



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/01.14.12.18-TDI

CARACTERIZAÇÃO DE TEMPESTADES PRODUTORAS DE SPRITES NA AMÉRICA DO SUL

Rodrigo da Rosa Azambuja

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Fernanda de São Sabbas Tavares, e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 06 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DCL6Q2>>

INPE
São José dos Campos
2013

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:**

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

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

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/01.14.12.18-TDI

CARACTERIZAÇÃO DE TEMPESTADES PRODUTORAS DE SPRITES NA AMÉRICA DO SUL

Rodrigo da Rosa Azambuja

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Fernanda de São Sabbas Tavares, e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 06 de fevereiro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DCL6Q2>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Az13c Azambuja, Rodrigo da Rosa.
Caracterização de tempestades produtoras de sprites na América do Sul / Rodrigo da Rosa Azambuja. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxvi + 121 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/01.14.12.18-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Fernanda de São Sabbas Tavares, e Luiz Augusto Toledo Machado.

1. Sprites 2. relâmpagos 3. sistemas convectivos.. I.Título.

CDU 551.594

Copyright © 2013 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 © 2013 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.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Luiz Augusto Toledo Machado



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



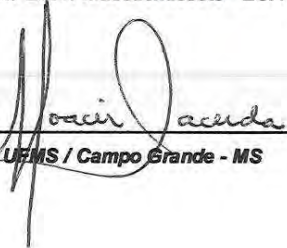
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Earle Williams



convidado(a) / MIT/ EUA / Massachussets - EUA

Dr. Moacir Lacerda



Convidado(a) / UFMS / Campo Grande - MS

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Rodrigo da Rosa Azambuja**

São José dos Campos, 06 de Fevereiro de 2013

"O que sabemos é uma gota e o que ignoramos é um oceano."

Isaac Newton

"A vida não é o problema, é batalha, desafio; cada obstáculo é uma lição..."

Mano Brown

Aos meus pais Adolfo e Regina e meus irmãos Vânia e Rafael.

AGRADECIMENTOS

À minha família, que, além de ser meu acalanto, sempre me ajudaram no que fosse preciso para a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares e Dr. Luiz Augusto Toledo Machado, pelas várias horas dispendidas para auxiliar no entendimento das questões relativas ao assunto abordado neste trabalho. Sem esse auxílio e dedicação, este trabalho não seria possível.

Ao corpo docente da pós-graduação em Geofísica Espacial, pelas aulas ministradas, que formaram as bases para o desenvolvimento do trabalho.

Aos demais amigos e colegas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq e à CAPES, pela bolsa de estudos e auxílio financeiro para a realização do trabalho.

RESUMO

A relação entre as propriedades físicas e atividade elétrica de seis Sistemas Convectivos (SCs) que produziram sprites na América do Sul foi analisada utilizando a localização e horário de ocorrência dos sprites, dados de temperatura de topo de nuvem nos canais infravermelho (IR) e vapor d'água (WV) do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) 10 e 12, e dados de descargas elétricas da RINDAT e WWLLN. Um total de 506 sprites foi observado e 12% dos eventos teve um relâmpago Nuvem-Solo (NS) gerador identificado, sendo a maioria, ~95%, de NS positivos (NS+). Para caracterizar os SCs foram analisadas: a área total dos sistemas, área de topos frios, fração convectiva (FC), temperatura média (T_{med}) e taxa de ocorrência de relâmpagos NS. A área dos SCs foi calculada adotando um limiar de temperatura de $T \leq -38^{\circ} \text{C}$ e as células convectivas imersas foram associadas a topos frios com em $T \leq -63^{\circ} \text{C}$, exceto para a tempestade de fevereiro de 2006, que era $\sim 8^{\circ} \text{C}$ mais “quente” que as demais e para a qual foi adotado o limiar $T \leq -54^{\circ} \text{C}$. Os relâmpagos NS geradores de sprites eram relâmpagos NS+ que ocorreram preferencialmente na região de precipitação estratiforme dos SCs. Em função disso foi proposto um modelo conceitual para as características de um sistema convectivo favorável à ocorrência de sprites. Nesse modelo, a geração de sprites é mais propícia durante o período de decréscimo da FC, após ela ter atingido seu máximo, e consequente durante o aumento da T_{med} , independentemente do que acontece com a área total do sistema, que pode estar aumentando, diminuindo ou estável. O modelo também prevê nessa fase um aumento da taxa de ocorrência de NS+, superando a de NS-, devido à dissipação das células convectivas que alimentam região estratiforme com água e gelo predominantemente eletrificados com carga positiva, condição fundamental para a ocorrência dos NS+ geradores de sprites. Em 3 casos analisados essas características foram observadas após o SC atingir grandes áreas e alta atividade de relâmpagos NS. Um dos sistemas produziu um único sprite em apenas 2,5h após seu início, tempo curto em relação a média de ~ 10 h nos outros casos estudados e de 3-8 h relatados na literatura. Com uma área máxima de 6.000 km^2 , duas ordens de magnitude menor que a área média dos sistemas estudados, $\sim 260.000 \text{ km}^2$, comparável à área dos sistemas convectivos produtores de sprites na Europa e Japão, foi o menor sistema produtor de sprites já observado na América do Sul, tendo ocorrido na região do norte da Argentina, que tem características sinóticas semelhantes ao planalto central Norte Americano, potencializadoras de grandes sistemas de mesoescala. Nos demais casos, as características propostas no modelo não puderam ser observadas possivelmente devido a: (1) o grande número de

núcleos convectivos com diferentes ciclos de vida imersos na área do SC; (2) a união do SC a outros sistemas convectivos. Embora todos os sprites tenham ocorrido sobre regiões de dissipação de áreas convectivas, essas regiões tinham uma diferença de temperatura no canal de vapor d'água com infravermelho ($\Delta T = T_{WV} - T_{IR}$) maior que -15°C , o que indica que essas nuvens eram penetrativas, i.e., com alto conteúdo de gelo, potencialmente um “reservatório” de cargas positivas.

CHARACTERIZATION OF SPRITE PRODUCING THUNDERSTORMS IN SOUTH AMERICA

ABSTRACT

The relationship between physical properties and electrical activity of six convective systems (CSs) that produce sprites in South America was analyzed using the location and time of occurrence of sprites, cloud top temperature in the infrared (IR) and water vapor (WV) channels of the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) 10 and 12, and electrical discharge data from RINDAT and WWLLN. A total of 506 sprites was observed, and 12% of the events had a parent cloud-to-ground (CG) lightning identified, the majority being positive CGs (+CGs), ~95%. To characterize the CSs the following parameters were analyzed: the total area of the systems, area of the tops cold, convective fraction (CF), mean temperature (T_{med}) and rate of occurrence of CG lightning. The CS areas were calculated by adopting a threshold temperature of $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ and for the areas of the convective cells immersed in the system at the adopted threshold was $T \leq -63^{\circ}\text{C}$, except for the storm of February 2006, which was $\sim 8^{\circ}\text{C}$ warmer than the others and for which the adopted threshold was $T \leq -54^{\circ}\text{C}$. The sprite parent CG lightning were CG+ that occurred preferentially in the region of stratiform precipitation. Due to that, a conceptual model for the characteristics of a convective systems favorable to the occurrence of sprites was proposed. In this model, sprite generation is favored during the decrease in CF, after it reached its maximum and consequent increase of T_{med} , regardless of the total area of the system, which may be increasing, decreasing, or stable. The model also predicts that in this phase there is also an increase in the rate of occurrence of +CGs, exceeding the -CG rate, due to the dissipation of the convective region, which feeds the stratiform region with predominantly positively charged water and ice basic condition for occurrence of sprite generating +CGs. These characteristics were observed after the CS reach large areas and high CG lightning activity in 3 cases analyzed. One of the systems produced a single sprite only 2.5 h after its onset, a short time compared to the average of ~ 10 h for the other cases studied, and 3-8 h reported in the literature. With a maximum area of $6,000 \text{ km}^2$, two orders of magnitude smaller than the average size of the systems studied, $\sim 260,000 \text{ km}^2$, the size of this system was comparable to the area of convective systems producing sprites in Europe and Japan. It was the lowest sprite producing system ever observed in America South, occurring in the northern region of Argentina, which has similar synoptic characteristics to the North

