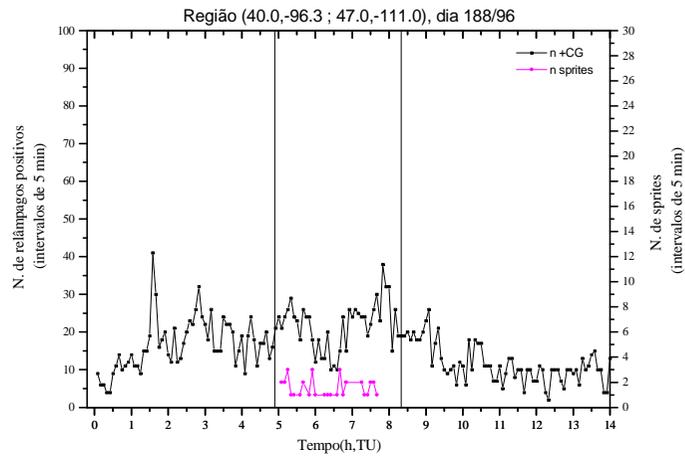
b)

Figura. 5.6 - Distribuição da Porcentagem de relâmpagos positivos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados em função da Corrente (a) e Distribuição da Porcentagem de relâmpagos positivos das tempestades desses dias em função da Corrente (b). As últimas colunas representam todos os relâmpagos maiores que 200 kA e 100 kA em a e b respectivamente.

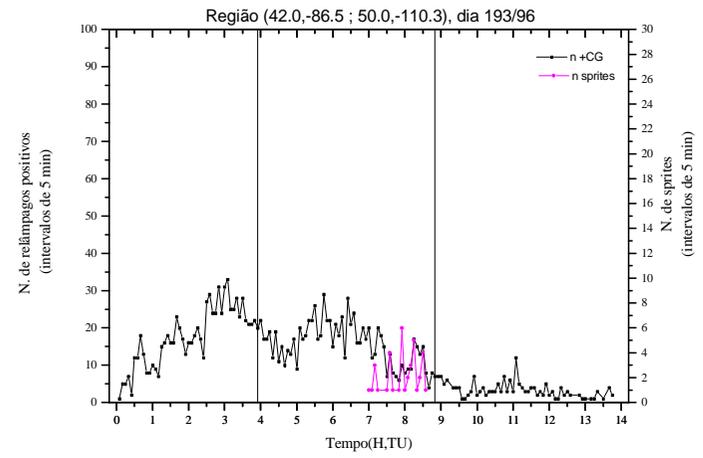
Na **Figura. 5.6** a nota-se que os relâmpagos com correntes muito baixas, abaixo de 20 kA, contribuem com aproximadamente 7% no total de relâmpagos associados a sprites. A faixa de corrente que mais “produziu” sprites é a de 40 a 50 kA. O fato de relâmpagos com correntes nessa faixa não terem sido a maioria nessas tempestades, uma vez que a faixa de corrente com maior número de relâmpagos é a de 10 a 20 kA (**Figura. 5.6 b**), sugere que deve existir algum mecanismo fazendo com que ocorram mais sprites associados a relâmpagos positivos correntes em torno de 40 a 50 kA.

Na **Figura 5.7** estão representadas a Distribuição Temporal do Número de Relâmpagos Positivos de toda a tempestade ocorridos em intervalos de 5 min (curvas pretas) e a Distribuição Temporal do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos (curvas magentas).

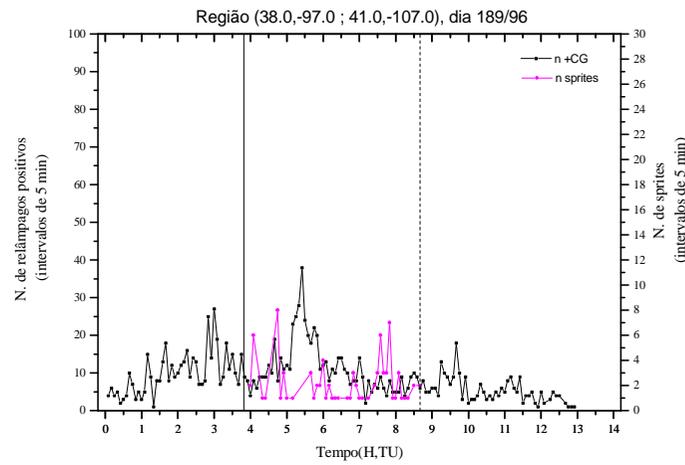
Os dias 201 e 203 (Figuras d e e), pertencentes ao Grupo I, são os únicos nos quais parece ter havido uma correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência dos relâmpagos positivos. No dia 201 o número de sprites atingiu seu valor máximo simultaneamente a máxima ocorrência de relâmpagos positivos e decresceu junto com o decréscimo da taxa de ocorrência dos relâmpagos positivos. No dia 203 a taxa de ocorrência de sprites atingiu o máximo aproximadamente 30 min após o máximo da taxa de relâmpagos positivos. Para verificar a existência de uma correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência dos relâmpagos positivos foram construídos os gráficos do Número de Relâmpagos Positivos em função do Número de Sprites (**Figura 5.8**) e calculados os coeficientes de correlação, dispostos na **Tabela 5.3**. O mesmo estudo de correlação com o número de sprites foi feito para a Corrente Total dos Relâmpagos Positivos (**Figura 5.9**), e os coeficientes de correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos estão dispostos na **Tabela 5.3**.



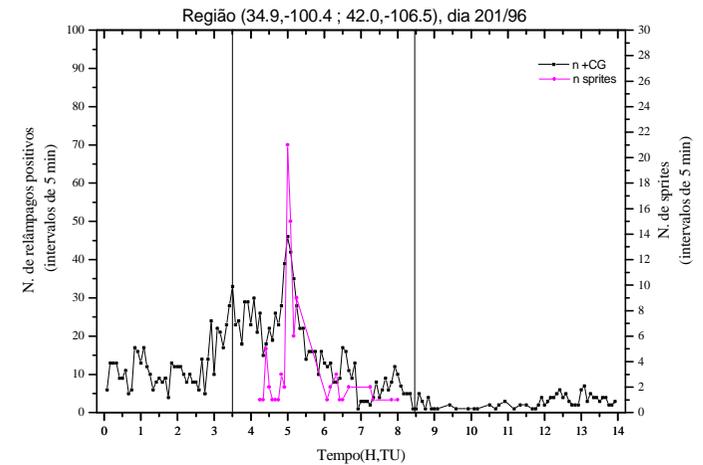
a)



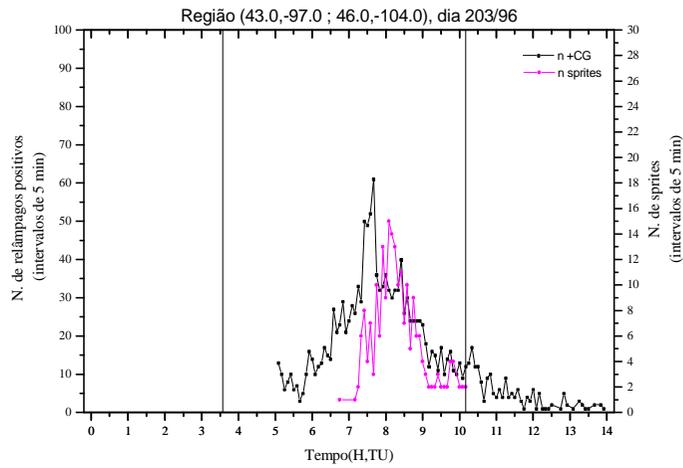
c)



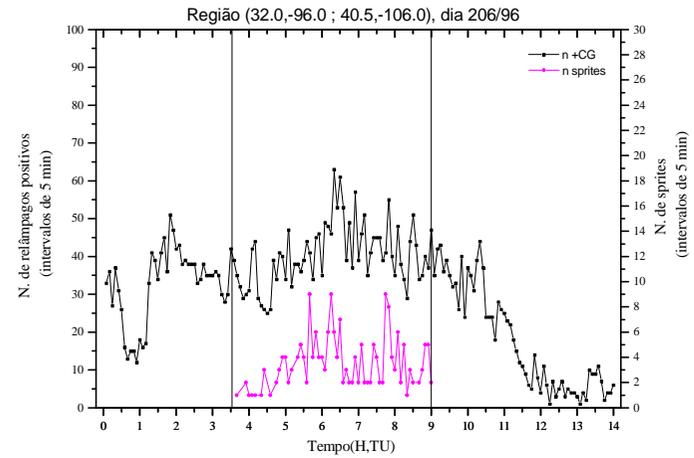
b)



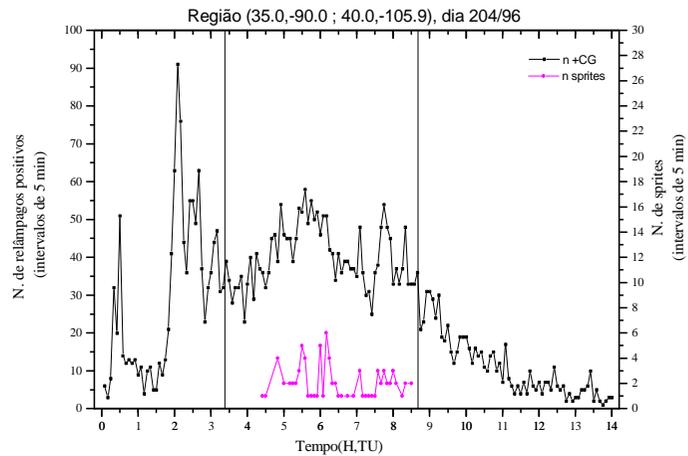
d)



e)

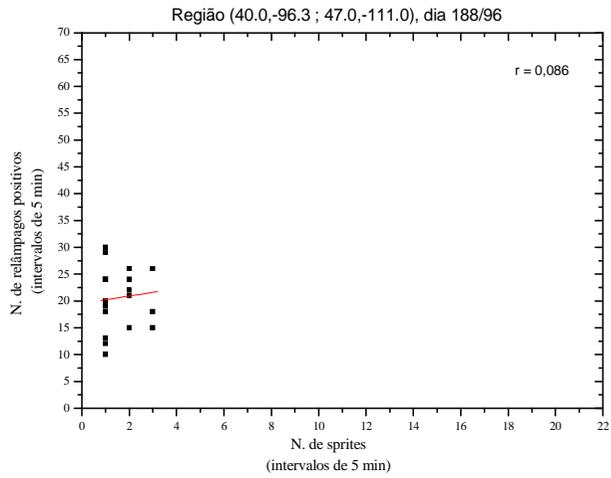


g)

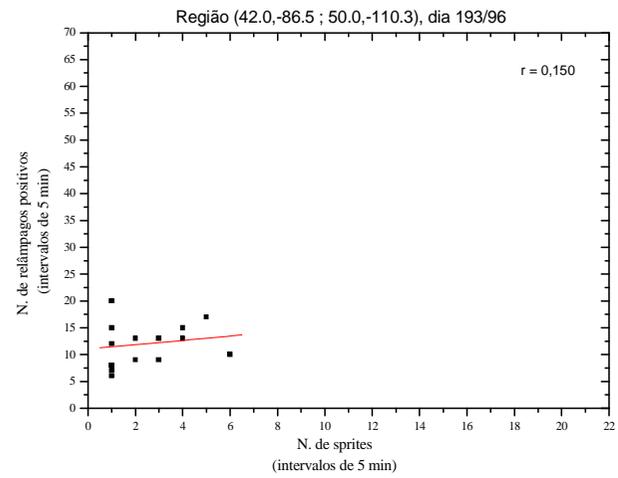


f)

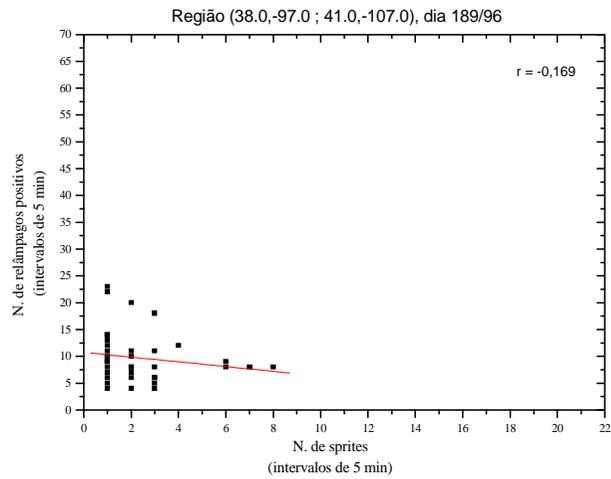
Figura 5.7 - Gráficos do Número de Relâmpagos Positivos de toda a tempestade, ocorridos em intervalos de 5 min, em função do Tempo, representado pelas curvas pretas, e do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos, em função do Tempo, representado pelas curvas magentas. As retas pretas delimitam o período de observação. Dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996.



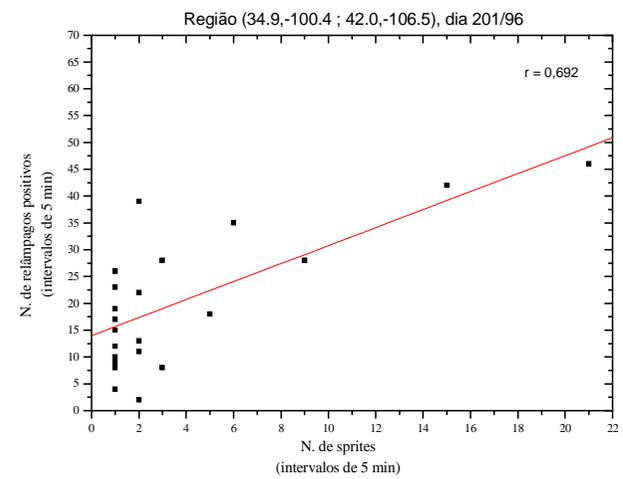
a)



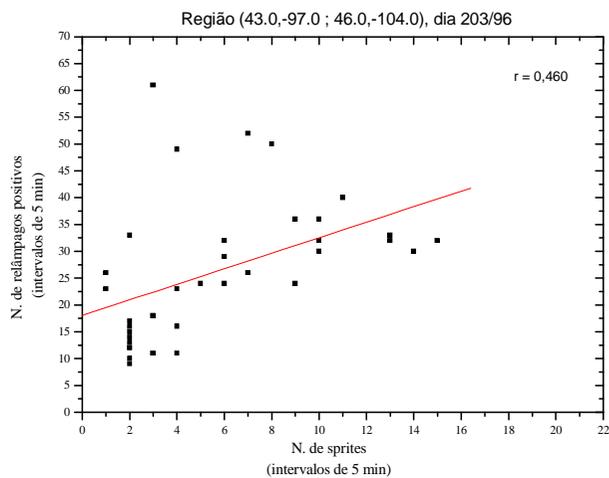
c)



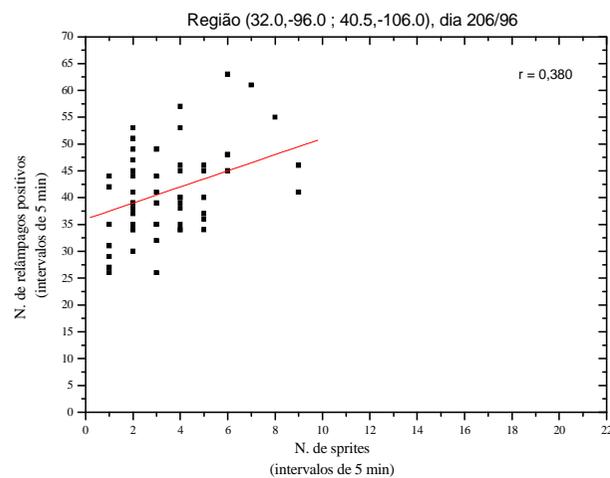
b)



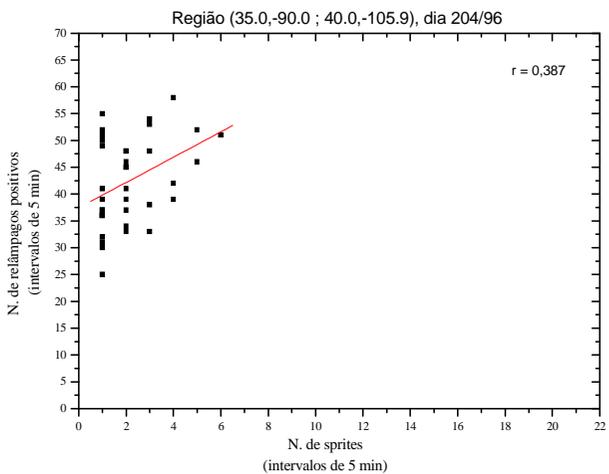
d)



e)



g)



f)

Figura 5.8 - Gráficos da Correlação entre o Número de Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.

Tabela 5.3 - Coeficiente de correlação entre o nº de sprites e nº de relâmpagos positivos e entre nº de sprites e corrente total de relâmpagos positivos

Dia	Nº sprites x Nº relâmpagos	Nº sprites x Corrente total
188	0,086	0,110
189	-0,169	0,140
193	0,150	0,228
201	0,692	0,761
203	0,460	0,345
204	0,387	0,421
206	0,380	0,121

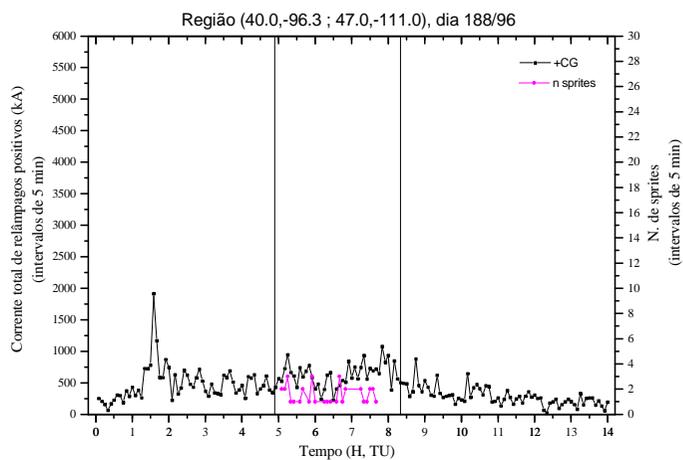
A **Tabela 5.3** mostra que só há indícios de haver alguma correlação entre o número de sprites e número de relâmpagos positivos nos dias 201 e 203, conforma já observado, sendo o coeficiente de correlação muito baixo para todos os outros dias.