American high plains, which provide for large mesoscale systems. In other cases, the characteristics proposed in the conceptual model could not be observed possibly due to: (1) the large number of convective cells with different life cycles immersed in the CS area, (2) the merge of the CS with other convective systems. Although all sprites have occurred over regions of convective dissipation, these areas had a temperature difference between the water vapor and infrared ($\Delta T = T_{WV} - T_{IR}$) greater than -15°C , indicating that these clouds were penetrative, with high ice content, potentially a "reservoir" of positive charges.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Principais Eventos Luminosos Transientes (ELTs) Sprites, Halos, Elves, Jatos.....	1
Figura 1.2 – Imagem da primeira observação de Sprites (a) e uma das primeiras imagens coloridas (b).....	3
Figura 1.3 – Distribuição global de relâmpagos entre 1995 (Abril) e 2003 (Fevereiro) de observações do NASA OTD e LIS.....	4
Figura 1.4 – Densidade de ocorrência de ELTs (a) sprites e jatos gigantes (jatos gigantes estão marcados por círculo vermelho); (b) elves; (c) halos entre Julho de 2004 e Dezembro de 2005.....	5
Figura 2.1 – Sprites observados sobre o Paraguai (03-04/03/2006), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES/INPE – São Martinho da Serra, RS.....	7
Figura 2.2 – Ilustração do modelo de geração de sprites proposto por Pasko [1997].....	8
Figura 2.3 – Imagens de halos observados sobre o estado de Nebraska (18/08/1999).....	10
Figura 2.4 – Sequência de imagens separadas temporalmente por 1ms, obtida em 18 de agosto de 1999.....	11
Figura 2.5 – Esquema da formação de elves.....	12
Figura 2.6 – (a) Imagem de um jato azul (b) Imagens de jatos gigantes.....	13
Figura 2.7 – Representação da geração de relâmpagos IN e NS, jatos azuis e jatos gigantes para uma tempestade com estrutura tripolar.....	14
Figura 3.1 – Imagens de exemplos de nuvens cumulusnimbus (a) nuvem isolada; (b) tempestade com atividade elétrica.....	17
Figura 3.2 – Estrutura elétrica tripolar de nuvens de tempestade.....	18
Figura 3.3 – Ilustração da separação de cargas devido à colisão entre partículas e a gravidade. A carga negativa nas partículas mais pesadas cria um dipolo positivo na nuvem.....	20
Figura 3.4 – Representação esquemática do mecanismo indutivo.....	20
Figura 3.5 – Representação esquemática do mecanismo convectivo.....	22

Figura 3.6 – Altura dos centros de carga em tempestades de verão na Flórida e Novo México, e de inverno no Japão, obtidas através de medidores de campo elétrico.....	23
Figura 3.7 – Microfísica da transferência de cargas entre grãos e cristais de gelo.....	24
Figura 4.1 – Exemplos de streamers positivos (esquerda) e negativos (direita). Distância (d) de 40mm e regime de pressão (p) de 100kPa aplicadas em diferentes tensões.....	26
Figura 4.2 – Tipos predominantes de relâmpagos em uma estrutura tripolar de carga na nuvem relâmpago IN, relâmpago NS- e descargas no ar.....	28
Figura 5.1 – Densidade de ocorrência de ELTs (a) sprites e jatos gigantes (jatos gigantes estão marcados por círculo vermelho); (b) elves; (c) halos entre Julho de 2004 e Dezembro de 2005.....	38
Figura 5.2 – Exemplo de um relâmpago aranha (spider lightning).....	34
Figura 5.3 – (a) Idealização de um mapa horizontal de refletividade de radar (b) dividido entre região convectiva e estratiforme.....	35
Figura 5.4 – Modelo conceitual da trajetória de precipitação e movimentos verticais médios de um SCM.....	36
Figura 5.5 – Modelo conceitual do ciclo de vida dos sistemas convectivos determinados a partir de medições de radar (a) fase de iniciação; (b) fase de maturação; (c) fase de enfraquecimento; (d) fase de dissipação.....	33
Figura 6.1 – Localização dos sprites observados analisados no trabalho em relação ao ano da campanha de observação 2005 (verde), 2006 (vermelho) e 2007 (azul).....	42
Figura 6.2 – Localização dos sensores da rede de detecção de relâmpagos RINDAT.....	45
Figura 6.3 – Uso da triangulação para o Método da Direção Magnética na determinação da Estimativa Ótima de localização do relâmpago.....	46
Figura 6.4 – Uso da intersecção hiperbólica para o Método do Tempo de Chegada para a localização do relâmpago.....	47
Figura 7.1 – Erro de localização do sprite assumindo que o seu topo esteja em 90 km de altitude.....	50
Figura 7.2 – Exemplo de um evento de sprite múltiplo, com três unidades de sprite, observado em 2007.....	51

Figura 7.3 – Representação esquemática do acompanhamento do sistema em situação de (a) continuidade, (b) divisão e (c) junção. As setas representam a evolução do sistema. As linhas tracejadas representam o sistema em um passo anterior no tempo de sua evolução e as linhas sólidas representam a evolução do sistema.....	53
Figura 8.1 – Sprite observados sobre os estados de Goiás e Mato Grosso (25-26/10/2005), durante campanha de observação de ELTs a partir do município de São João da Aliança, GO.....	57
Figura 8.2 – Diferentes sistemas convectivos onde foram observados sprites em 2005, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro. (a) 2300 SC1 (Região 1); (b) SC1 (Região 2); (c) SC2.....	58
Figura 8.3 – Deslocamento do sistema convectivo (SC1) sobre o qual foram observados 6 sprites.....	59
Figura 8.4 – Delimitados pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ (15min) ⁻¹	62
Figura 8.5 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min) ⁻¹	63
Figura 8.6 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 (SC1 – Região 1) com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.....	64
Figura 8.7 - Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 (SC1 – Região 2) com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.....	65
Figura 8.8 – Deslocamento do sistema convectivo (SC2) sobre o qual foram observados sprites.....	66
Figura 8.9 – Delimitados pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ (15min) ⁻¹	68
Figura 8.10 – Densidade de relâmpagos ($10^{-4} /\text{km}^2$), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min) ⁻¹ no tempo, 3 horas antes e depois do primeiro sprite observado.....	69

Figura 8.11 – Imagens no canal IR do GOES com o SC2 onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.....	70
Figura 8.12 – Relâmpagos selecionados com um atraso de 500 ms em relação ao sprite, comparados com a distância horizontal da localização estimada dos sprites (gráfico superior) e o pico de corrente dos relâmpagos (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores pelo atraso de 100 ms numa distância máxima de 200 km. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.....	71
Figura 8.13 – Sprites observados sobre a Argentina (22-23/02/2006), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES.....	72
Figura 8.14 – Diferentes sistemas convectivos sobre os quais foram observados sprites em fevereiro de 2006, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.....	73
Figura 8.15 – Diferentes SCs convectivos que se uniram e formaram o MCS sobre o qual foram observados sprites em 2006.....	74
Figura 8.16 – Deslocamento do sistema convectivo (SC1) sobre o qual foram observados 380 sprites entre os dias 22-23 de Fevereiro de 2006.....	75
Figura 8.17 – Delimitados pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -54^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média do SC ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS- e NS+ (15min) ⁻¹	77
Figura 8.18 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min) ⁻¹	78
Figura 8.19 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 22-23/02/2006 com localização de relâmpagos NS e sprites com círculos de erro de localização.....	79
Figura 8.20 – Deslocamento do sistema convectivo (SC5) sobre o qual foi observado 1 sprite entre os dias 22-23 de Fevereiro de 2006.....	81
Figura 8.21 – A linha vermelha indica o horário em que o sprite foi observado (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -54^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ (15min) ⁻¹	83
Figura 8.22 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 22-23/02/2006 com localização de relâmpagos NS e sprites com círculos de erro de localização.....	84

Figura 8.23 – Sprites observados sobre o Paraguai (03-04/03/2006), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES.....	86
Figura 8.24 – Sistema convectivo sobre o qual foram observados sprites em Março de 2006, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.....	87
Figura 8.25 – Deslocamento do sistema convectivo sobre o qual foram observados 94 sprites entre os dias 03-04 de Março de 2006.....	87
Figura 8.26 – Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ (15min) ⁻¹	90
Figura 8.27 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min) ⁻¹	91
Figura 8.28 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 03-04/03/2006 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.....	92
Figura 8.29 – Distância entre sprites e relâmpagos que ocorreram até 500 ms antes dos sprites em função do atraso do sprite (gráfico superior), e o pico de corrente desses mesmos relâmpagos em função do atraso (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores determinados pelo atraso máximo de 100 ms e distância máxima de 200 km do sprite. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.....	94
Figura 8.30 – Sprites observados sobre o estado do Rio Grande do Sul e Oceano Atlântico (09-10/10/2007), durante campanha de observação de ELTs a partir do município de São Martinho da Serra, RS.....	95
Figura 8.31 – Sistema convectivo sobre o qual foram observados sprites em 2007, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.....	95
Figura 8.32 – Deslocamento do sistema convectivo sobre o qual foram observados 20 sprites entre os dias 09-10 de Outubro de 2007.....	96
Figura 8.33 – As linhas vermelhas delimitam o período em que os sprites foram observados (a) Área $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^{\circ}\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ (15min) ¹	98

Figura 8.34 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min^{-1})	99
Figura 8.35 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 09-10/10/2005 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.....	100
Figura 8.36 - Relâmpagos selecionados com um atraso de 500 ms em relação ao sprite, comparados com a distância horizontal da localização estimada dos sprites (gráfico superior) e o pico de corrente dos relâmpagos (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores pelo atraso de 100 ms e a uma distância máxima de 200 km. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.....	102
Figura 9.1 – Modelo conceitual das variáveis de um SC favorável a ocorrência dos sprites.....	105
Figura 9.2 – Diferença da temperatura média no círculo de erro de localização dos sprites entre os canais WV e IR ($\Delta T = T_{WV} - T_{IR}$) (a) 25-26/Outubro/2005; (b) 22-23/Fevereiro/2006; (c) 03-04/Março/2006; (d) 09-10/Outubro/2007.....	111

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 5.1 – Definição de CCM.....	32
Tabela 9.1 – Resumo dos resultados quanto à geração de sprites e a atividade de relâmpagos NS.....	106
Tabela 9.2 - Resumo dos resultados quanto geração de sprites e a atividade de relâmpagos NS+ e NS- em relação há diferentes fases dos SCs.....	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ELTs	Eventos Luminosos Transientes
IN	Relâmpago intranuvem
NS+	Relâmpago nuvem-solo positivo
NS-	Relâmpago nuvem-solo negativo
EMP	Pulso Eletromagnético
Cbs	Cumulonimbus
SC	Sistema Convectivo
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
Tr	Temperatura de reversão de carga
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
TB	Temperatura de brilho no canal infravermelho
T _{ir}	Temperatura de brilho na localização dos sprites no canal IR
T _{wv}	Temperatura de brilho na localização dos sprites no canal WV
FC	Fração Convectiva
FP	Fração Precipitante
WWLLN	<i>World Wide Lightning Location Network</i>
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
T _{med}	Temperatura média

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	5
2 EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES	7
2.1 Sprites.....	7
2.2 Halos.....	9
2.3 Elves.....	10
2.4 Jatos.....	12
3 NUVENS DE TEMPESTADES	17
3.1 Estrutura Elétrica.....	17
3.2 Mecanismos de Eletrificação das Nuvens de Tempestades.....	19
3.2.1 Mecanismo de Separação Gravitacional de Cargas.....	19
3.2.2 Mecanismo Indutivo.....	21
3.2.3 Mecanismo Convectivo.....	22
4 RELÂMPAGOS	25
4.1 Relâmpagos Nuvem-solo.....	28
4.2 Relâmpagos Intra-Nuvem.....	29
5 SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA	31
6 DADOS	41
6.1 Observação de sprites.....	41
6.2 Temperatura de topo de nuvem.....	43
6.3 Parâmetros de relâmpagos.....	44
7 METODOLOGIA	49
7.1 Análise das filmagens.....	49
7.2 Descrição do monitoramento dos sistemas convectivos.....	51
7.3 Identificação do relâmpago NS gerador.....	55
7.4 Penetrabilidade das nuvens.....	55
8 RESULTADOS: ESTUDO DE CASOS	57
8.1 25-26/Outubro/2005.....	57
8.2 22-23/Fevereiro/2006.....	72
8.3 03-04/Março/2006.....	86
8.4 09-10/Outubro/2007.....	94
9 DISCUSSÃO	103
10 CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1 INTRODUÇÃO

Há mais de 100 anos, fenômenos luminosos inexplicáveis sobre tempestades começaram a ser reportados na literatura. Primeiramente Mackenzie e Toynbee et al. (1886) descreveram o que possivelmente se tratava de um jato gigante, fenômeno efetivamente documentado apenas em 2002 [PASKO et al. 2002]. E foi em 1989 testando uma câmera Xybion ISS-255 sensível a baixos níveis de luminosidade, é que foram feitas as primeiras filmagens de sprites [FRANZ et al. 1990]. Hoje já se sabe que esses fenômenos ocorrem por todo o planeta e desde a sua descoberta vêm sendo observados acima de diferentes sistemas convectivos sobre oceanos e os continentes, com exceção da Antártida [LYONS et al. 2006].

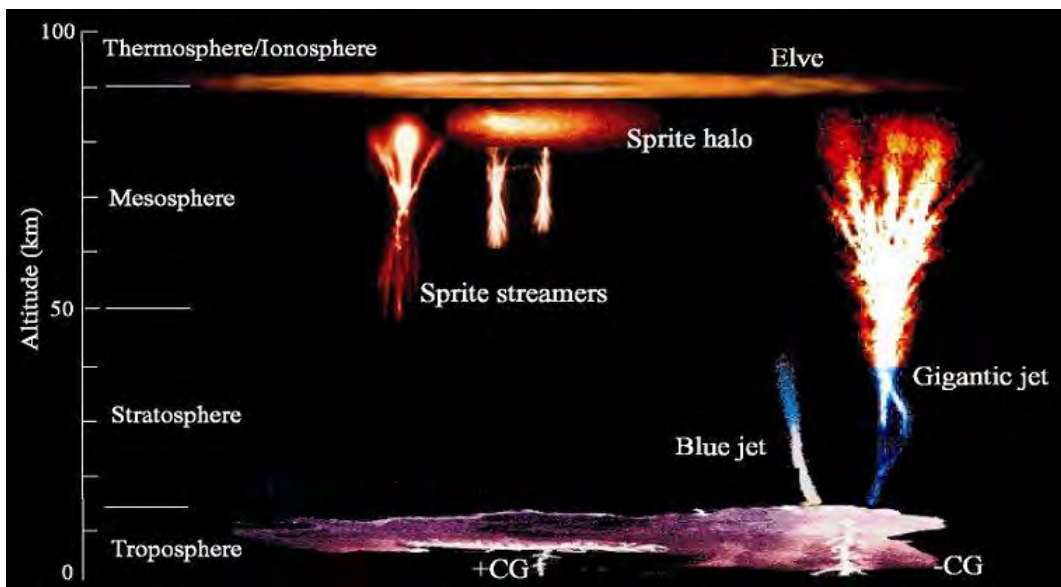


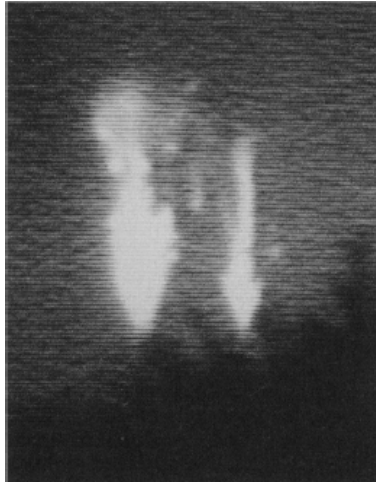
Figura 1.1 – Principais Eventos Luminosos Transientes (ELTs) Sprites, Halos, Elves e Jatos.