O coeficiente de correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos de toda a tempestade foi calculado com objetivo de verificar a existência de algum efeito cumulativo na corrente total dos relâmpagos positivos de toda a tempestade que influenciasse a ocorrência de sprites. Analogamente aos resultados obtidos para a correlação entre o número de sprites e número de relâmpagos positivos, só há indícios de haver uma possível correlação nos dias 201 e 203. A **Figura 5.10** mostra os gráficos da correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos de toda a tempestade.

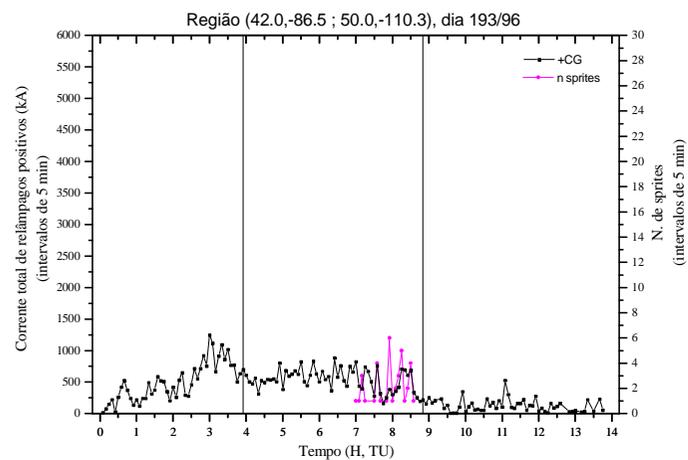
Como no dia 203 o pico de ocorrência de sprites se encontrava deslocado do máximo de ocorrência de relâmpagos positivos e da corrente total, esse deslocamento foi considerado e os respectivos coeficientes de correlação desses dias foram recalculados (**Figura 5.11**). Os novos valores encontrados, 0,704 para o nº de relâmpagos e 0,575 para a corrente total, mostram que numa situação ótima para o dia 203, a correlação

entre taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos diminuiu em relação a correlação entre o número de sprites e número de relâmpagos positivos, donde se conclui que não foram encontradas evidências da existência de uma correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos de toda a tempestade. Isso não exclui a possibilidade de haver um efeito cumulativo para os relâmpagos da região de ocorrência de sprites, uma vez que eles se concentram em uma pequena região da tempestade (LYONS, 1996).

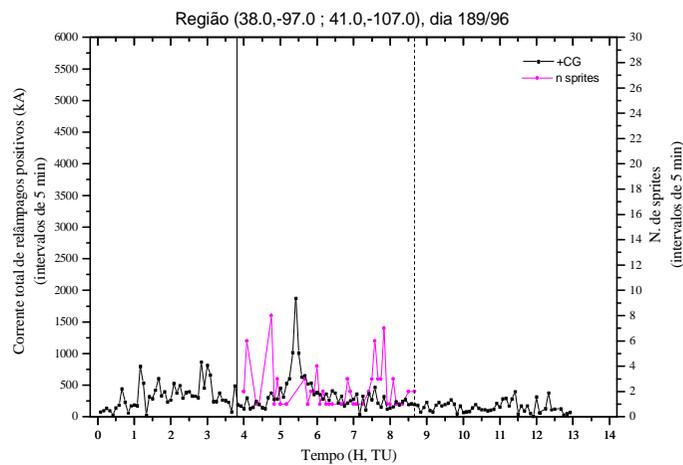
Apesar de não haver uma correlação evidente entre taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos positivos de toda a tempestade, nos dias do Grupo I a curva da corrente total se manteve num patamar mais alto durante o período de ocorrência dos sprites. Nos dias 189, 201 e 203 ela atingiu seu pico máximo durante esse período e nos dias 204 e 206 o pico ocorreu aproximadamente 2 h e 30 min e 1 h e 30 min respectivamente, antes do início do período de registro de sprites, reforçando a idéia de que os sprites podem ter começado a ocorrer antes do início das observações, uma vez que a diferença de tempo entre o início das observações e o registro do primeiro sprite foi relativamente pequena (Tabela 5.1) e que no dia 203, único no qual acredita-se tenha sido documentado o início do período de ocorrência de sprites, o início da produção de sprites coincidiu com um período de crescimento constante do número de relâmpagos positivos com alta corrente e da corrente total.



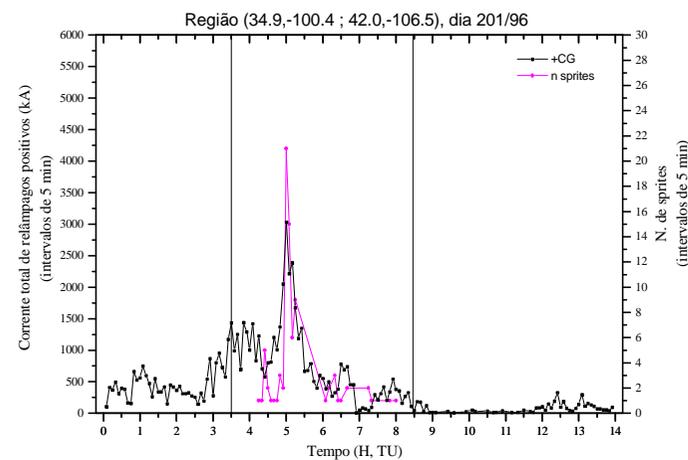
a)



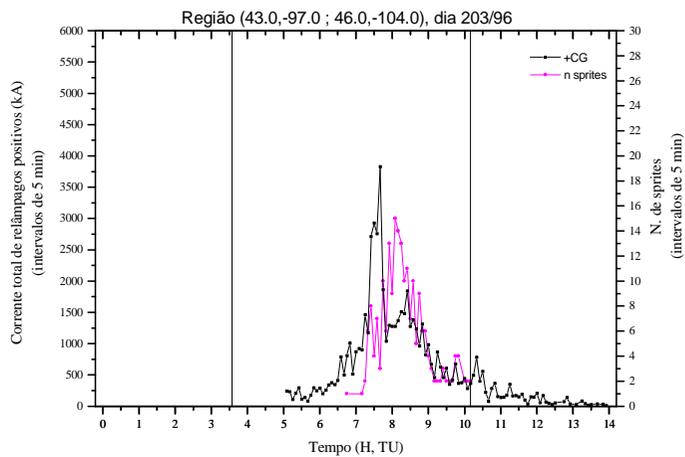
c)



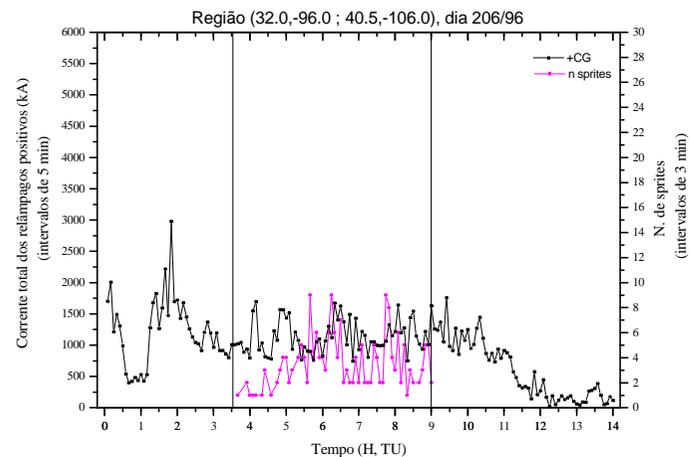
b)



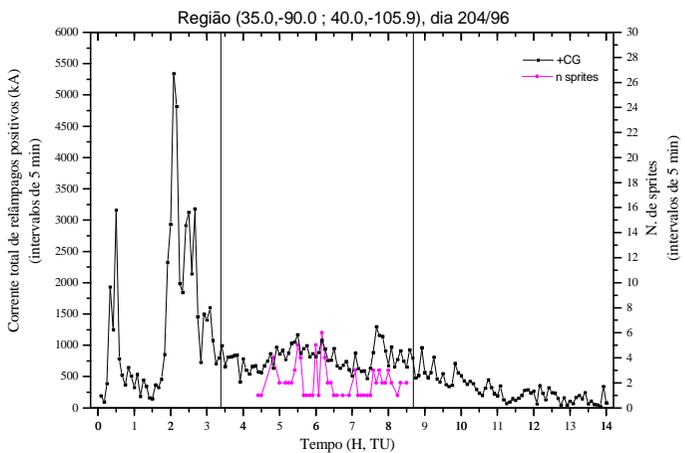
d)



e)

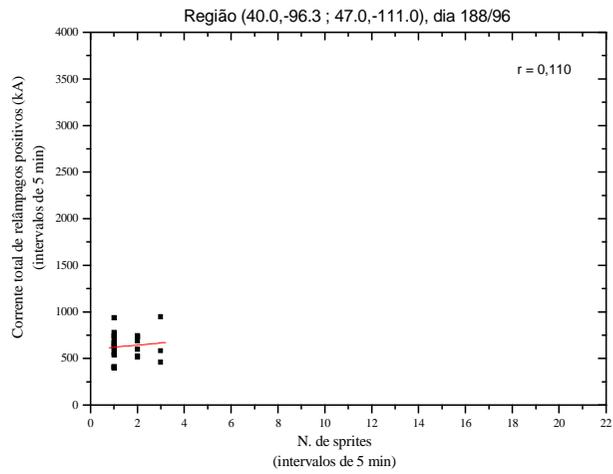


g)

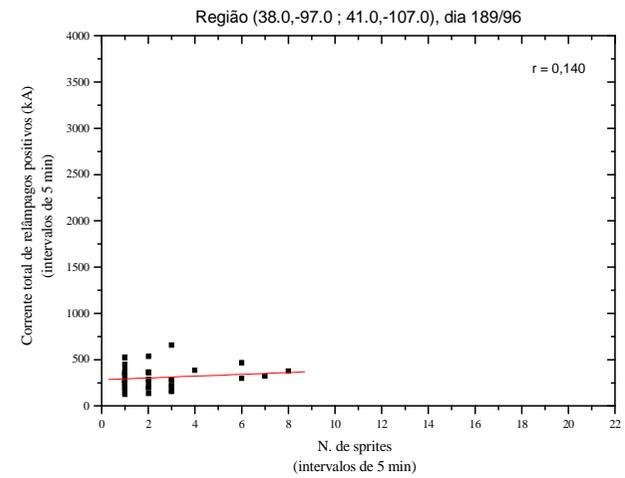


f)

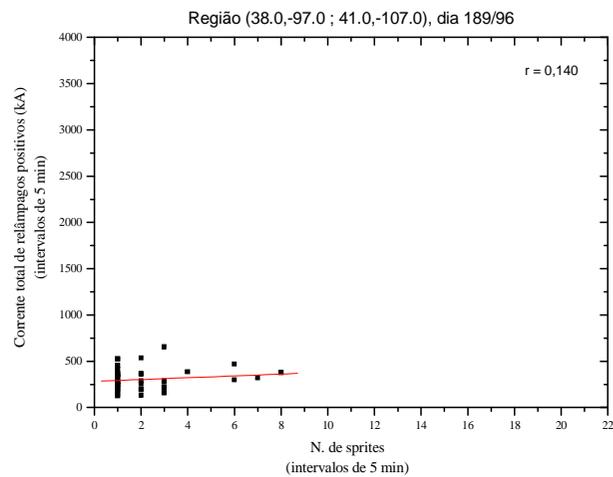
Figura 5.9 - Corrente Total dos Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min em função do Tempo para os 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são a corrente total de todos os relâmpagos positivos, as magentas são o Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos em função do Tempo, as retas pretas delimitam o período de observação.



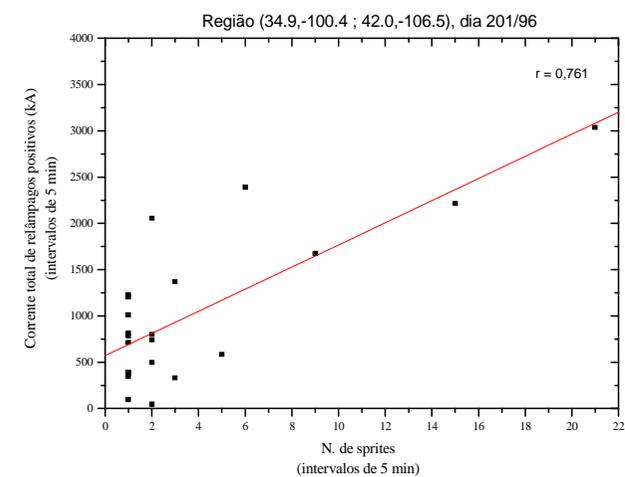
a)



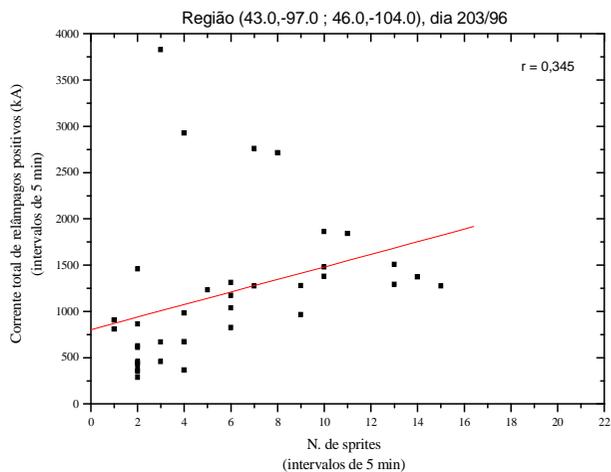
c)



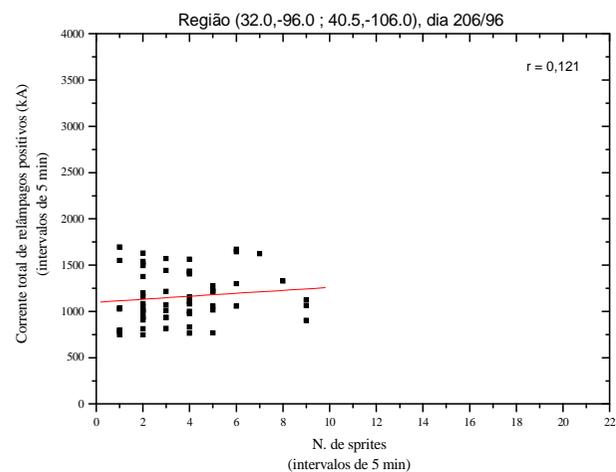
b)



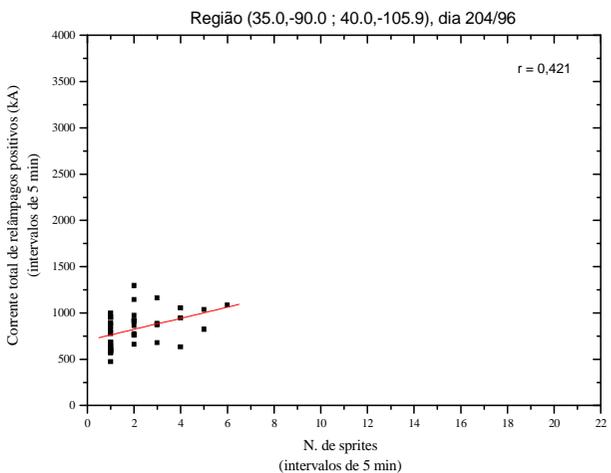
d)



e)

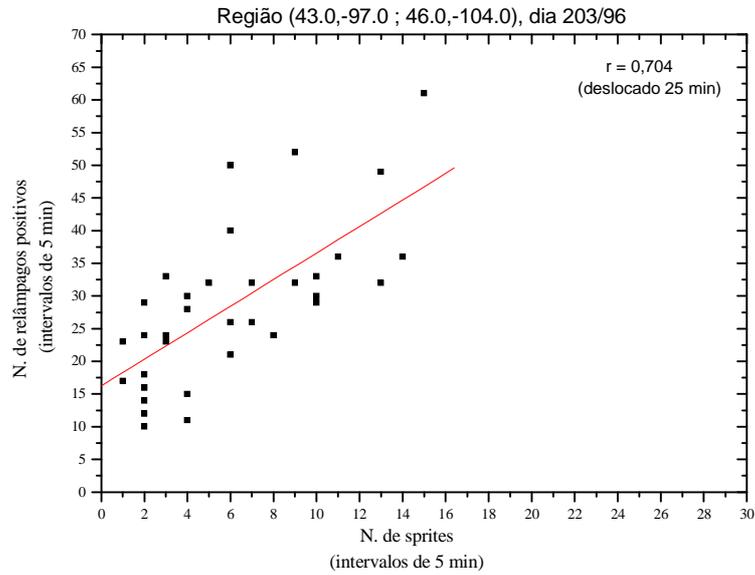


g)

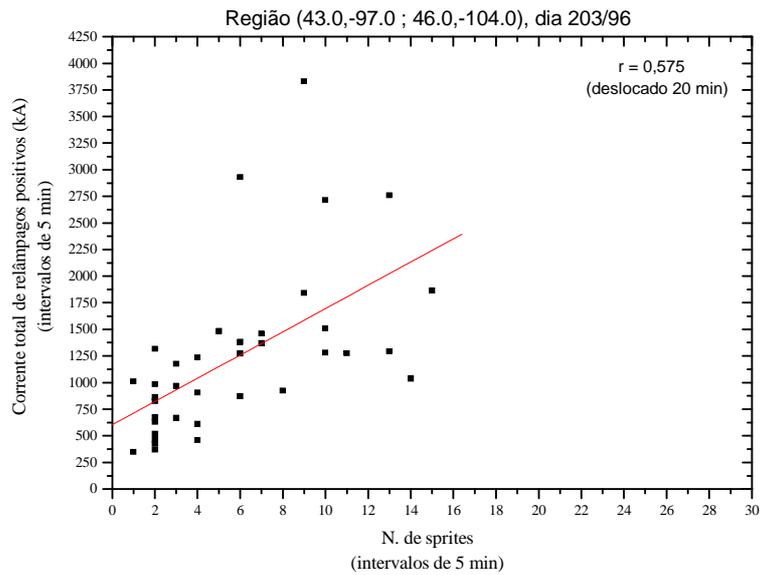


f)

Figura 5.10 - Gráficos da Correlação entre a Corrente Total de Relâmpagos Positivos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.



a)



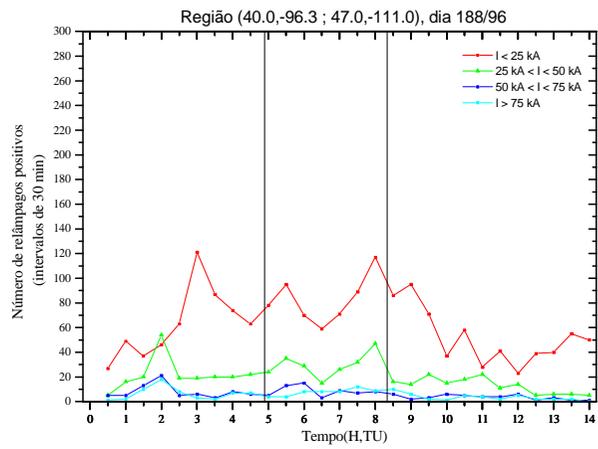
b)

Figura 5.11- Gráficos “recalculados” da Correlação entre o Número de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min (a) e Número de Sprites no mesmo intervalo e da correlação entre a Corrente total de Relâmpagos Negativos e Número de Sprites (b) para o dia 203.

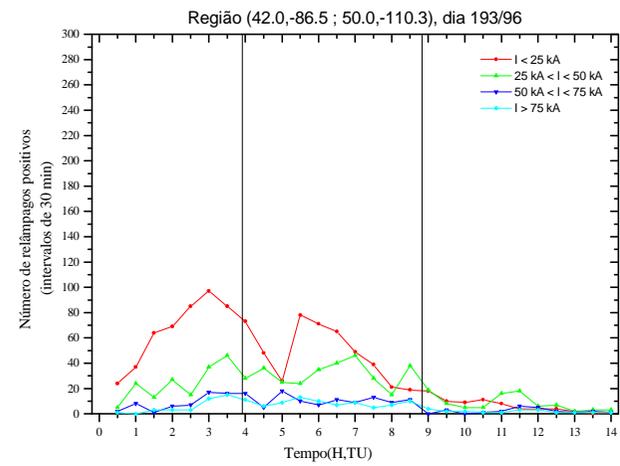
A **Figura 5.12** mostra a Distribuição Temporal do Número de Relâmpagos Positivos para faixas de intensidade de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min. As curvas vermelhas representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente menor que 25 kA, as curvas verdes representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 25 kA e menor que 50 kA, as curvas azuis representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 50 kA e menor que 75 kA e as curvas cians representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 75 kA.

A curva dos relâmpagos com intensidade de corrente menor que 25 kA apresenta pontos de máximo durante o período de ocorrência dos sprites em todos os dias de eventos, sendo a curva dominante na maioria dos dias. No dia 203, o único no qual acredita-se tenha sido documentado o início do período de ocorrência de sprites, as curvas de relâmpagos com correntes entre 50 e 75 kA (curvas azuis) e as de relâmpagos com correntes acima de 75 kA apresentaram um crescimento no período inicial da ocorrência de sprites, atingindo seus respectivos máximos durante o período de máxima ocorrência de sprites.

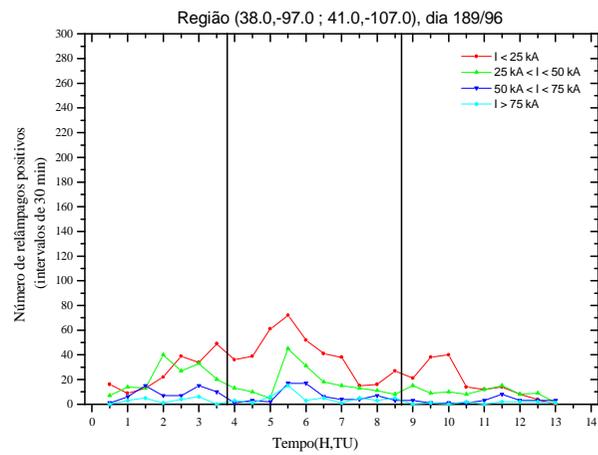
Nos outros dias as curvas de relâmpagos com correntes entre 50 e 75 kA (curvas azuis) e as de relâmpagos com correntes acima de 75 kA apresentaram crescimentos semelhantes com pontos de máximos que ocorreram, contudo, antes do início do período de registro de sprites. Como na maioria dos dias os sprites começaram a ser registrados pouco tempo depois do início das observações, sugere-se que haja alguma relação entre o início da ocorrência de sprites e o crescimento da atividade de relâmpagos positivos com correntes acima de 50 kA.



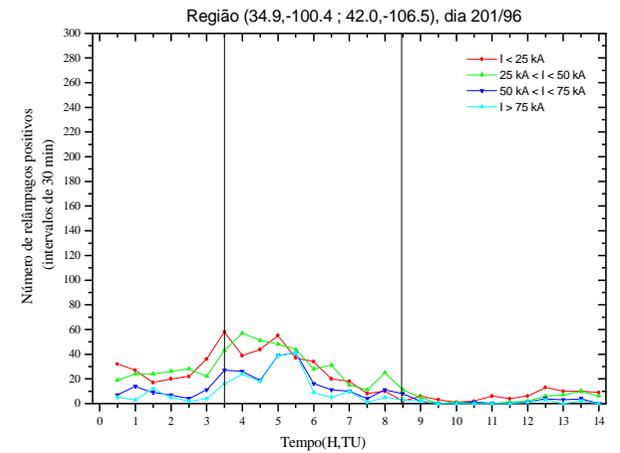
a)



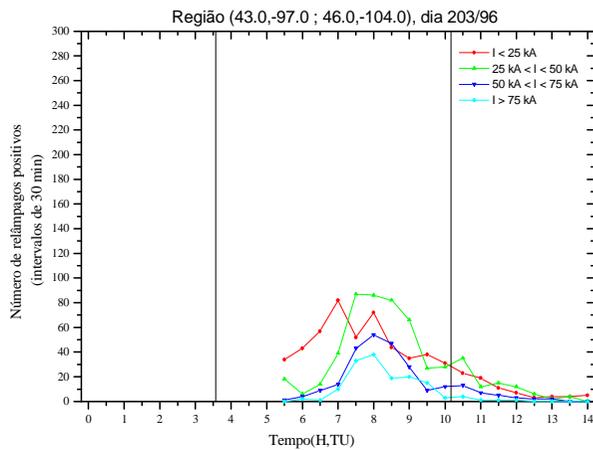
c)



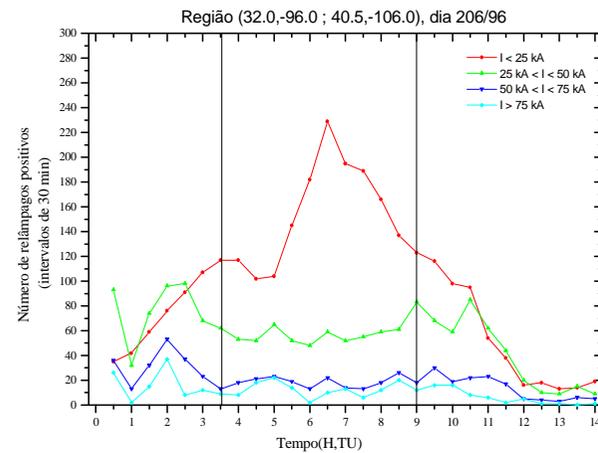
b)



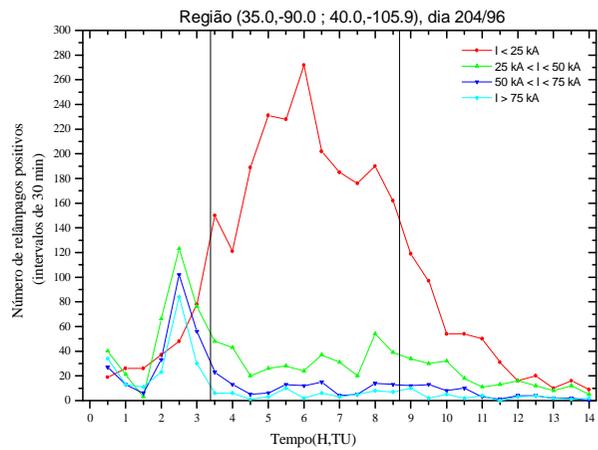
d)



e)



g)

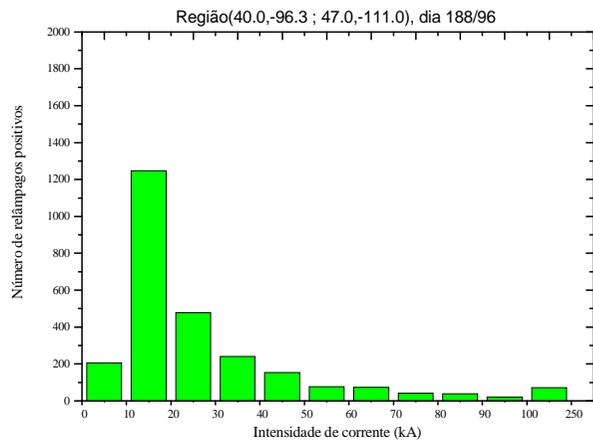


f)

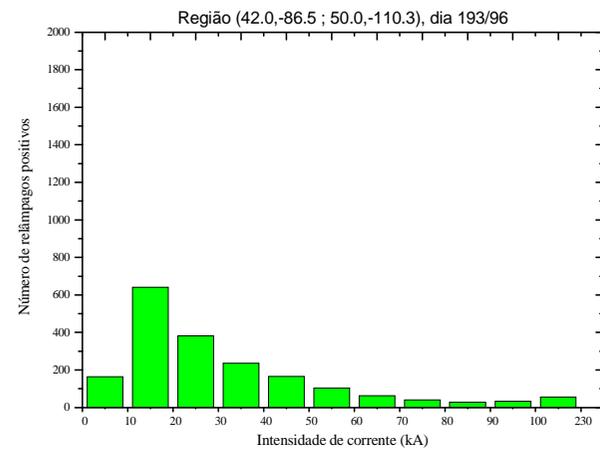
Figura 5.12 - Distribuição Temporal do N^o de Relâmpagos Positivos para faixas de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas vermelhas são o n^o de relâmpagos com $I < 25 \text{ kA}$, as verdes são o n^o de relâmpagos com $25 \text{ kA} \leq I < 50 \text{ kA}$, as azuis são o n^o de relâmpagos com $50 \text{ kA} \leq I < 75 \text{ kA}$ e as curvas cians são o n^o de relâmpagos com $I \geq 75 \text{ kA}$.

O Número de Relâmpagos Positivos em função da Intensidade de Corrente é mostrado na Figura 5.13 - . Em todos os setes dias a faixa de corrente com maior número de relâmpagos positivos é entre 10 e 20 kA, reforçando o resultado obtido na Figura. 5.5 a.

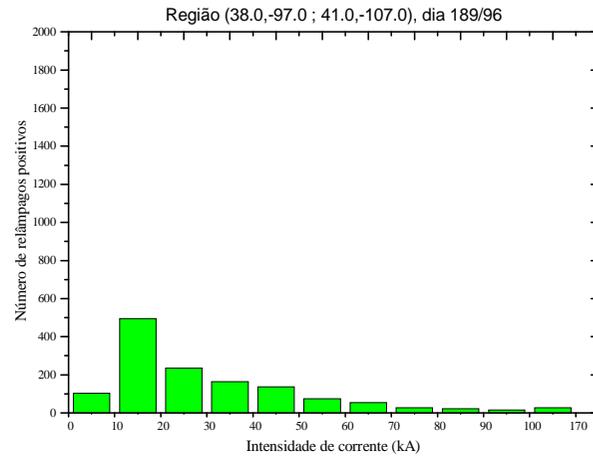
A **Figura 5.14** mostra a Porcentagem de Relâmpagos Positivos em relação ao número total de relâmpagos (positivos mais negativos) em função da Corrente. No dia 203 houve uma grande porcentagem de relâmpagos positivos e uma grande quantidade de sprites (212). Entretanto, o dia 206 também apresentou uma grande quantidade de sprites (205) sem ter havido uma grande porcentagem de relâmpagos positivos, indicando que a ocorrência de altas porcentagens de relâmpagos positivos não é uma condição indispensável para ocorrência de sprites e tampouco determina o número de sprites ocorrentes.



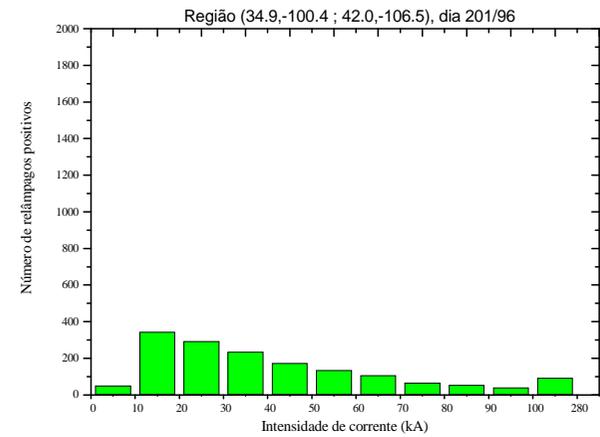
a)



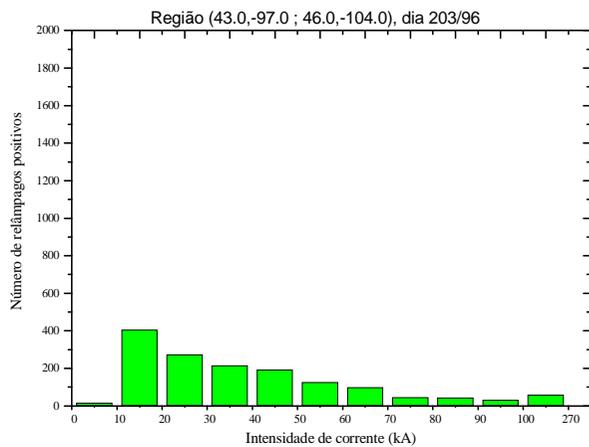
c)



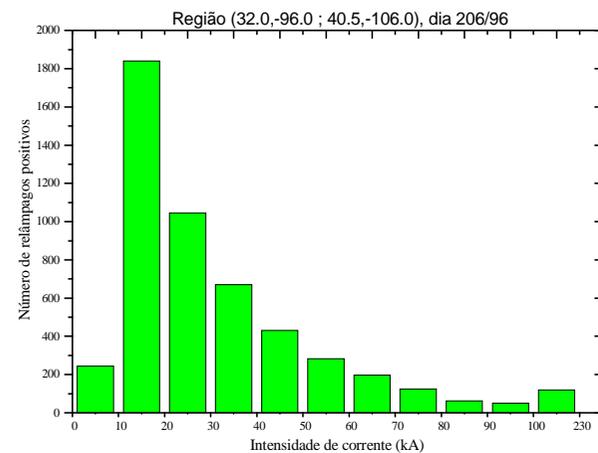
b)



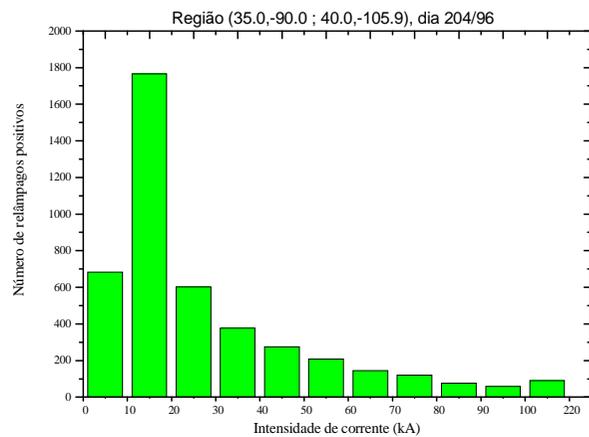
d)



e)

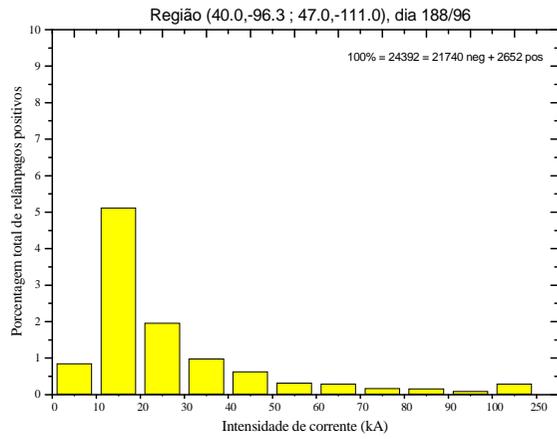


g)

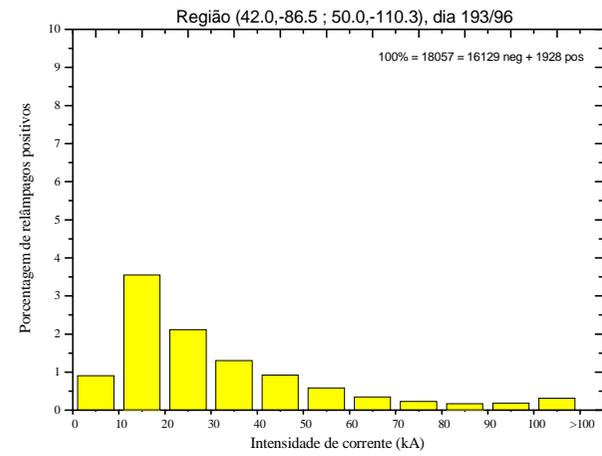


d)

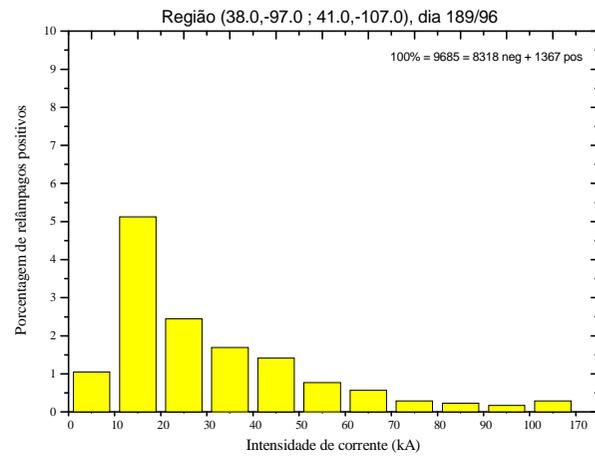
Figura 5.13 - Gráficos do Número de Relâmpagos Positivos em função da Intensidade de Corrente, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.