Sprites e jatos gigantes são tipos de Eventos Luminosos Transientes (ELTs), plasmas com emissões ópticas de baixa luminosidade que ocorrem na média e alta atmosfera e estão diretamente relacionados com a atividade elétrica de tempestades. O nome ELT, adaptado do inglês *Transient Luminous Event* (TLE) é um termo genérico adotado para se referir aos sprites, halos, elves, jatos e outros fenômenos luminosos transientes associados a relâmpagos

[SÃO SABBAS et al. 2010]. As ilustrações da Figura 1.1 mostram os principais ELTs conhecidos, a região e faixa de altitude onde ocorrem na atmosfera.

Os ELTs são de descoberta recente, entretanto Wilson et al. (1925) previa que o campo elétrico produzido por nuvens de tempestade poderia causar ionização na média e alta atmosfera. Somente na noite de 16 de julho de 1989, acidentalmente, durante um experimento de observação astronômica, Franz et al. (1990) coletaram as primeiras imagens desses fenômenos utilizando câmeras sensíveis a baixos níveis de luminosidade. Eles relataram que o fenômeno observado na imagem coletada com duração de aproximadamente 33 ms se assemelhava a dois 'jatos' sobre um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) no estado de Minnesota a 250 km do sítio de observação. Esses se tratavam dos primeiros sprites já documentados. As primeiras observações coloridas de sprites [SENTMAN et al. 1995] foram feitas durante a *Sprites94 Aircraft Campaign*, realizada em aviões, na qual foram observados sprites sobre tempestades nos estados do Texas e Oklahoma. As imagens mostradas na Figura 1.2 são referentes aos primeiros sprites observados por Franz et al. (1990), à esquerda, e uma das primeiras imagens coloridas de sprites observados por Sentman et al. (1995), à direita.

1.2(a)



1.2(b)

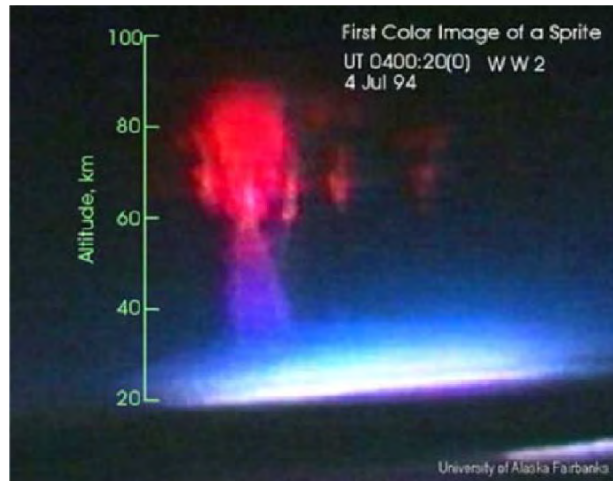


Figura 1.2 – Imagem da primeira observação de Sprites (a) e uma das primeiras imagens coloridas (b).

Fonte: Franz (1990); Sentman (1995).

Os ELTs são uma evidência óptica do acoplamento eletrodinâmico entre as várias camadas atmosféricas, e juntamente com os relâmpagos, a ionosfera e a magnetosfera, formam o Circuito Elétrico Global. A maioria dos ELTs é gerada por processos de ionização por impacto eletrônico. Os gases ionizados predominantemente N_2 e O_2 podem desencadear reações eletroquímicas que podem gerar alterações na composição química da média e alta atmosfera, produzindo, por exemplo, NO_x , que são gases que participam do ciclo de destruição do ozônio e, se transportados para baixo, chegando a camada de ozônio, têm o potencial de afetá-la [ARNONE et al. 2008].

A fonte de energia na geração dos ELTs é a atividade elétrica de nuvens de tempestades, que ocorrem na região da troposfera, mais especificamente os relâmpagos nuvem-solo (NS) [HEAVNER et al. 2000]. Os países tropicais são os mais atingidos por relâmpagos no mundo. O Brasil, com sua extensão territorial ocupando uma grande porção tropical, é potencialmente o país com maior atividade elétrica de tempestades do planeta. Pinto Júnior e Pinto (2008) sugerem que o Brasil é o país campeão mundial em incidência de relâmpagos, com cerca de 50 milhões por ano. A imagem mostrada na Figura 1.3 é referente à distribuição de incidência de relâmpagos no mundo. Observamos

que o Brasil possui uma elevada taxa de relâmpagos, tanto na sua porção tropical, quanto subtropical. A região central da África, em torno da bacia do Congo, é a região com a maior taxa de relâmpagos do planeta, ~70 relâmpagos/km² ao ano. No oeste da região sul brasileira as taxas chegam a 40 relâmpagos/km² ao ano.

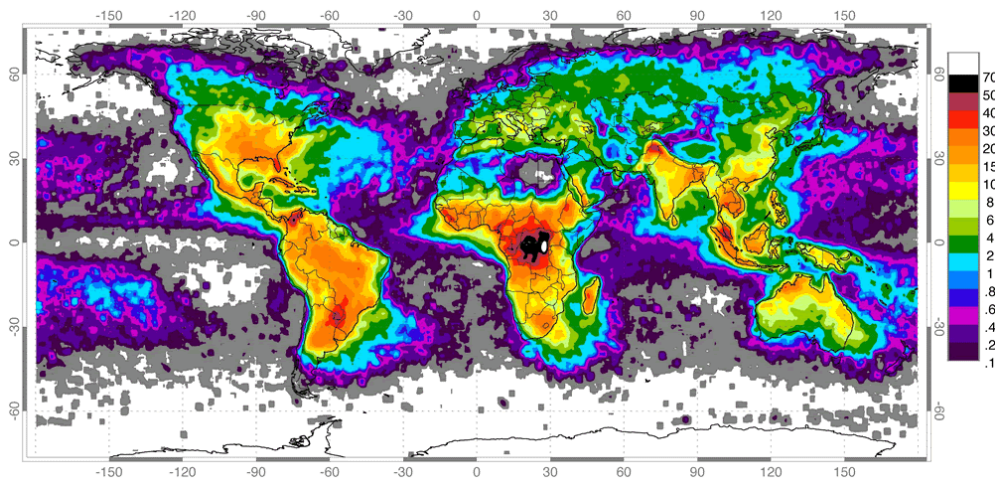


Figura 1.3 – Distribuição global de relâmpagos entre 1995 (Abril) e 2003 (Fevereiro) de observações do NASA OTD e LIS. Unidade: relâmpagos/km²/ano.

Chen et al. (2008) analisou a distribuição e a taxa de ocorrência de ELTs documentados com o instrumento ISUAL (*Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning*) a bordo do satélite FORMOSAT-2. Entre Julho de 2004 e Junho de 2007. Ele reportou que os elves são o tipo dominante de ELT seguidos por sprites e halos.

No período de passagens do ISUAL, conforme mostrado na Figura 1.3 foi observado que os elves se concentraram sobre os oceanos no Caribe, Sul da China, leste do Oceano Índico, centro e sudoeste do Oceano Pacífico e leste do Oceano Atlântico. Enquanto que os sprites se concentraram sobre a região central da África, Mar do Japão e Oeste do Oceano Atlântico.

O entendimento sobre ELTs com respeito as características das tempestades que dão origem os relâmpagos responsáveis pela sua geração é uma área de pesquisa em pleno desenvolvimento [LYONS et al. 2006]. Muito do entendimento sobre a meteorologia envolvendo o relâmpago gerador de ELTs

foi obtido durante campanhas de observação realizadas na América do Norte e Sul, Europa, Austrália, Japão e leste asiático.

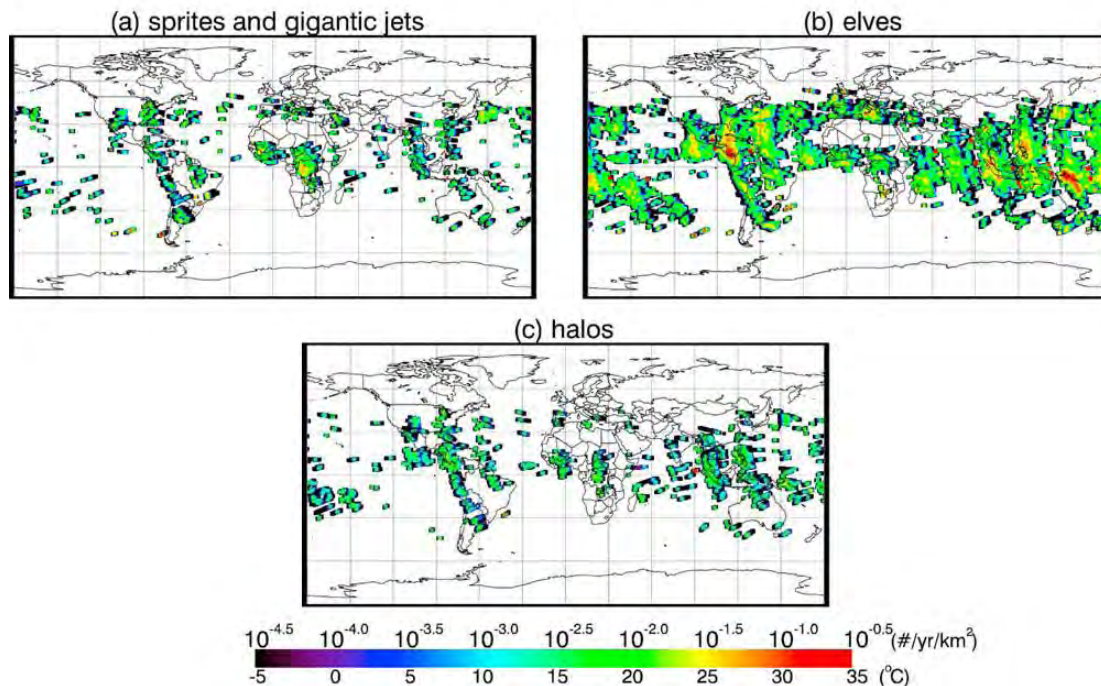


Figura 1.4 – Densidade de ocorrência de ELTs (a) sprites e jatos gigantes (jatos gigantes estão marcados por círculo vermelho); (b) elves; (c) halos entre Julho de 2004 e Dezembro de 2005.
Fonte: Chen (2008).

A descoberta dos Eventos Luminosos Transientes estabeleceu uma nova área de pesquisa que investiga a deposição de energia elétrica, gerada na troposfera, na atmosfera superior. Câmeras de vídeo, fotômetros, entre outros equipamentos vêm sendo usados no estudo desses fenômenos a partir do solo e a bordo de aviões e satélites [BERING et al. 2004]. Os ELTs têm sido estudados por diferentes áreas de pesquisa meteorologia, eletricidade atmosférica, física de plasmas, física da ionosfera e química da atmosfera.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do trabalho foi a caracterização de sistemas convectivos que geraram sprites estudando as propriedades físicas desses sistemas. Para alcançar o objetivo principal do trabalho, foi desenvolvido um sistema de

georreferenciamento de dados e determinação das características dos sistemas convectivos (SCs) através do monitoramento dos mesmos. Utilizando dados do satélite GOES no canal infravermelho (IR). O conteúdo do trabalho foi organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma descrição dos principais ELTs (sprites, halos, elves e jatos) quanto às características dos fenômenos e seus mecanismos de geração.

O Capítulo 3 apresenta a estrutura elétrica e processos de eletrificação das nuvens de tempestades.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos das descargas elétricas em tempestades e diferenças entre *leaders* e *streamers*; e relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo.

O Capítulo 5 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados no trabalho SCs sobre o quais foram observados ELTs no mundo e metodologias utilizadas por outros autores no *tracking* de SCs. O que foi apresentado nesse capítulo serviu de embasamento teórico para a metodologia utilizada e discussão dos resultados.

No Capítulo 6 são apresentados os dados, a fonte e formato dos dados que foram utilizados localização dos sprites, dados de satélite e parâmetros de relâmpagos.

No Capítulo 7 é apresentada a metodologia usada com os dados descritos no Capítulo 6.

No Capítulo 8 são apresentados os resultados encontrados da associação entre as propriedades dos sistemas convectivos com a ocorrência dos sprites.

No Capítulo 9 é apresentada a discussão dos resultados obtidos no trabalho.

No Capítulo 10 são apresentadas as conclusões que puderam ser retiradas do trabalho realizado.

2 EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES

2.1 Sprites

O termo sprite se refere a plasmas atmosféricas que ocorrem desde a mesosfera até a camada D da ionosfera, estendendo-se aproximadamente de 40 a 90 km [SENTMAN et al. 1995] com emissões ópticas predominantemente vermelhas. Estão associados a descargas elétricas que ocorrem em tempestades na troposfera com elevada atividade elétrica.

As imagens mostradas na Figura 2.1 são de sprites observados a partir do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, durante a campanha de observação de ELTs realizada nos meses de fevereiro e março de 2006, por pesquisadores do INPE e colaboradores de universidades americanas [SÃO SABBAS et al. 2010].

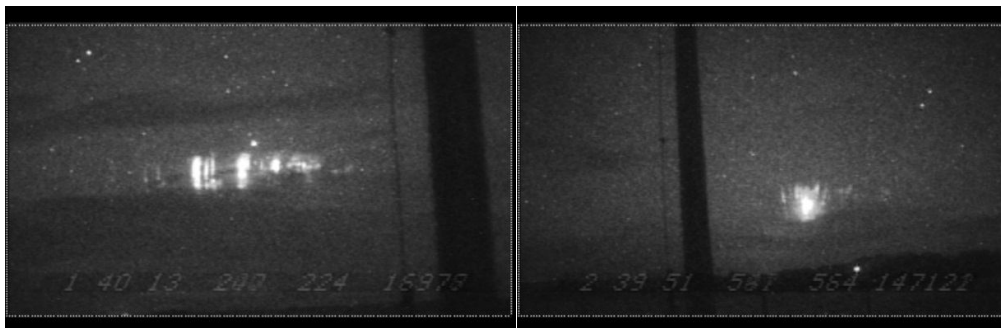


Figura 2.1 - Sprites observados sobre o Paraguai (03-04/03/2006), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES/INPE – São Martinho da Serra, RS.

A geração desses fenômenos está associada à ocorrência de relâmpagos nuvem-solo positivos (NS+) [LYONS et al. 2003]. Observações de sprites gerados por relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-) são raras. Na bibliografia atual há poucos resultados que indiquem essa característica [SÃO SABBAS et al. 2003; TAYLOR et al. 2008].

O modelo mais aceito para descrever a geração de sprites na mesosfera é baseado na quebra de rigidez dielétrica do ar via campos elétricos quase-eletrostáticos gerados por relâmpagos [PASKO et. al. 1997]. O processo de

quebra da rigidez dielétrica do ar se caracteriza pela ionização de um gás devido à ação de um campo elétrico externo [RAIZER et al. 1997]. O modelo proposto por Pasko et al. (1997) exemplifica o processo de geração de sprites a partir da ocorrência de um relâmpago nuvem-solo (NS) (Figura 2.2). A geração do sprite ocorre em média 20 a 30 ms após o relâmpago gerador. Após a ocorrência do relâmpago NS, é estabelecido um campo elétrico entre a nuvem e a ionosfera capaz de romper a rigidez dielétrica do ar, caracterizando uma descarga elétrica na mesosfera, o sprite [PASKO et al. 1997].