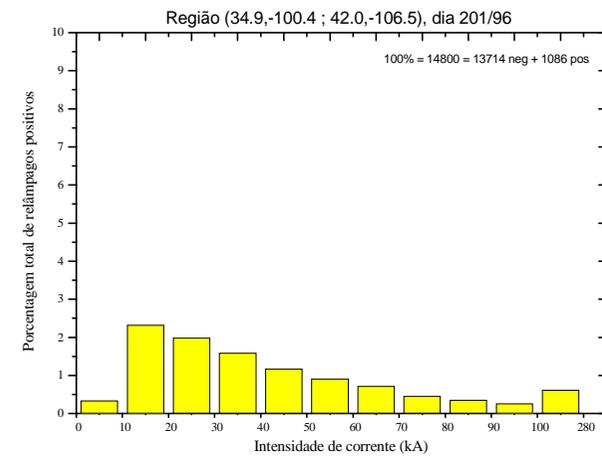
a)



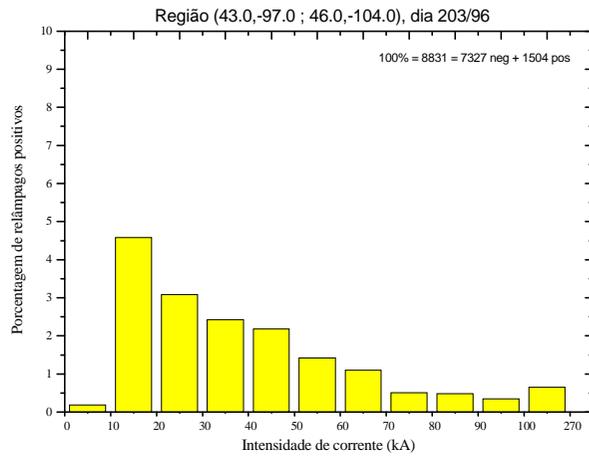
c)



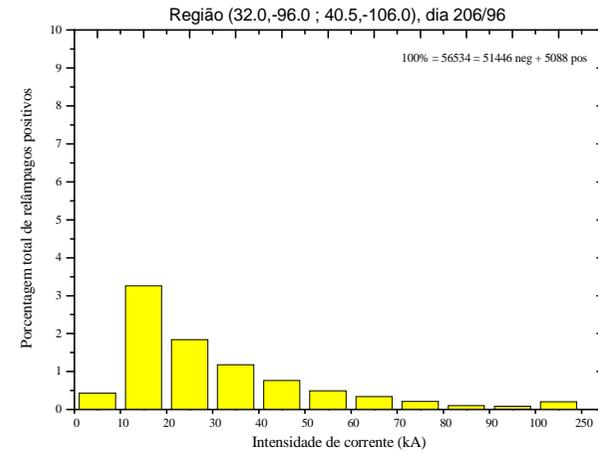
b)



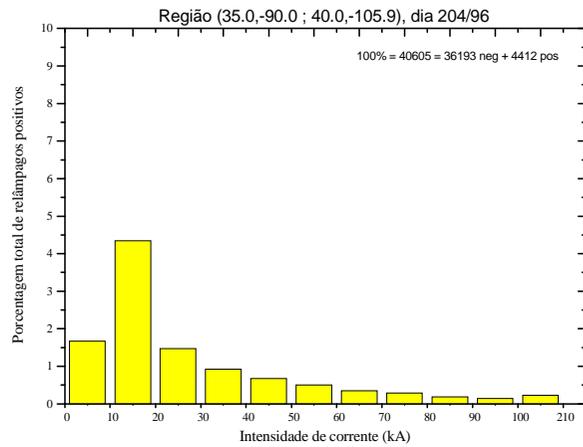
d)



e)



g)



f)

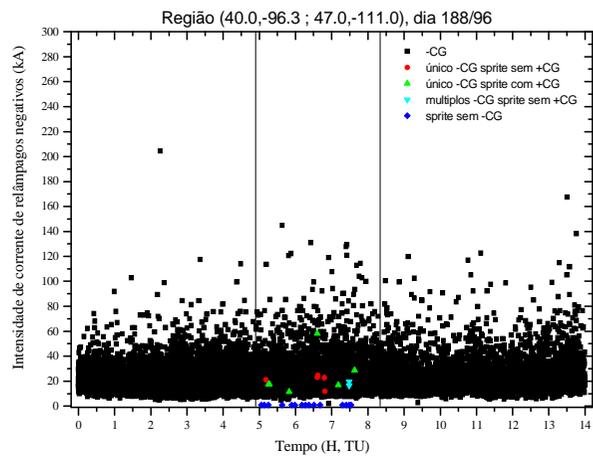
Figura 5.14 - Gráficos da Porcentagem de Relâmpagos Positivos em relação a todos os relâmpagos da tempestade (positivos e negativos) para os 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.

5.2 Relâmpagos negativos

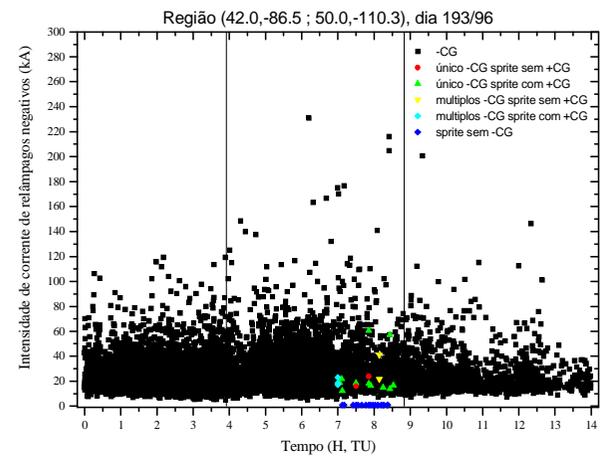
Na **Figura 5.15** estão representadas a Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos em função do Tempo para os dias analisados. A figura mostra que o número de relâmpagos negativos da tempestade é muito maior que o número de relâmpagos positivos e que a corrente de relâmpagos negativos associados a sprites é bem menor que a dos positivos associados a sprites.

A **Figura. 5.16** mostra as Médias, suavizadas, da Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos calculadas em intervalos de 5 min em função do Tempo. A média da intensidade de corrente dos relâmpagos negativos permanece entre 15 e 25 kA aproximadamente, apresentando pequenas oscilações dentro dessa faixa de corrente, indicando que o número de relâmpagos negativos com altas correntes em relação ao número total de negativos é tão pequeno que não causa grandes variações na média.

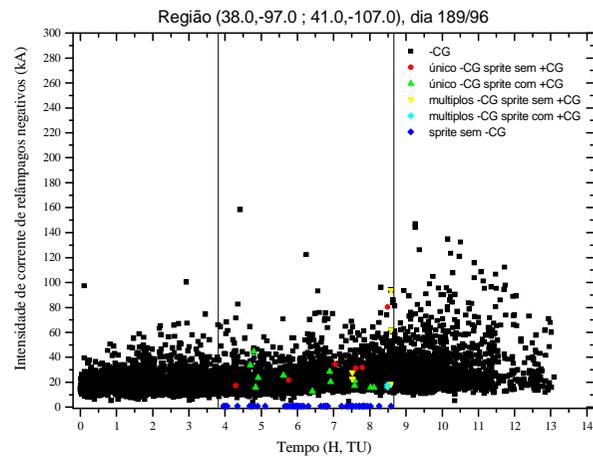
Também foram avaliadas a distribuição das correntes e da porcentagem dos relâmpagos negativos associados a sprites dos sete dias estudados, em função da corrente, mostrados na Figura 5.17 a e na Figura. 5.18 a, comparando-as com a distribuição do número e da porcentagem de relâmpagos positivos de toda a tempestade em função da corrente (**Figura. 5.5** e **Figura. 5.6** respectivamente).



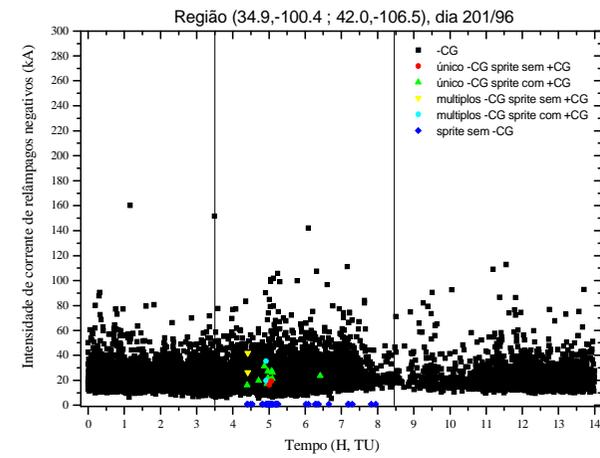
a)



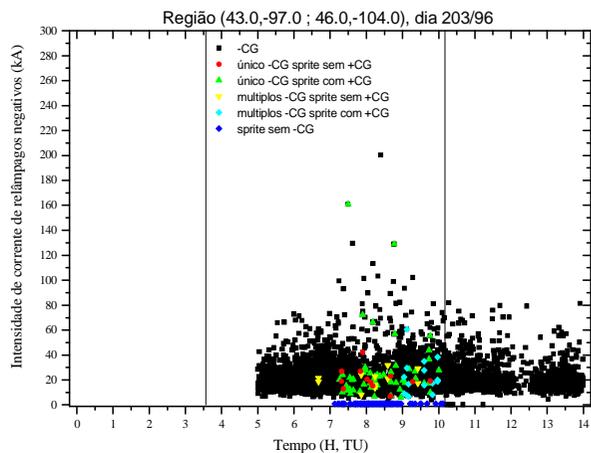
c)



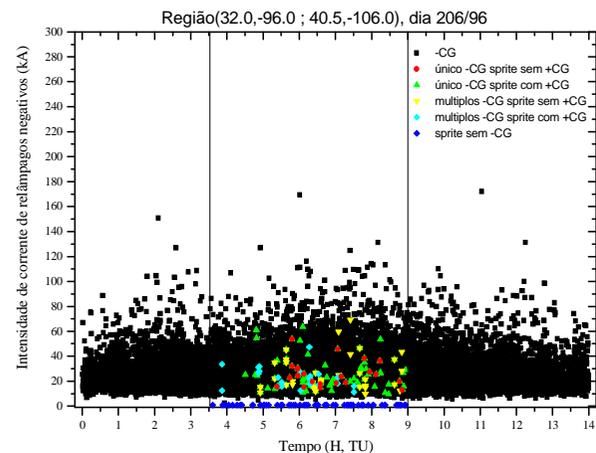
b)



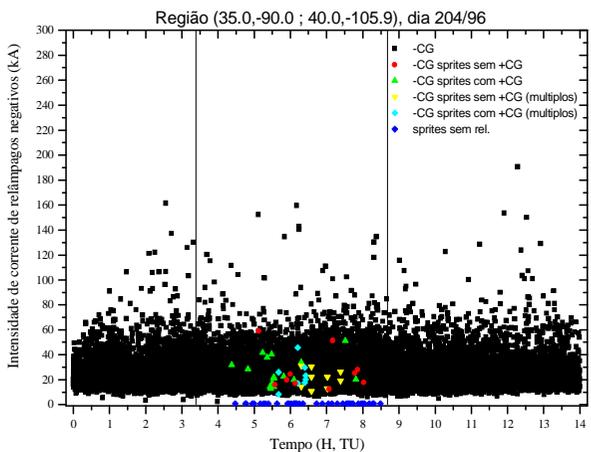
d)



e)

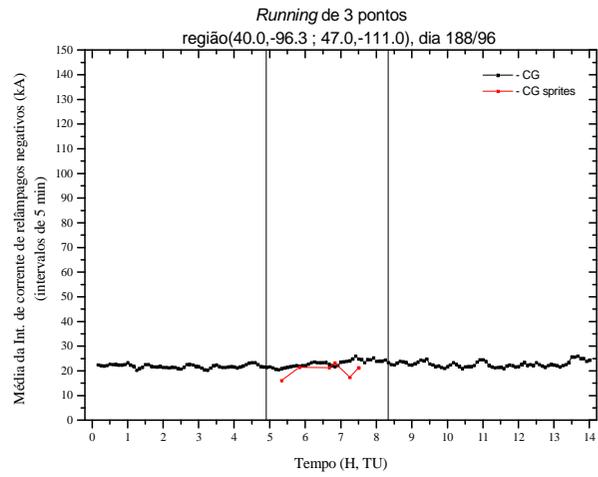


g)

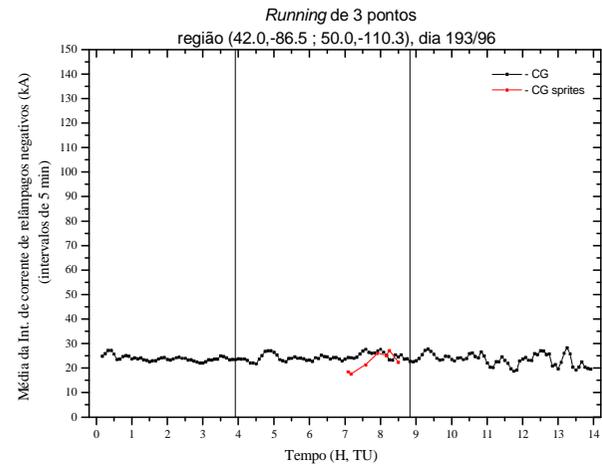


f)

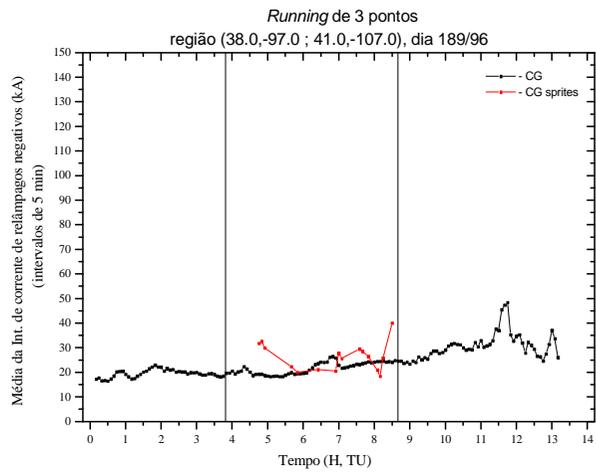
Figura 5.15 - Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos em função do Tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996. Os quadrados pretos são relâmpagos não associados a sprites, os círculos vermelhos são relâmpagos únicos associados a sprites, os triângulos verdes são múltiplos relâmpagos associados a sprites e losangos azuis são sprites para os quais não foi encontrado nenhum relâmpago associado.



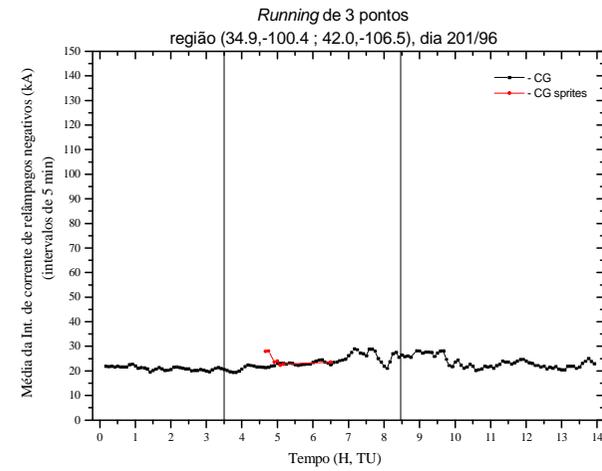
a)



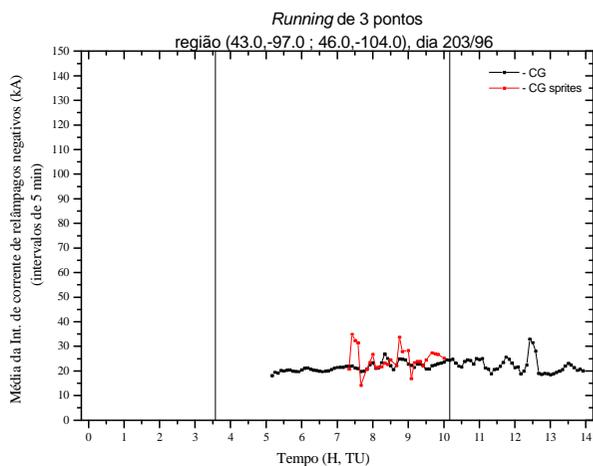
c)



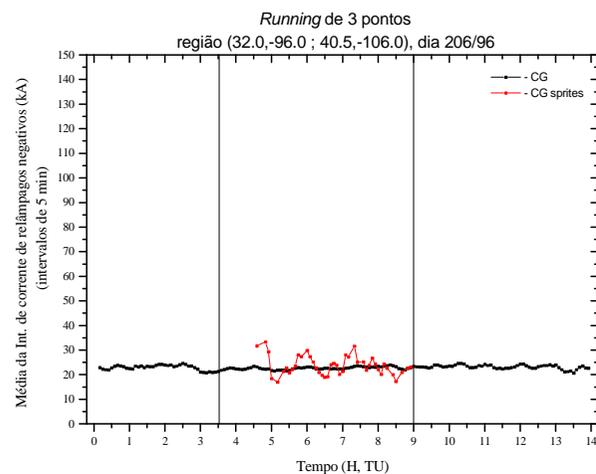
b)



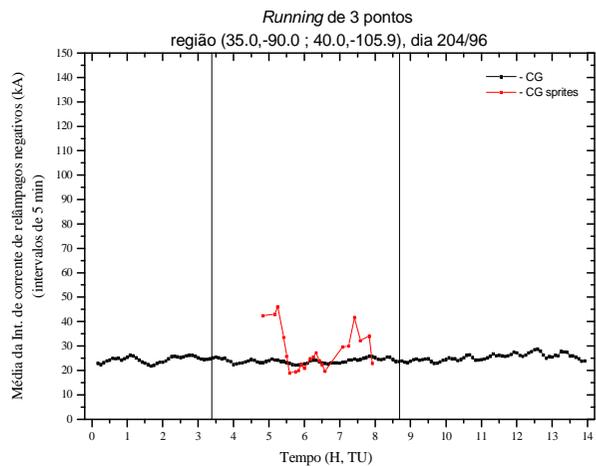
d)



e)

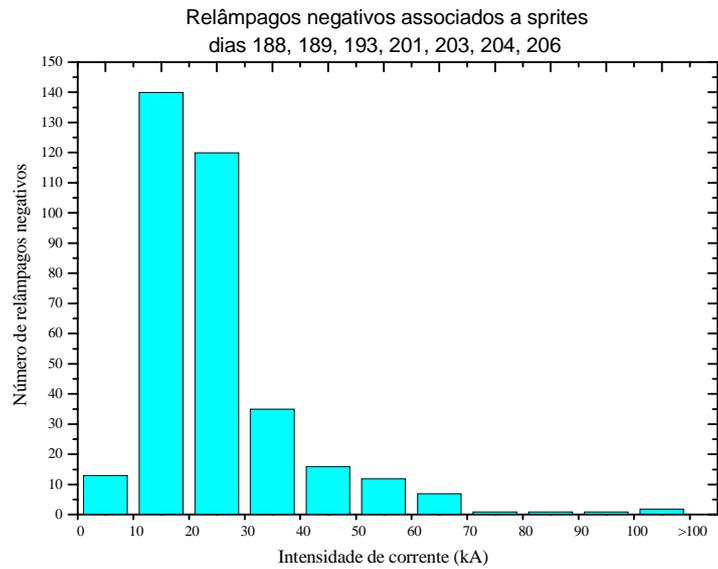


g)

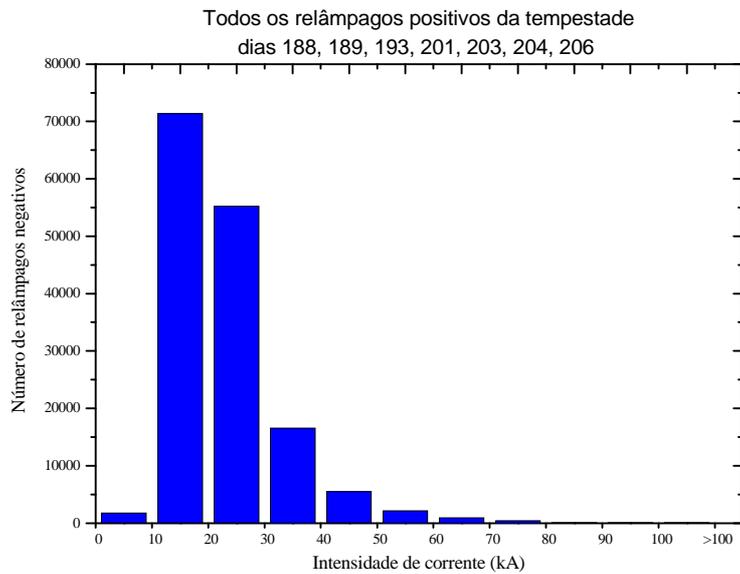


f)

Figura. 5.16 - Médias suavizadas da Intensidade de Corrente dos Relâmpagos Negativos (intervalos de 5 min) em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996. As curvas pretas são as médias de todos os relâmpagos negativos ocorridos nas tempestades, as vermelhas são as médias da intensidade de corrente dos relâmpagos associados a sprites, as retas pretas delimitam o período de observação.

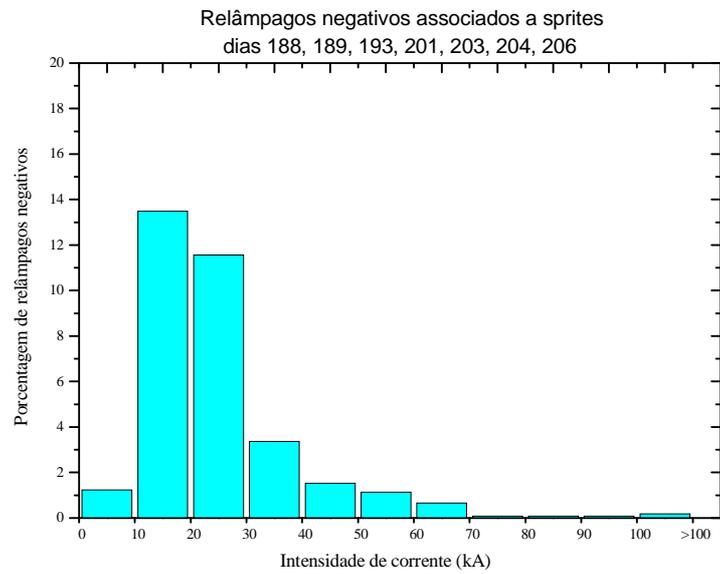


a)

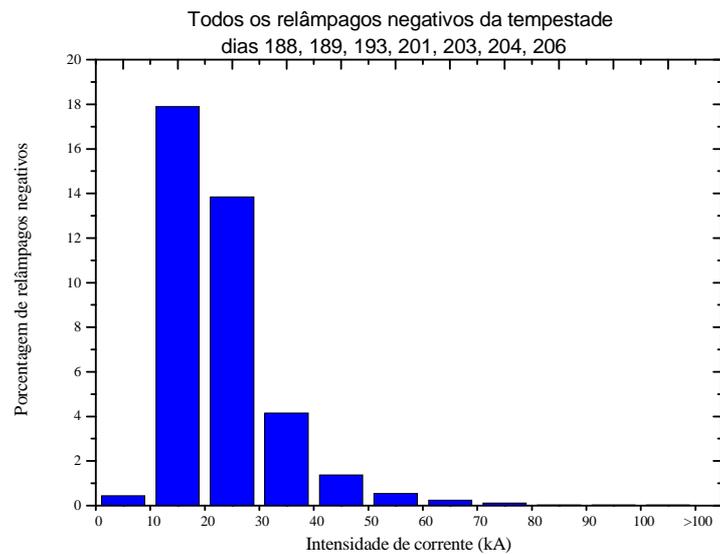


b)

Figura 5.17 - Distribuição do Número de relâmpagos negativos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados (a) e Distribuição do Número de relâmpagos negativos das tempestades “geradoras” (b) respectivamente.



a)



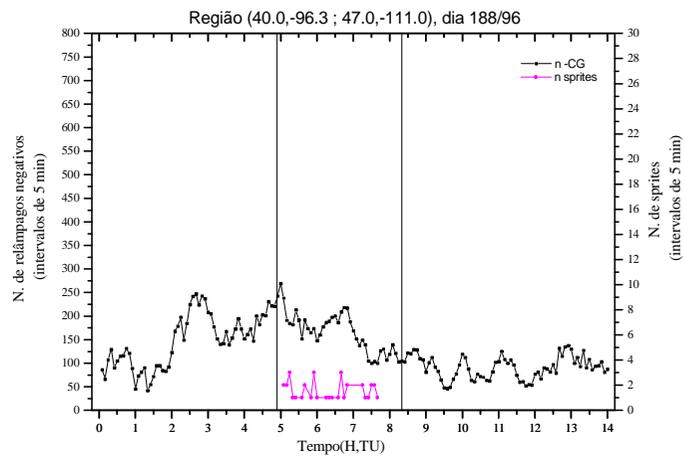
b)

Figura. 5.18 - Distribuição da Porcentagem de relâmpagos negativos associados a sprites ocorridos durante os sete dias analisados (a) e Distribuição da Porcentagem de relâmpagos negativos das tempestades “geradoras” (b) respectivamente.

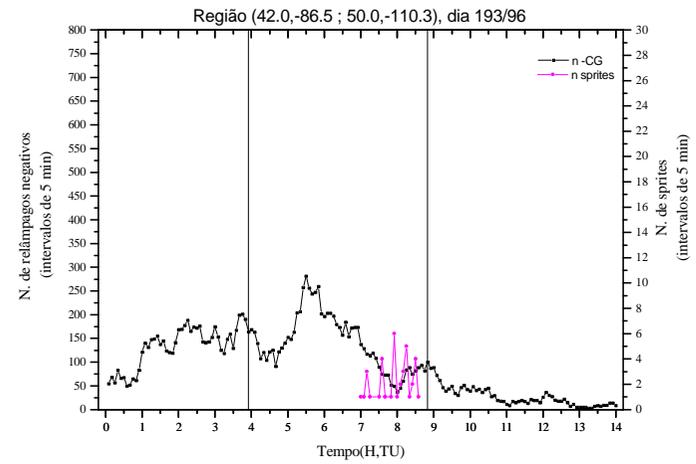
As curvas pretas da **Figura 5.19**, mostram a Distribuição Temporal do Número de Relâmpagos Negativos de toda a tempestade ocorridos em intervalos de 5 min e as curvas magenta mostram a Distribuição Temporal do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos. Em quatro dos sete dias analisados a taxa de ocorrência de relâmpagos negativos se manteve alta durante o período de ocorrência de sprites.

A **Figura 5.21** mostra que a Corrente Total dos Relâmpagos Negativos, em intervalos de 5 min, em função do Tempo, representada pela curva preta, também manteve valores altos durante o período de registro de sprites na maioria dos dias analisados. Devido ao fato de o número total de relâmpagos negativos ter sido 6 a 12 vezes maior que o total de relâmpagos positivos, a corrente total dos relâmpagos negativos foi em média 2 a 10 vezes maior que a dos positivos, indicando que a baixa ocorrência de relâmpagos negativos com altas correntes foi compensada pela alta ocorrência de relâmpagos negativos com baixas correntes.

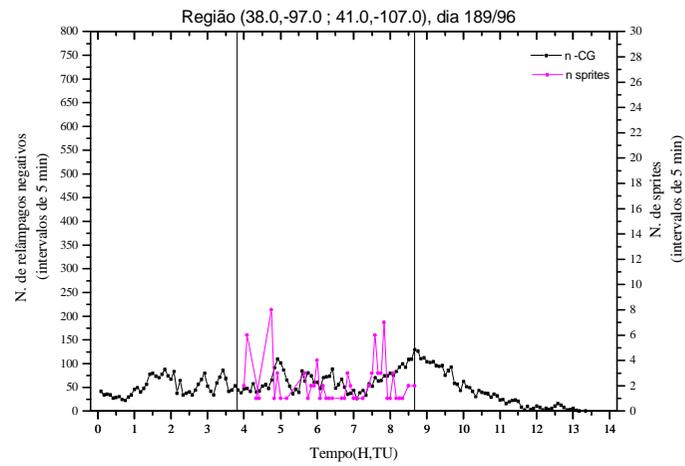
De modo análogo aos relâmpagos positivos, foi avaliada a existência de alguma correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência dos relâmpagos negativos e entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos negativos. Os respectivos gráficos foram dispostos na **Figura 5.20**, e na **Figura 5.22** e coeficientes de correlação estão listados na **Tabela 5.4**. Novamente, não foi encontrada uma correlação conclusiva entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência dos relâmpagos negativos e entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos negativos da tempestade.



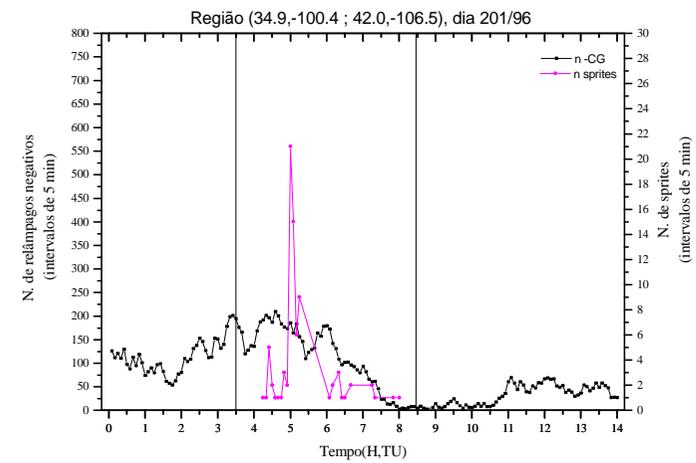
a)



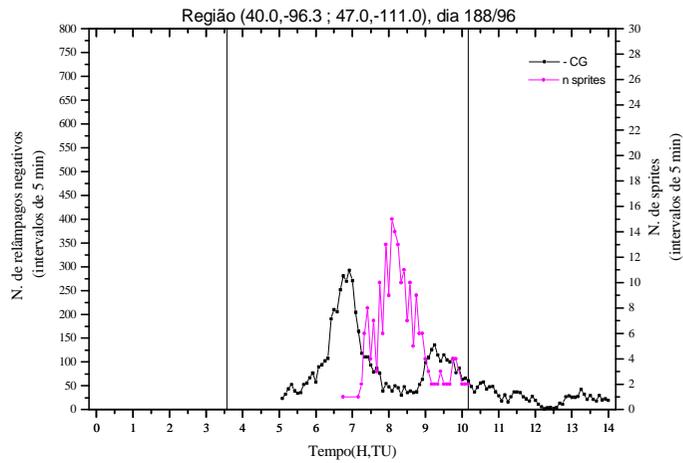
c)



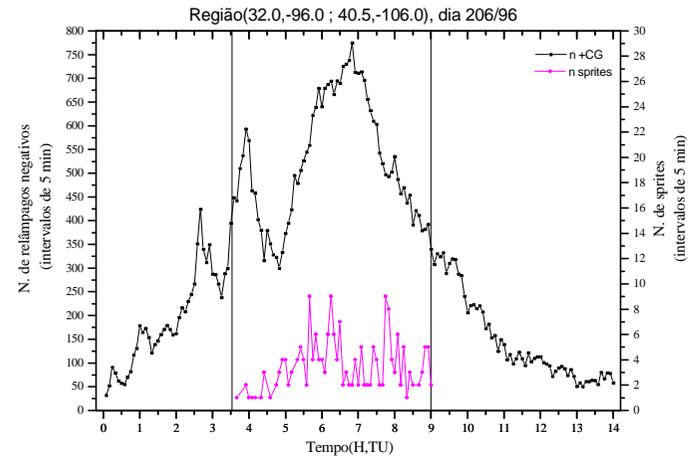
b)



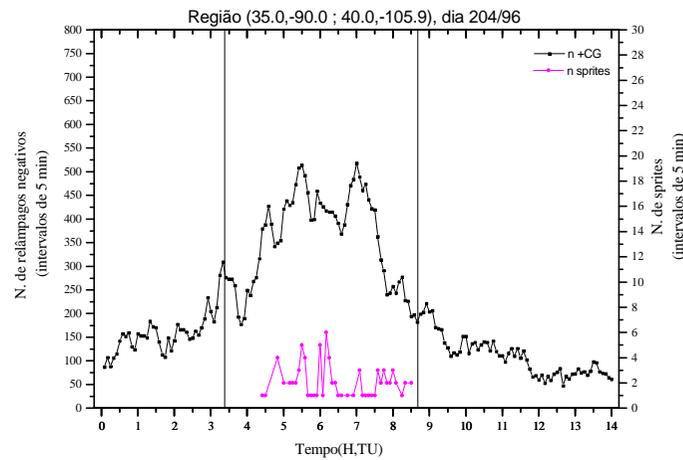
d)



e)

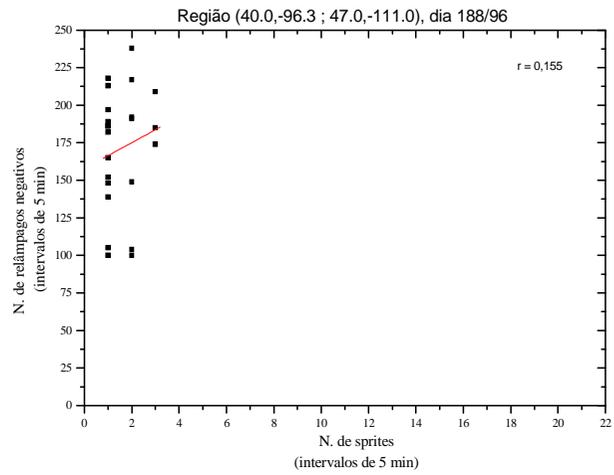


g)

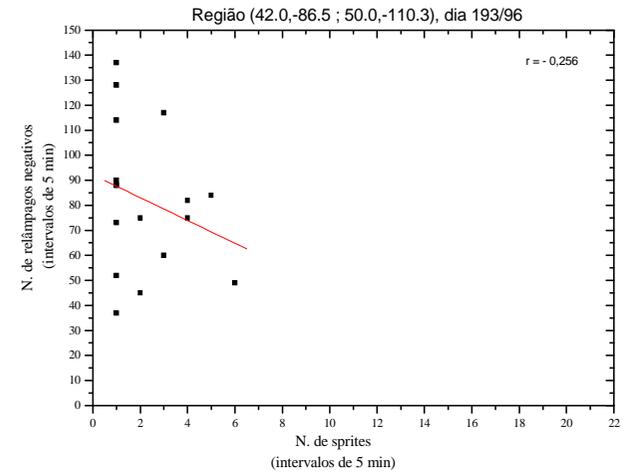


d)

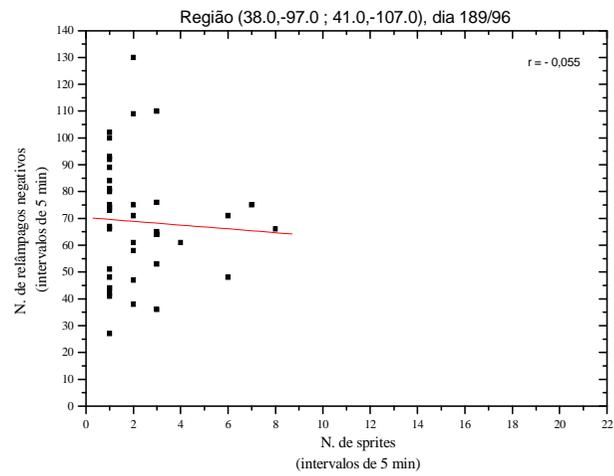
Figura 5.19 - Gráficos do Número de Relâmpagos Negativos de toda a tempestade, ocorridos em intervalos de 5 min, em função do Tempo, representado pelas curvas pretas, e do Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos, em função do Tempo, representado pelas curvas magentas. Dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.