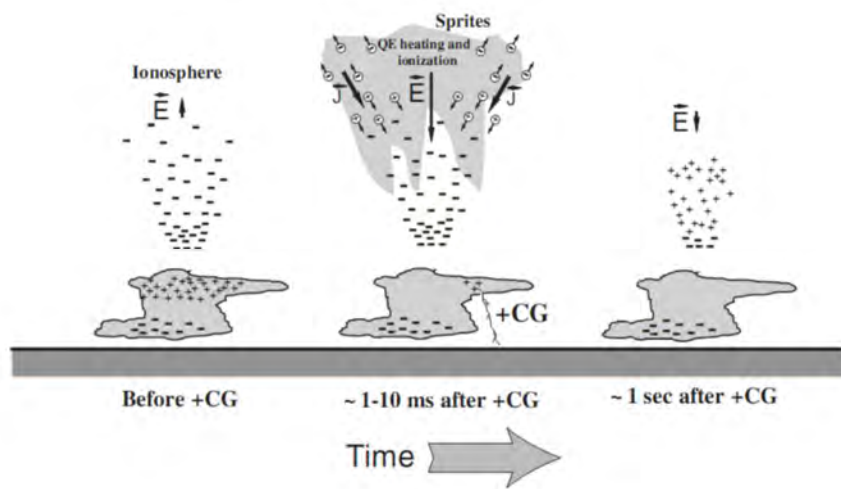


Figura 2.2 - Ilustração do modelo de geração de sprites proposto por Pasko [1997].
Fonte: Pasko (1997).

Considerando o processo de remoção de carga da nuvem, foi sugerido por Wilson et al. (1925) um importante conceito que é a variação do momento de carga, que relaciona a altura em que está a carga na nuvem em relação ao solo (Z em quilômetros) pela carga removida (Q em Coulomb), ambas em função do tempo [LANG et al. 2010], demonstrada na Equação 2.1.

$$\Delta M_q(t) = Z_q(t) \times Q(t) \quad (\text{C km}) \quad (2.1)$$

Essa variação do momento de carga na nuvem durante a ocorrência de um relâmpago NS determina se haverá ou não quebra de rigidez dielétrica do ar na mesosfera. Estima-se que esses valores devam ser na ordem de centenas de $\text{C} \times \text{km}$ [PASKO et al. 1997].

Sprites não necessariamente ocorrem diretamente acima dos relâmpagos NS geradores, pode haver um deslocamento horizontal entre o relâmpago e o sprite. Wescott et al. (2001) encontrou uma distância horizontal média de 25,2 km entre o sprite e o respectivo relâmpago que o gerou. Uma das razões possíveis para esse deslocamento horizontal pode estar relacionada com inhomogeneidades criadas por ondas de gravidade [SÃO SABBAS et al. 2003].

2.2 Halos

Halos são breves flashes de luz difusa na forma de um disco. O diâmetro tem menos de 100 km e ocorre na faixa de altitude entre 70 e 85 km [WESCOTT et al., 2001].

O mecanismo de geração de sprites e halos se assemelham. Assim como os sprites, os halos são originados por campos elétricos quase eletrostáticos na mesosfera resultantes de relâmpagos nuvem-solo [PASKO et al. 1997]. Halos e sprites podem ocorrer independentemente, porém devido à essa semelhança no processo de geração, frequentemente as observações mostram que os sprites são precedidos ou acompanhados por um halo de luz difusa em torno de 70 a 80 km [TAVARES e SANTIAGO et al. 2002]. Por isso os halos são muitas vezes denominados sprite-halos.

As imagens mostradas na Figura 2.3 apresentam alguns exemplos dos halos observados em 18 de agosto de 1999 sobre uma tempestade no estado de Nebraska, USA, pela equipe do Instituto de Geofísica da Universidade do Alaska Fairbanks (UAF), utilizando uma câmera rápida com uma taxa de aquisição de 1000 quadros por segundo (fps). No terceiro halo mostrado na figura podemos ver a formação de um *streamer* (indicado pela seta).

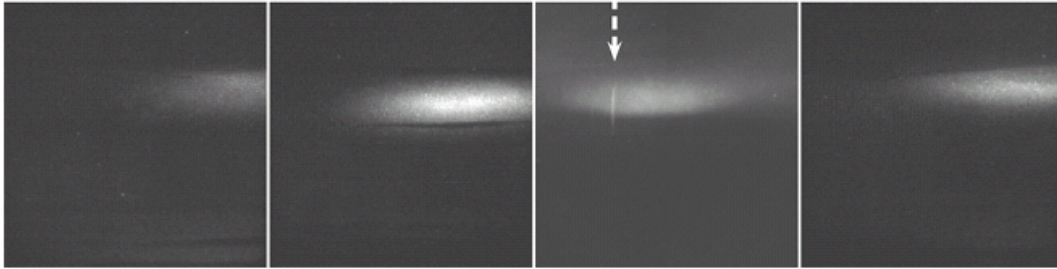


Figura 2.3 - Imagens de halos observados sobre o estado de Nebraska (18/08/1999).
Cada imagem tem a duração de 1ms.
Fonte: Moudry (2003).

As características citadas servem para distinguir os halos dos elves, que tem diâmetro de mais de 200 km, ocorrem em altitude entre 85 e 95 km e são gerados por pulsos eletromagnéticos (PEM) da descarga de retorno do relâmpago nuvem-solo [INAN et al. 1996].

Um halo gerado por um relâmpago nuvem-solo negativo foi documentado por Bering et al. (2004), porém há uma discrepância entre o fenômeno observado com os já documentados. Este tinha 400 km de diâmetro e era semelhante aos elves, porém o atraso de 6 milissegundos após o relâmpago gerador não condiz com o mecanismo de geração por um pulso eletromagnético. Williams et al. (2007) sugeriu que relâmpagos nuvem-solo negativos podem gerar halos maiores que os frequentemente documentados e que não são visíveis com a forma convencional de observação, câmeras.

Frey et al. (2007) utilizando dados de halos observados pelo ISUAL (Imager for Sprites and Upper Atmospheric Lightning) a bordo do satélite FORMOSAT-2, junto com dados dos relâmpagos NS geradores, mostrou que estes fenômenos podem ser gerados por relâmpagos negativos e que sua ocorrência predominante é sobre os oceanos.

2.3 ELVES

Elves (**E**missions of **L**ight and **V**ery **L**ow Frequency **P**erturbations from **E**lectromagnetic **P**ulse **S**ources) são anéis de luz difusa que aparecem na imagem da Figura 1.1 como uma estrutura anelar um pouco acima do topo do

sprite. Podem ser considerados fenômenos horizontais, que duram menos que 1 milissegundo, ocorrem entre 75 km e 105 km de altitude e atingem diâmetros horizontais de aproximadamente 600 km [BARRINGTON-LEIGH e INAN, 1999].

A Figura 2.4 mostra uma seqüência de imagens obtidas por Moudry et al. (2003) em 18 de agosto de 1999 e separadas temporalmente por 1ms. Na imagem central pode-se ver uma emissão tênue, essa emissão é um elve que precedeu o halo da imagem seguinte.

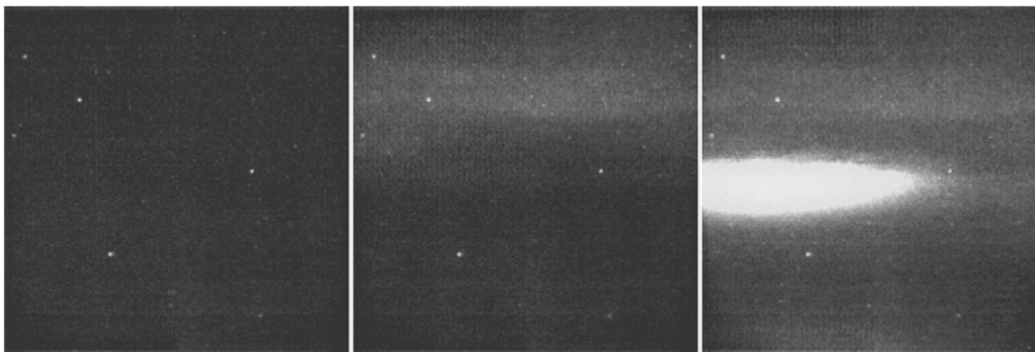


Figura 2.4 - Sequência de imagens separadas temporalmente por 1ms, obtida em 18 de agosto de 1999.
Fonte: Moudry (2003).