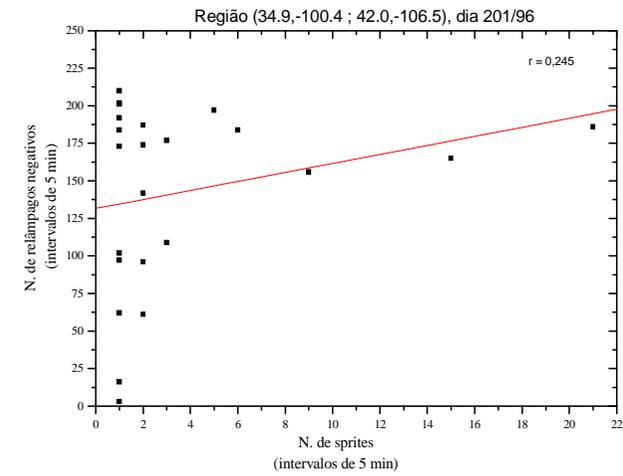
a)



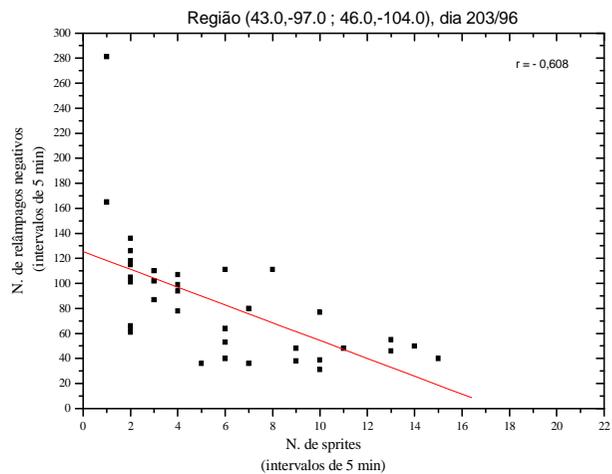
c)



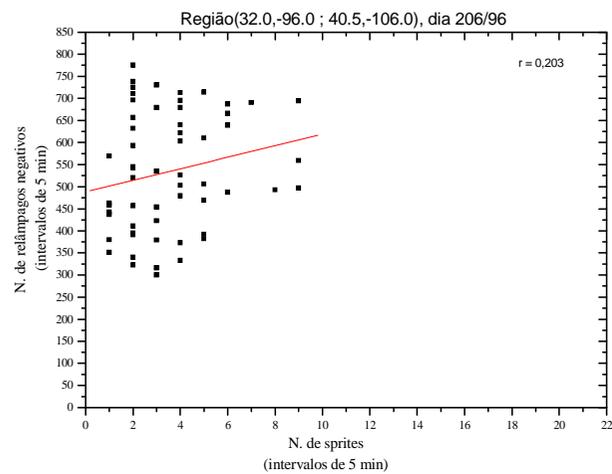
b)



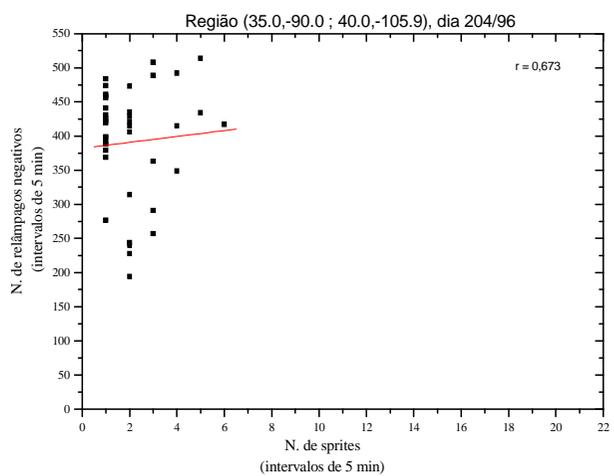
d)



e)

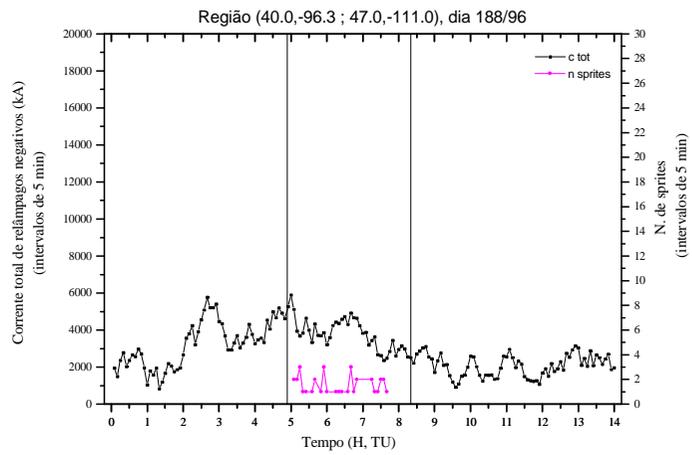


g)

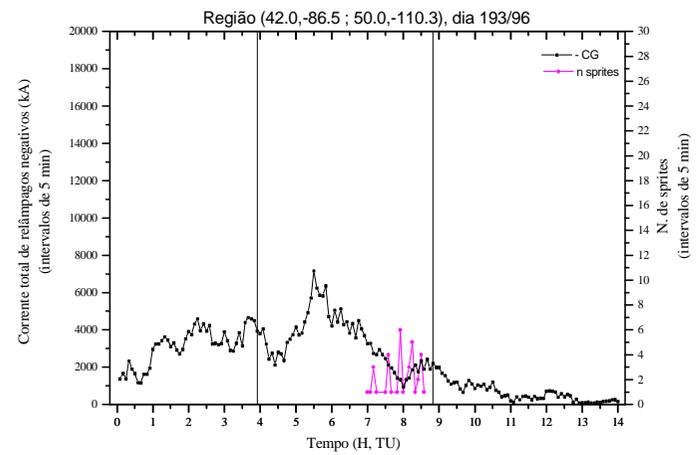


f)

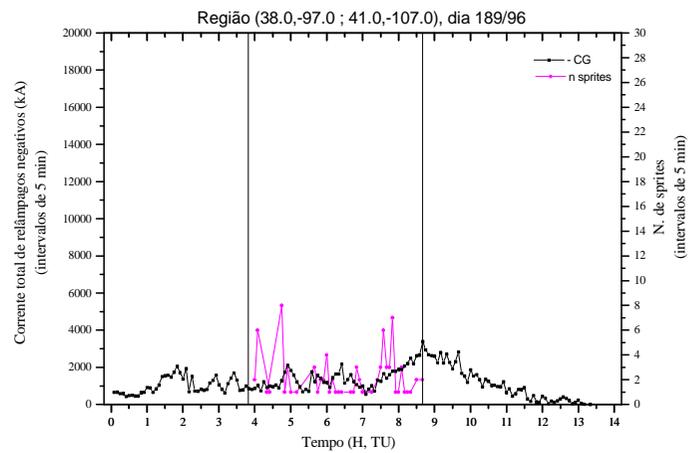
Figura 5.20 - Gráficos da Correlação entre o Número de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.



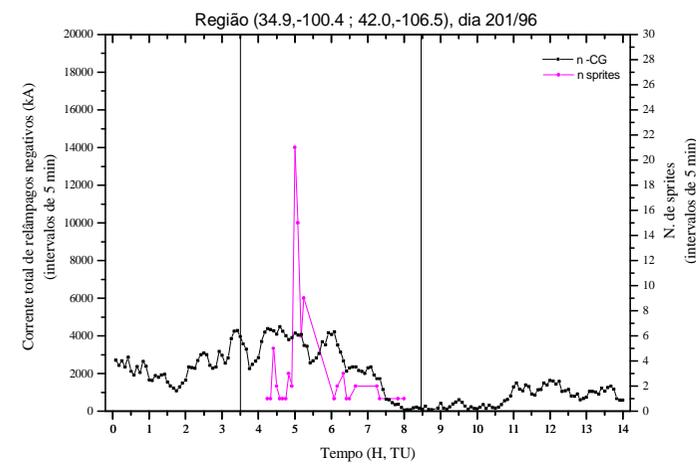
a)



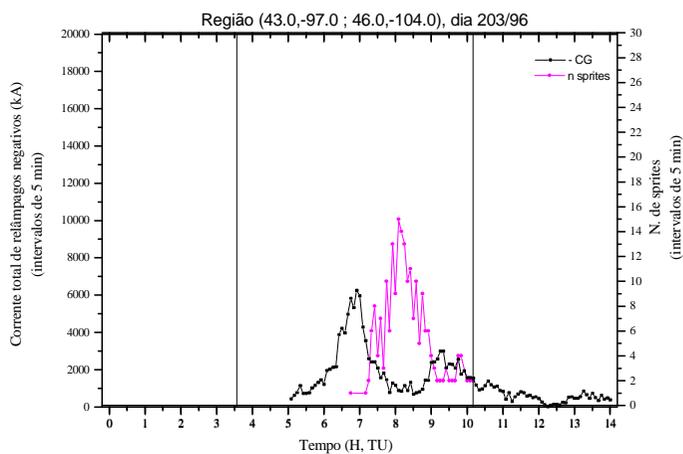
c)



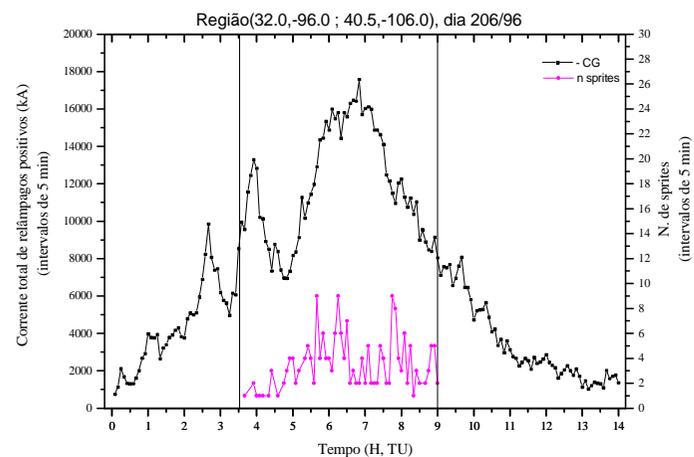
b)



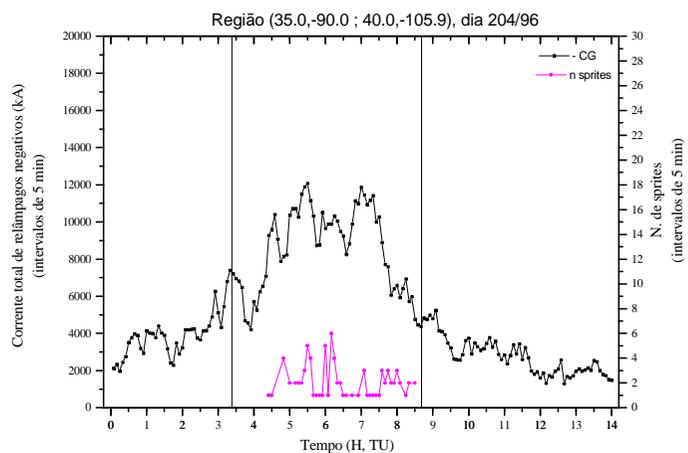
d)



e)

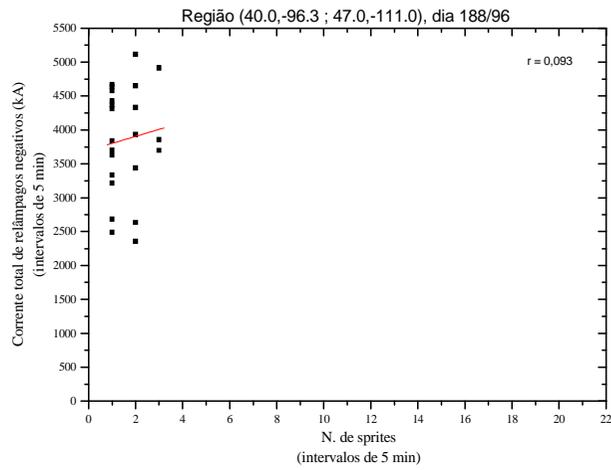


g)

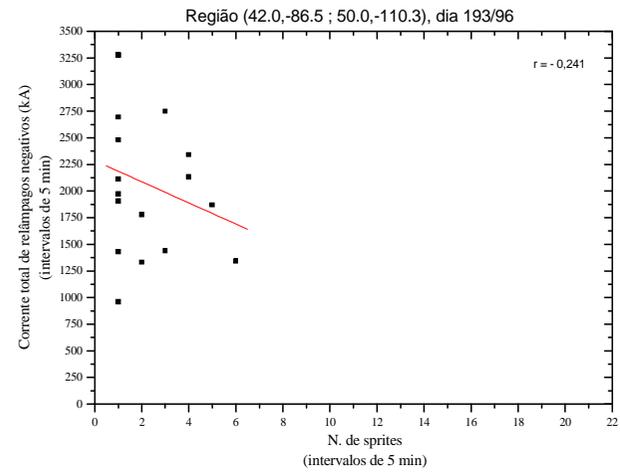


f)

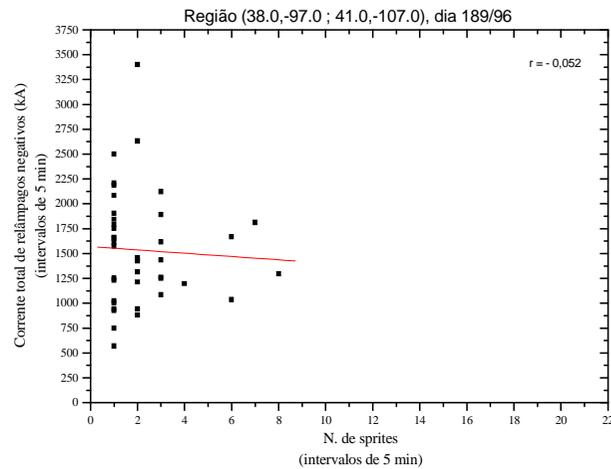
Figura 5.21 - Gráficos da Corrente Total dos Relâmpagos Negativos, em intervalos de 5 min, em função do Tempo, para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas pretas são a corrente total de todos os relâmpagos negativos, as magentas são o Número de Sprites ocorridos nos mesmos intervalos em função do Tempo, as retas pretas delimitam o período de observação.



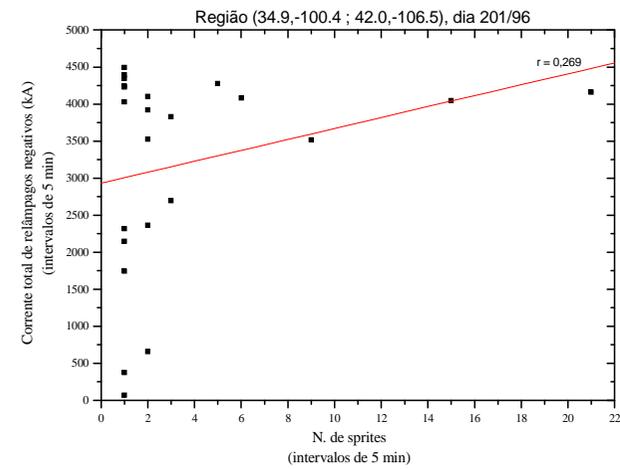
a)



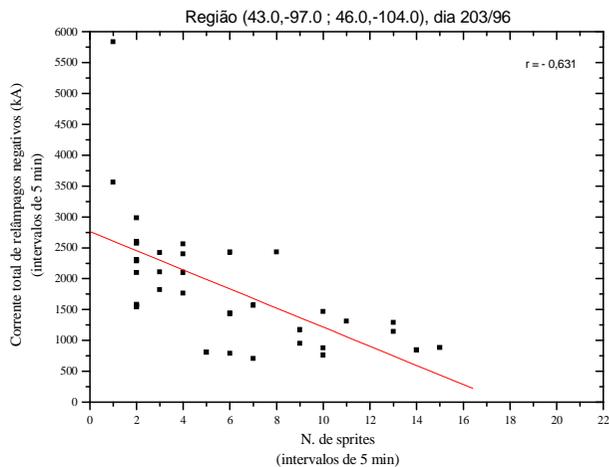
c)



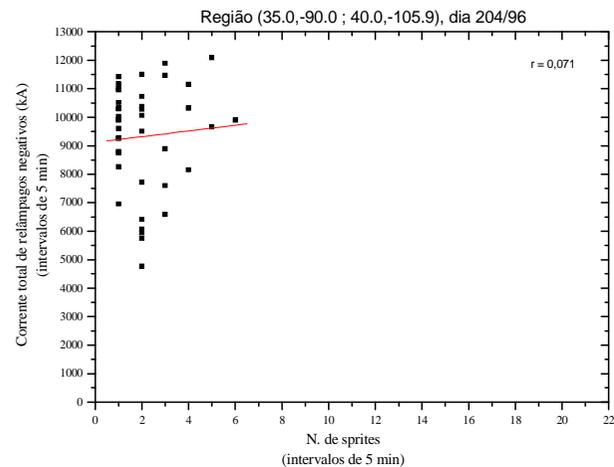
b)



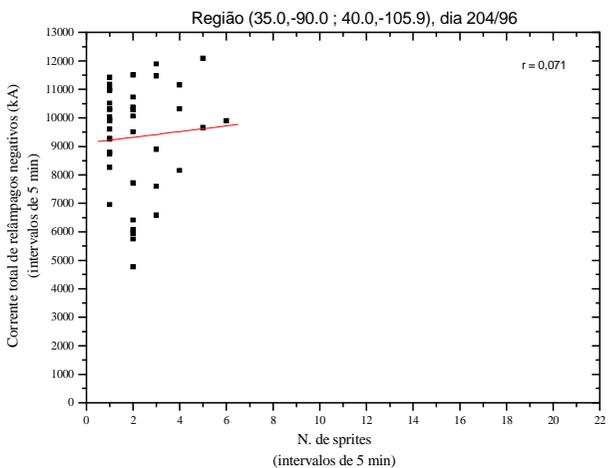
d)



e)



g)



f)

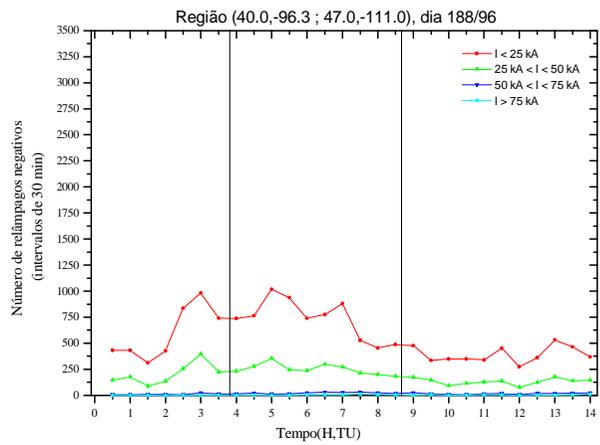
Figura 5.22 - Gráficos da Correlação entre a Corrente Total de Relâmpagos Negativos em intervalos de 5 min e Número de Sprites no mesmo intervalo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.

Tabela 5.4 - Coeficiente de correlação entre o nº de sprites e nº de relâmpagos negativos, e entre nº de Sprites e corrente total de relâmpagos negativos

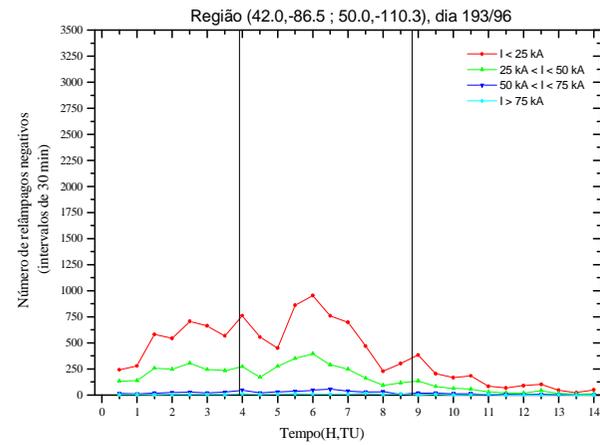
Dia	Nº sprites x Nº relâmpagos	Nº sprites x Corrente total
188	0,155	0,093
189	-0,055	-0,052
193	-0,256	-0,241
201	0,245	0,269
203	-0,608	-0,631
204	0,673	0,071
206	0,203	0,207

Na **Figura 5.23** pode-se observar a Distribuição Temporal do Número de Relâmpagos Negativos para faixas de intensidade de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min. As curvas vermelhas representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente menor que 25 kA, as curvas verdes representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 25 kA e menor que 50 kA, as curvas azuis representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 50 kA e menor que 75 kA e as curvas cian representam o número de relâmpagos com intensidade de corrente maior ou igual a 75 kA.

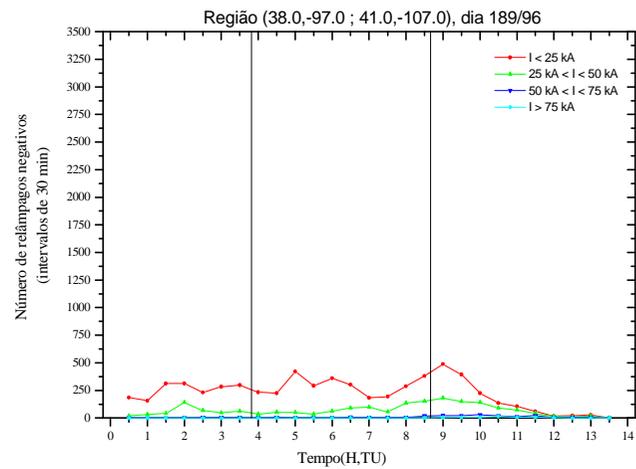
As curvas dos relâmpagos com intensidade de corrente menor que 25 kA (vermelha) e as dos relâmpagos com intensidade de corrente entre 25 e 50 kA de um modo geral apresentaram valores superiores aos das outras curvas na maior parte do intervalo de tempo analisado (0 às 14 h, TU), indicando que a grande maioria dos relâmpagos negativos possuía baixas correntes.



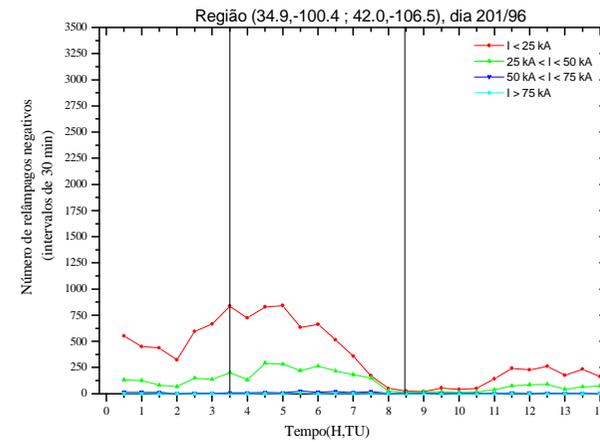
a)



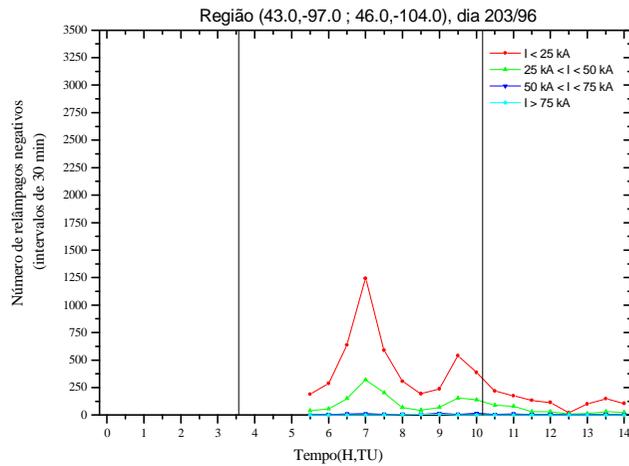
c)



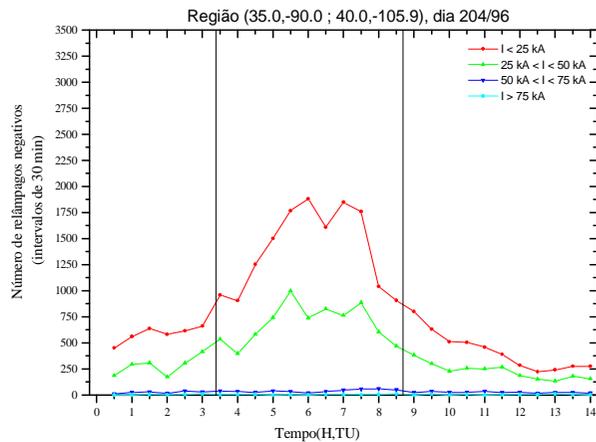
b)



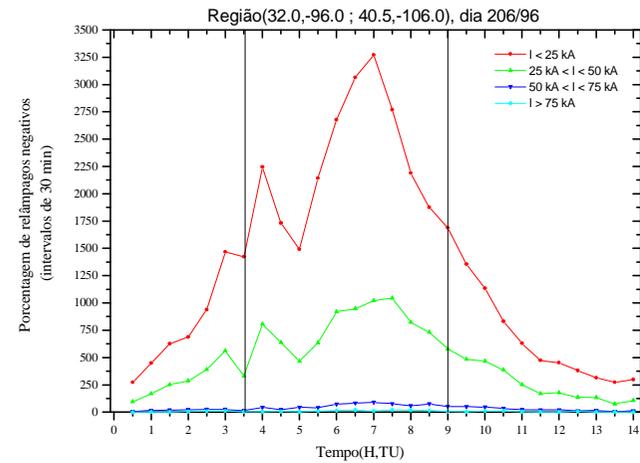
d)



e)



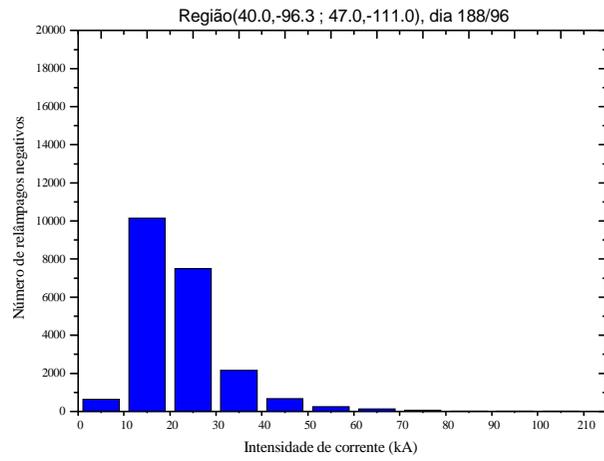
f)



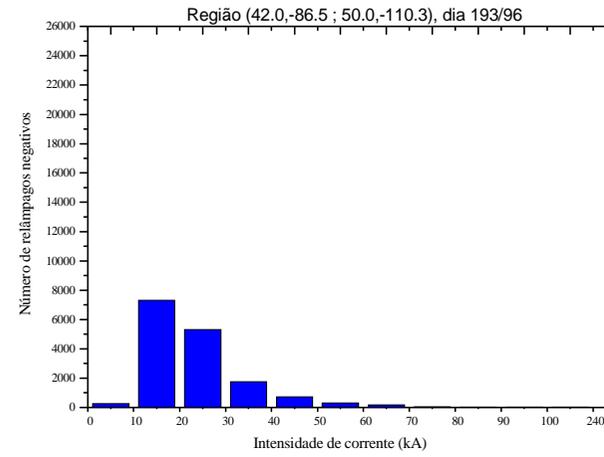
g)

Figura 5.23 - Distribuição Temporal do N^o de Relâmpagos Negativos para faixas de corrente de 25 kA, ocorridos em intervalos de 30 min, , para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente. As curvas vermelhas são o n^o de relâmpagos com $I < 25 \text{ kA}$, as verdes são o n^o de relâmpagos com $25 \text{ kA} \leq I < 50 \text{ kA}$, as azuis são o n^o de relâmpagos com $50 \text{ kA} \leq I < 75 \text{ kA}$ e as curvas cians são o n^o de relâmpagos com $I \geq 75 \text{ kA}$.

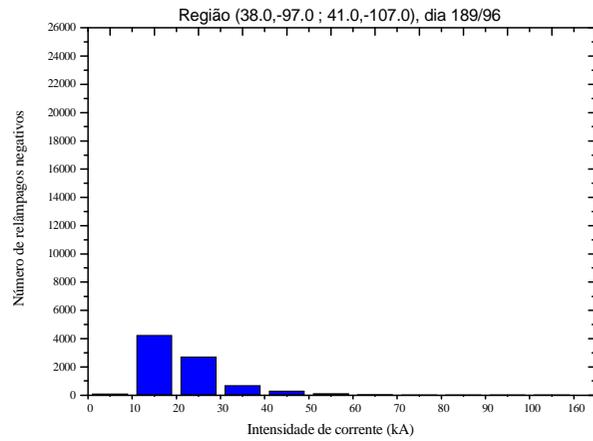
O Número e a Porcentagem de Relâmpagos Negativos em função da Corrente, em relação a todos os relâmpagos da tempestade (positivos e negativos) são apresentados nas Figuras 5.24 e 5.25 respectivamente. Esses gráficos mostram que para os relâmpagos negativos a população com correntes entre 10 e 30 kA predominou em todos os dias analisados.



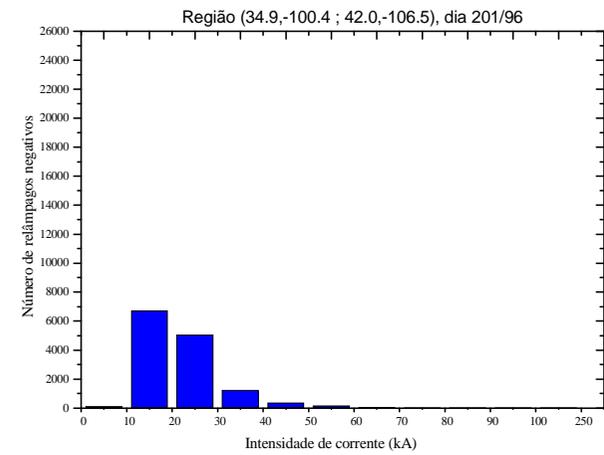
a)



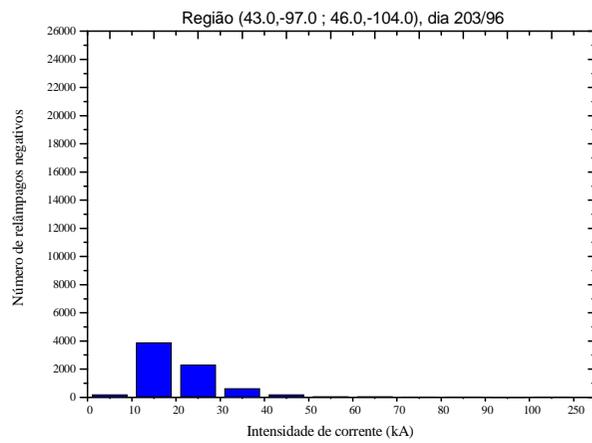
c)



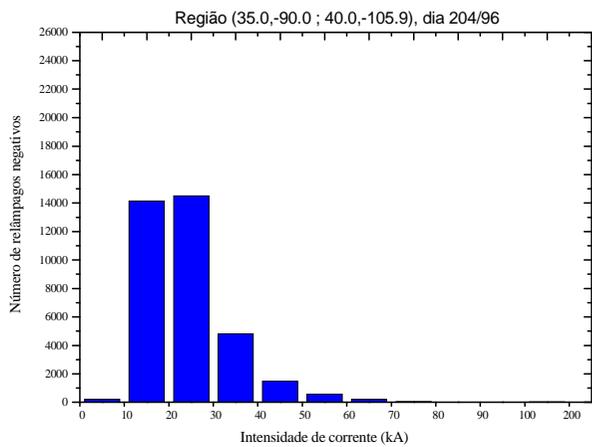
b)



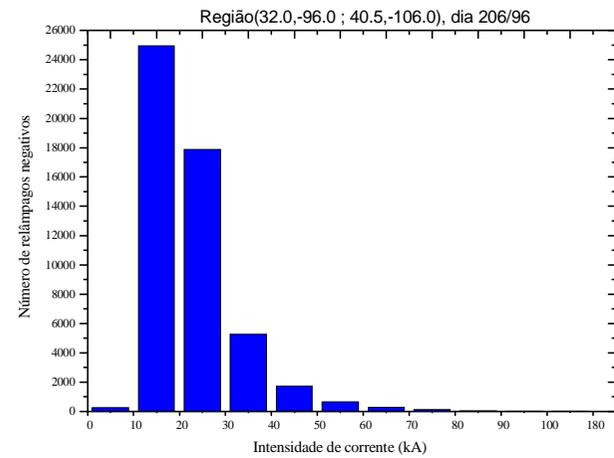
d)



e)

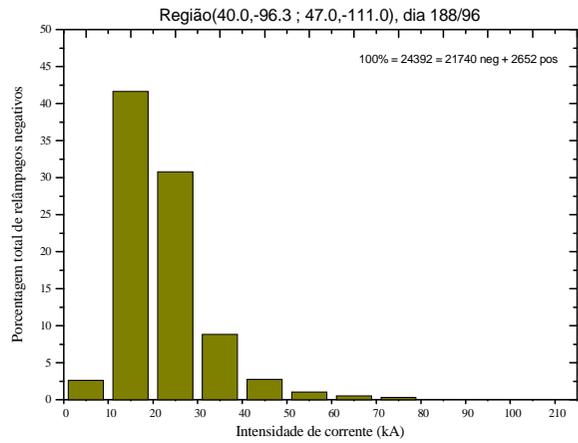


f)

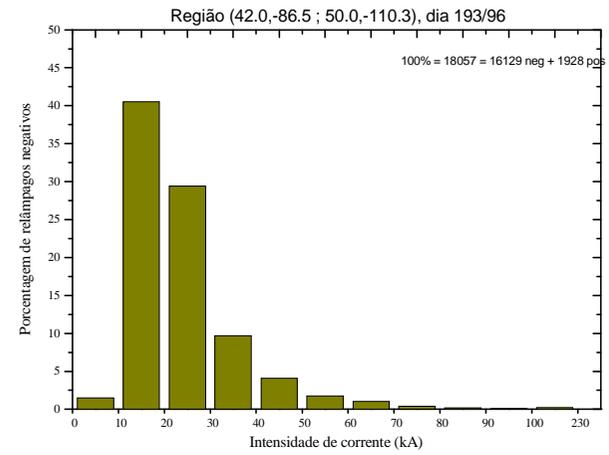


g)

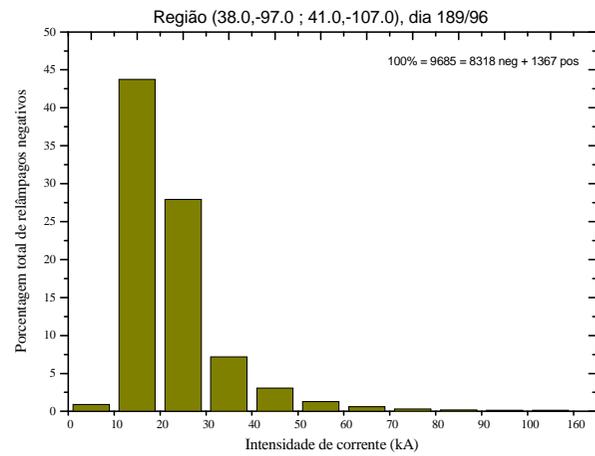
Figura 5.24 - Gráficos do Número de Relâmpagos Negativos em função do Tempo para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.