Elves, sprites e halos são gerados por relâmpagos nuvem-solo, porém diferentemente dos outros dois fenômenos, os elves não são gerados por campos quasi-eletrostáticos. Elves são gerados na altura da base da região E ionosférica por pulsos eletromagnéticos (PME) de intensas descargas elétricas [BARRINGTON-LEIGH e INAN, 1999].

A maioria dos sprites é gerada por NS+ [WILLIAMS et al. 2007], enquanto elves são produzidos tanto por NS+ quanto NS- [BARRINGTON-LEIGH e INAN, 1999]. A Figura 2.5 mostra um esquema da geração de um elve.

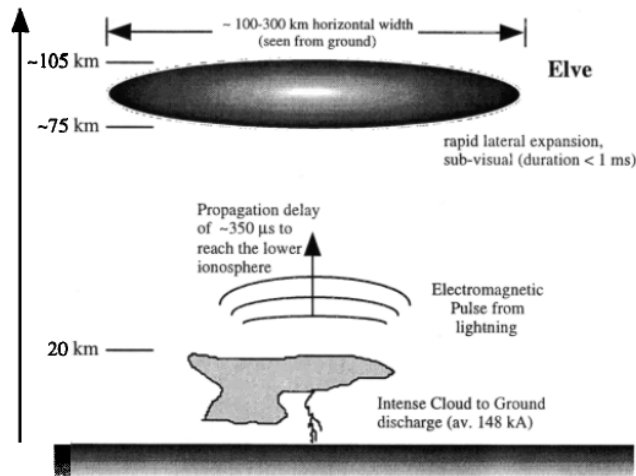


Figura 2.5 – Esquema da formação de elves.
Fonte: Rodger (1999).

2.4 Jatos

Tempestades ocasionalmente produzem relâmpagos e outros tipos de descargas elétricas pra cima, as últimas são chamadas de jatos azuis (*blue jets*) e jatos gigantes (*gigantic jets*) [KREHBIEL et al. 2008]. Esses jatos têm a característica comum de se propagar do topo da tempestade até ~40 km e ~90 km [WESCOTT et al. 1995], respectivamente, ao contrário dos sprite, halos e elves, que se iniciam na mesosfera [SENTMAN et al. 1995].

Os jatos azuis são feixes de luz que se propagam do topo das tempestades e normalmente não ultrapassam 50 km de altitude [MISHIN et al. 2008]. Porém Pasko et al. (2002) em Porto Rico e Su et al. (2003) em Taiwan observaram jatos que alcançam 70 km de altitude. Esses foram denominados de jatos gigantes.

Os jatos gigantes reportados por Pasko et al. (2002) e Su et al. (2003) não exibiam uma simples forma de cone e sim um ou mais canais colimados em ascensão, ramificando-se até altitudes onde os sprites normalmente ocorrem, entre 50 e 90 km. As imagens mostradas na Figura 2.6 (b) são referentes a dois jatos gigantes.

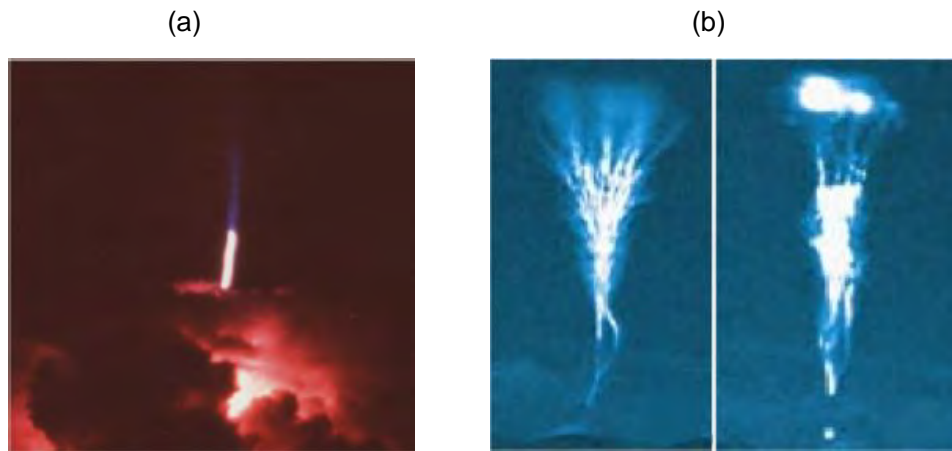


Figura 2.6 – (a) Imagem de um jato azul (b) Imagens de jatos gigantes.
Fonte: (a) Lyons (2003); (b) Su (2003).

O modelo proposto por Krehbiel et al. (2008) indica que os jatos azuis são resultado da quebra de rigidez dielétrica do ar devido ao campo gerado entre a carga no topo da tempestade e a carga da camada de blindagem no topo da nuvem, sugerindo que a geração dos jatos azuis é análoga à dos relâmpagos nuvem-solo.

Em contraste com os jatos azuis, Krehbiel et al. (2008) propôs que os jatos gigantes iniciam-se como os relâmpagos intra-nuvem (IN) comuns, devido ao campo elétrico entre cargas em níveis médios e cargas em altos níveis. A diferença é que os jatos continuam a se propagar para fora do topo do sistema. É possível que os jatos gigantes sejam fenômenos tropicais, devido a baixa condutividade nessas latitudes, que permite que o campo quase-eletrostático da nuvem atinja maiores altitudes [PASKO et al. 2002]. Uma representação esquemática proposta por Krehbiel et al. (2008) está na Figura 2.7.

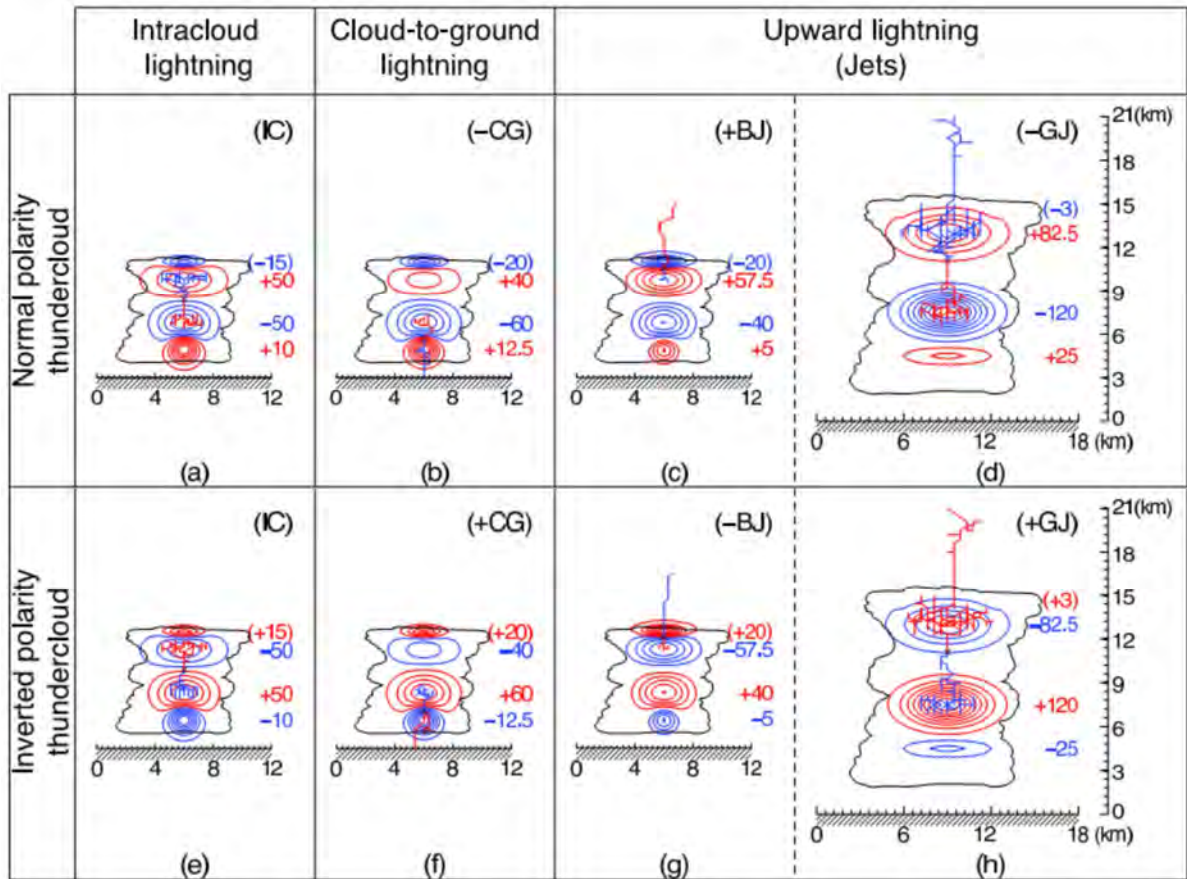


Figura 2.7 – Representação da geração de relâmpagos IN e NS, jatos azuis e jatos gigantes para uma tempestade com estrutura tripolar. O painel superior indica polaridade normal e inferior indica polaridade invertida. As elipses vermelhas indicam regiões com carga elétrica positiva e azuis com carga negativa.