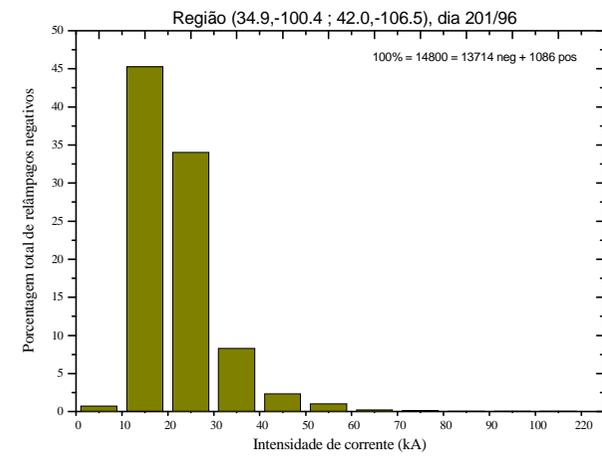
a)



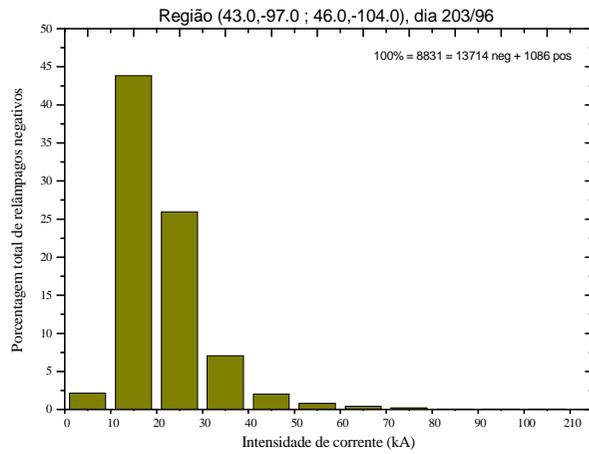
c)



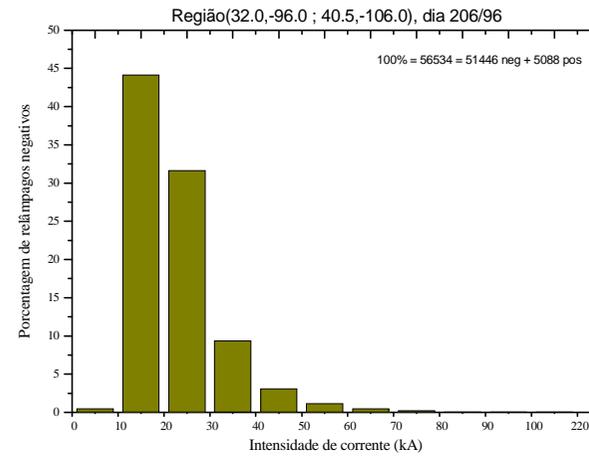
b)



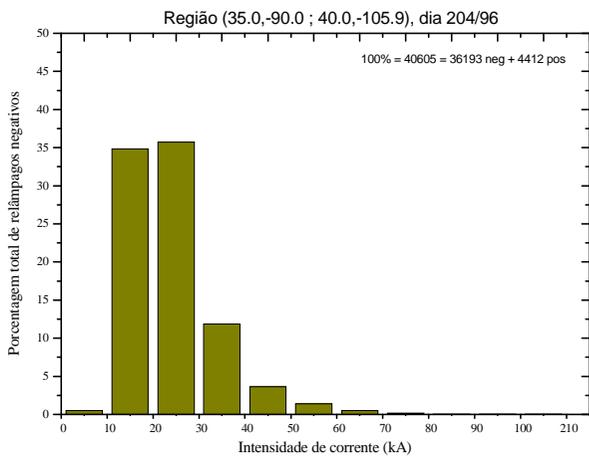
d)



e)



g)



f)

Figura. 5.25 - Gráficos Porcentagem de Relâmpagos Negativos em função da Corrente, em relação a todos os relâmpagos da tempestade (positivos e negativos) para os dias 188 (a), 189 (b), 193 (c), 201 (d), 203 (e), 204 (f), 206 (g) de 1996 respectivamente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a atividade elétrica de relâmpagos dos sete dias de maior incidência de sprites no Meio Oeste do Estado Unidos, dias 188, 189, 193, 201, 203, 204 e 206, documentados a partir de Yucca Ridge, Colorado no período de 4 a 29 de Julho de 1996 durante a Campanha Sprites96.

Constatou-se que a maioria dos sprites, 65% do total (sete dias), estava associada a relâmpagos positivos, confirmando os resultados de estudos anteriores (Lyons, 1996). Para 31% do total de sprites, associados a relâmpagos positivos, foi possível encontrar também uma associação com relâmpagos negativos, significando que apenas 34% de todos os sprites (65% - 31%) estava associado unicamente a relâmpagos positivos. Para 11% do total de sprites foi encontrada uma associação unicamente com relâmpagos negativos (não estavam associados a relâmpagos positivos), restando 24% de sprites que não foram associados a relâmpagos de nenhuma das duas polaridades.

Até o momento, considera-se na literatura que os sprites estejam associados a relâmpagos positivos, nenhuma associação de sprites com relâmpagos negativos foi feita até então. Neste estudo porém, para 11% dos sprites foram encontrados relâmpagos negativos aos quais eles poderiam estar associados, sem terem sido encontrados os correspondentes positivos. Esses sprites, juntamente com os 24% que não foram associados a nenhum relâmpago (positivo ou negativo), poderiam estar associados a relâmpagos positivos que não tenham sido detectados pela NLDN, significando que talvez:

- 1- A NLDN tenha uma eficiência da detecção de relâmpagos regional menor que a global, estimada em 80 a 90% (Cumins et al, 1998), possivelmente devido as diferentes configurações de sensores existentes nas diferentes regiões do país.

Ou que:

- 2- A eficiência na detecção de relâmpagos positivos seja menor do que a de negativos, possivelmente devido ao fato de os relâmpagos negativos e positivos possuírem diferentes características físicas e os mesmos critérios na detecção serem utilizados indistintamente para ambos.

Ou ainda que:

- 3- A NLDN tenha uma eficiência de detecção global empírica menor que a estimada.

Considerando-se que sprites estejam de fato associados a relâmpagos negativos, é possível que esses relâmpagos possuam alguma propriedade física não analisada ou não mensurável pela NLDN que seja fundamental para relâmpagos negativos darem origem a sprites, como por exemplo multiplicidade alta, ou corrente contínua.

A existência de 35% de sprites para os quais não foram encontrados relâmpagos positivos associados (considerados também os que foram associados unicamente a relâmpagos negativos) também pode ser um indício de que os sprites sejam resultado de um processo mais complexo do que o relacionado a um único relâmpago, seja ele negativo ou positivo.

Observou-se que, em todos os dias analisados, a média da intensidade da corrente dos relâmpagos positivos associados a sprites foi maior que a média da intensidade da corrente de todos os relâmpagos positivos das tempestades. A maioria dos sprites ocorreu em associação com relâmpagos positivos com altas e médias correntes, mas vários sprites, aproximadamente 6%, ocorreram associados a relâmpagos positivos com correntes muito baixas, abaixo de 20 kA, indicando que sprites podem ocorrer, e ocorrem, associados a relâmpagos positivos com quaisquer intensidades de corrente.

No total dos sete dias analisados, ocorreram mais sprites associados a relâmpagos positivos com correntes em torno 40 e 50 kA do que associados a relâmpagos positivos em outras faixas de corrente, sendo que a maioria dos relâmpagos positivos das tempestades possuía correntes em torno de 10 a 20 kA. Os relâmpagos negativos associados a sprites não exibiram esse mesmo comportamento: ocorreram mais sprites associados a relâmpagos negativos com correntes em torno 10 e 20 kA e relâmpagos nessa faixa de corrente foram os que mais ocorreram nas tempestades. Esses fatos sugerem a existência de algum mecanismo que faz com que ocorram mais sprites associados a relâmpagos positivos com correntes entre 40 e 50 kA e reforçam a idéia de que se sprites também podem estar associados a relâmpagos negativos, esses devem possuir alguma característica específica comum ainda não observada, uma vez que possuem baixas correntes.

A explicação do mecanismo de ocorrência sprites mais aceito, baseia-se na carga total destruída quanto maior a carga destruída pelo relâmpago (positivo) maior a probabilidade de ocorrer o sprite (Pasko et al., 1997). A princípio relâmpagos com correntes maiores destroem uma maior quantidade de carga e relâmpagos com correntes menores destroem uma menor quantidade de carga; a menos que, por exemplo, apresentem corrente contínua.

Ao contrário do esperado, sprites ocorreram acima de tempestades com diferentes porcentagens de relâmpagos positivos, indicando que a ocorrência de uma grande quantidade de relâmpagos positivos não é condição indispensável para a ocorrência de sprites.

De um modo geral, nos sete dias analisados, os sprites ocorreram em períodos durante os quais foram mantidas altas taxas de ocorrência de relâmpagos positivos e negativos. Esse fato é uma evidência contrária a hipótese de Nelson (1997), que num estudo do dia 206, também analisado neste trabalho, sugeriu que a taxa ocorrência de sprites cresce com o decréscimo da taxa de ocorrência de relâmpagos total (positivo + negativo).

Neste trabalho não foi encontrada nenhuma relação linear conclusiva entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência de relâmpagos, positivos e/ou negativos de toda a tempestade. Foram analisadas as correlações entre a taxa de ocorrência de sprites e a taxa de ocorrência de relâmpagos, positivos e negativos de toda a tempestade, e entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total de relâmpagos positivos e negativos de toda a tempestade.

A existência de uma correlação entre a taxa de ocorrência de sprites e a corrente total dos relâmpagos indicaria a existência de um efeito cumulativo que explicaria a ocorrência de sprites associados a relâmpagos positivos com baixa corrente, e a ocorrência de sprites não associados a relâmpagos positivos. Esse efeito cumulativo não foi observado no que tange as tempestades como um todo para os dias analisados, entretanto, esse fato não exclui a possibilidade de haver um efeito cumulativo para os relâmpagos da região de ocorrência de sprites, que se concentram em uma pequena região da tempestade (LYONS, 1996).

Dentre os dias analisados o dia 203 é o único no qual se acredita tenha sido documentado o início do período de ocorrência de sprites. Nesse dia as observações começaram antes do período de ocorrência de relâmpagos da tempestade. O início da produção de sprites coincidiu com um período de crescimento constante do número de relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente e de crescimento da corrente total de relâmpagos positivos. Aproximadamente 1 h após o início da atividade de sprites máximo número de relâmpagos positivos com alta corrente e o máximo valor da corrente total foram atingidos, e 1 h após isso ocorreu o máximo número de sprites do período de observação desse dia. Devido ao fato de na maioria dos dias os sprites começarem a ser registrados pouco tempo depois do início das observações, de a corrente total atingir seu valor máximo antes do início das observações e de que no único dia em que se acredita ter sido documentado o início da ocorrência de sprites parecer haver uma relação entre o início da atividade de sprites e um crescimento da atividade de relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente e da corrente total sugere-se que os sprites começam a ocorrer quando há um crescimento da atividade de

relâmpagos positivos com alta intensidade de corrente resultando no crescimento da corrente total de relâmpagos positivos da tempestade.

Sugere-se para trabalhos futuros a investigação da existência de um efeito cumulativo na corrente total de relâmpagos positivos e negativos em uma região limitada centrada na região de ocorrência de sprites. Sugere-se também a análise dos sistemas meteorológicos sobre os quais os sprites ocorreram, o estudo da multiplicidade dos relâmpagos relacionados ao fenômeno sprite e a realização de uma análise comparativa entre os tipos de sprites produzidos e os relâmpagos aos quais eles foram associados. Finalmente sugere-se a ampliação deste estudo para um conjunto maior de dados e para sprites futuramente documentados no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMSTRONG, R. A.; SHORTER, J. A.; TAYLOR, M. J.; SUSZCYNKY, D. M.; LYONS, W. A.; JEONG, L. S. Photometric measurements in the Sprites'95 & '96 campaign of nitrogen second positive (399.8 nm) and first negative (427.8 nm) emissions. **J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.**, v. 60, n.7-9, p.787-893, May-June, 1998.

ASHMORE, S.E. Unusual lightning. **Weather**, v. 5, n. 1, p. 331, Jan. 1950.

BOECK, W.L.; VAUGHAN, O. H. JR.; BLAKESLEE, R. Low light Level TV Images of terrestrial lightning as viewed from space. **EOS, Trans. AGU**, 72, P21C-1, p. 171, 1991.

BOECK, W.L.; VAUGHAN, O. H. JR.; BLAKESLEE, R.; VONEGUT, B.; BROOK, M. The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves. **J. Atmos. and Solar-Terr. Physics**, v. 60, n. 7-9, p. 669-677, May-June, 1998.

Disponível em:

< http://thunder.msfc.nasa.gov/Obs_ligh_space.html > Acesso em: 12 fev. 1998

BOECK, W.L.; VAUGHAN, O. H. JR.; BLAKESLEE, R.; VONEGUT, B.; BROOK, M. Lightning induced brightening in the airglow layer. **Geophys. Res. Letters**, v. 19, n. 2, p. 99-102, Jan. 1992.

BOECK, W.L.; VAUGHAN, O. H. JR.; BLAKESLEE, R.; VONEGUT, B.; BROOK, M.; MCKUE, J. M. Observations of lightning in the stratosphere. **J. Geophys. Res.**, v.100, n. D1, p.1465-1475, Jan. 1995.

CHAGNON, S. A. Temporal and spatial relations between hail and lightning. **J. Appl. Met.**, v. 31, n. 6, p. 587-604, June. 1992.

CONFORTE, J. C. **Um estudo de complexos convectivos de mesoescala sobre a América do Sul e vizinhanças**. 1997. 138 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J., BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, A. E. A combined TOA/MDF technology upgrade of U.S. National Lightning Detection Network. **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. D8, p. 9035-9044, Apr. 1998.

EVERETT, W. H. Rocket lightning. **Nature**, v. 68, p.599, 1903.

FARIA, H. H. **Estudo das características dos relâmpagos nuvem-solo durante dias de grande atividade no estado de Minas Gerais nos anos de 1992 a 1994**. 1998. 132 p. (INPE-7522-TDI/731). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/07.01.14.38> . Acesso em: 13 out.

FRANZ, R. C.; NEMZEK, R. J.; WINCKLER, J. R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. **Science**, v. 249, p. 48-51, July, 1990.

FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; KUBOTA, M.; SAKANOI, K.; INAN, U. S.; LYONS, W. A. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. **Geophys. Res. Letters**, v. 23, n. 16, p. 2157-2160, Agosto 1996.

GLOBAL ATMOSPHERICS, INC. **Introduction to lightning detection**. Available at: <http://www.gds.com/intro/index.html> . Accessed: 19 maio 1997.

HAMPTON, D.L.; HEAVNER, M. J.; WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D. Optical spectral characteristics of sprites. **Geophys. Res. Letters**, v. 23, n. 1, p. 89-92, Jan. 1996.

INAN, U. S.; BARRINGTON-LEIGH, C.; HANSEN, S.; GLUKHOV, V. S.; BELL, T. F.; RAIRDEN, R. Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as 'elves'. **Geophys. Res. Letters**, v. 24, n. 5, p. 583-586, Março 1997.

INAN, U. S.; BELL, T. F.; RODRIGUEZ, J. V. Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning. **Geophys. Res. Letters**, v. 18, n. 4, p. 705-708, Apr., 1991.

INAN, U.S. VLF heating of the lower ionosphere. **Geophys. Res. Letters**, v. 17, n. 6, p. 729-732, May, 1990.

LYONS, W. A. Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video. **Geophys. Res. Letters**, v. 21, n. 10, p. 875-878, May, 1994.

LYONS, W. A. Sprite observations above the U.S. high plains in relation to their parent thunderstorm systems. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. D23, p. 29641-29652, Dez. 1996.

LYONS, W. A. Sprites, Elves, and Blue Jets, **Weatherwise**, v. , n. , p. 19-23, Aug./Sept. 1997.

LYONS, W. A. Sprites, Elves, and Blue Jets. **Weatherwise**, v. 50, n.4, p. 19-23, Aug./Sept. 1997. Available at:< <http://www.heldref.org/ww/97aslyons.html> > Accessed: 13 Feb. 1998.

MACKENZIE, T.; TOYNBEE, H. Meteorological phenomena. **Nature**, v. 33, p. 245, Jan. 1886.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 61, n. 11, p. 1374-1387, Nov. 1980.

MENDE, S. B.; RAIRDEN, R. L.; SWENSON, G. R.; LYONS, W. A. Sprite spectra: N₂ first positive band identification. **Geophys. Res. Letters**, v. 22, n. 19, p. 2633-2636, Oct. 1995.

NASA/MSFC **Lightning detection from space**. Available at: <http://thunder.msfc.nasa.gov/primer.html> Accessed: 13 Feb. 1998.

NATIONAL GEOGRAPHIC **Different strokes**. Available at: <http://www.nationalgeographic.com/features/96/lightning/3b.html> Accessed: 11 May 1998.

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL T. F. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. A3, p. 4529-4561, Mar. 1997.

PINTO JR. O.; PINTO, I. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Editora brasiliense, 1996.

RAIRDEN, R. L.; MENDE, S. B. Time resolved sprite imagery. **Geophys. Res. Letters**, v. 22, n. 24, p. 3465-3468, Dec. 1995.

RAY, P. S. **Mesoscale meteorology and forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986.

ABA, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. 1997. 180 p. (INPE-6675-TDI/625). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1997.

SENTMAN, D. D. **Red sprites and blue jets**. Available at: <<http://elf.gi.alaska.edu>>. Accessed: May 1998.

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M. Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. **Geophys. Res. Letters**, v. 20, n. 24, p. 2857-2860, Dez. 1993.

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites. **Geophys. Res. Letters**, v. 22, n. 10, p. 1205-1208, Maio 1995a.

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; OSBORNE, D. L.; HEAVNER, M. J.; HAMPTON, D. L. The Peru95 Sprites Campaign: Overview. **EOS Trans. AGU**, S66, A32A-6, May, 1995b.

SENTMAN, D.; WESCOTT, E. M. Red sprites and blue jets, **Geophysical Institute Video production**. Fairbanks, AK: University of Alaska, July, 1994.

TARANENKO, Y.N.; INAN, U. S.; BELL, T. F. The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: excitation of optical emissions. **Geophys. Res. Letters**, v. 20, n. 23, p. 2675-2678, Dez. 1993.

VAUGHAN, O. H. JR.; BLAKESLEE, R.; BOECK, W. L.; VONNEGUT, B.; BROOK, M.; MCKUNE, J. JR. A cloud-to-space lightning as recorded by the Space Shuttle payload bay TV cameras. **Mon. Wea. Rev.**, v. 120, n.7, p. 1459-1461, July, 1992.

VAUGHAN, O.H. JR., VONNEGUT, B. Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the air above. **J. Geophys. Res.**, v. 94, n. D11, p. 13179-13182, Sept., 1989.

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Blue starters: brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm. . **Geophys. Res. Letters**, v. 23, n. 16, p. 2153-2156, Agos. 1996.

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; OSBORNE, D.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites 94 aircraft campaign: 2. Blue jets. **Geophys. Res. Letters**, v. 22, n. 10, p. 1209-1212, May, 1995a.

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; OSBORNE, D.; HEAVNER, M. J.; HAMPTON, D. L. The Peru95 Sprites Campaign: Aircraft video observations of equatorial sprites. **EOS Trans. AGU**, S66, A32A-7, May, 1995b.

WINCKLER, J. R. Further observations of cloud-ionosphere electrical discharge above thunderstorms. **J. Geophys. Res.**, v. 100, n. D7, p. 14335-14345, July 1995.

WINCKLER, J. R.; LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; NEMZEK, R. J. New high-resolution ground based studies of sprites. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. D3, p. 6997-7004, Mar. 1996.