Fonte: Krehbiel (2008), informação suplementar.

O esquema mostrado na Figura 2.7 apresenta um sumário das descargas elétricas que ocorrem em uma nuvem de tempestade com o objetivo de explicar a ocorrência dos jatos azuis e gigantes, com polaridade normal (painel superior) e invertida (painel inferior). O painel superior mostra uma nuvem de tempestade com três centros de carga um grande centro positivo na parte superior, um grande centro negativo na porção central e um pequeno centro positivo na parte inferior da nuvem. No topo da nuvem é formada uma camada de blindagem com carga negativa. Os relâmpagos intra-nuvem (IN) se iniciam por um processo de líderes bidirecionais entre os maiores centros de cargas (Figura 2.7(a)), enquanto os relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-) se iniciam

pelo mesmo processo, porém entre os centros de carga da porção central e inferior da nuvem (Figura 2.7(b)). O mesmo mostra o painel inferior, porém com polaridade invertida. Os jatos azuis se iniciam como relâmpagos NS, entre o centro de carga na parte superior da nuvem e a camada de blindagem, conforme mostrado na Figura 2.7 (c) e (g). Os jatos gigantes se iniciam como relâmpagos IN entre os grandes centros de carga na nuvem, conforme mostra a Figura 2.7 (d) e (h).

Processos de eletrificação e regiões de carga na nuvem e conceitos de descargas elétricas, tipos de relâmpagos, serão descritos nos Capítulos 3 e 4.

3 NUVENS DE TEMPESTADES

3.1 Estrutura elétrica

Quando nuvens se formam em ambientes instáveis, o ar em ascensão provoca um grande desenvolvimento vertical nessas nuvens. Em eventos extremos, essas nuvens normalmente alcançam tropopausa [FERREIRA et al. 2006]. Esse tipo de nuvem é denominado *cumulonimbus* (Cb). As nuvem Cb vêm acompanhada de ventos fortes, granizo, intensa precipitação [FERREIRA et al. 2006]. São a principal fonte de relâmpagos na troposfera, entretanto nem toda Cb produz relâmpagos. As nuvens Cb que apresentam elevada atividade elétrica são as nuvens denominadas tempestades [RAKOV e UMAN et al. 2003]. As imagens mostradas na Figura 3.1 são exemplos de nuvens Cb (a) isolada; (b) tempestade.

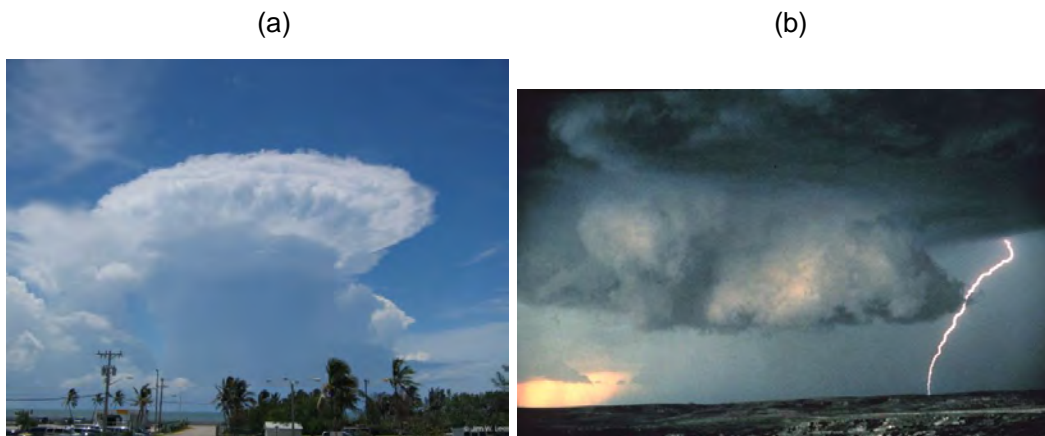


Figura 3.1 – Exemplos de nuvens *cumulonimbus* (a) nuvem isolada; (b) tempestade.

Em 1752, Benjamin Franklin conseguiu com base no seu experimento mostrar que as nuvens são eletrificadas. Ele observou que a base da tempestade era carregada negativamente, e no início do século 20 foi aceita a existência de centro de cargas positivas e negativas na nuvem. Essa distribuição ficou conhecida como estrutura de dipolo [MACGORMAN e RUST et al. 1998]. A estrutura elétrica de tempestades foi estudada ao longo do século 20 por diferentes métodos de sensoriamento remoto [WILLIAMS et al. 2003]. Dois métodos distintos propostos por Simpson e Wilson foram usados durante

décadas para explicar e estudar o momento de dipolo em tempestades. Simpson et al. (1909), utilizando medidas de diferença de potencial, estimou a carga na chuva abaixo de tempestades, sugerindo um dipolo negativo. Wilson et al. (1920), com base na Câmara de Wilson (*Wilson Chamber*), também conhecida como câmara de nuvem (*cloud chamber*), sugeriu um dipolo positivo. O desentendimento entre os dois métodos teve fim quando Simpson desenvolveu um instrumento para medir o campo elétrico vertical em um balão que penetrava a nuvem [WILLIAMS et al. 2003]. Uma série de sondagens de campo elétrico feitas por Simpson e Scrase et al. (1937) mostrou uma estrutura tripolar de cargas na tempestade. Uma região positiva no topo, uma negativa no meio e outra pequena positiva abaixo (Figura 3.2).

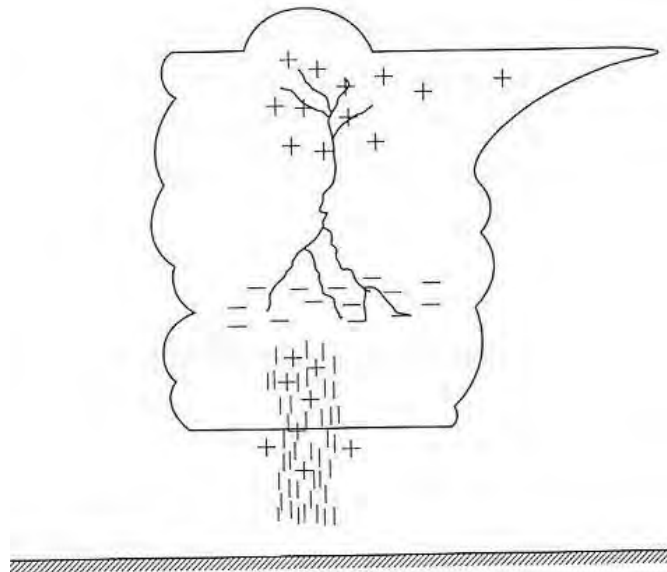


Figura 3.2 – Estrutura elétrica tripolar de nuvens de tempestade
Fonte: Adaptado de Williams (2003).

A região de carga negativa é geralmente encontrada na faixa de temperatura em torno de -10°C e -20°C . A região de carga positiva superior normalmente é difusa e pode se estender até o topo da nuvem. Já a região de carga positiva na base da nuvem normalmente tem menos carga do que a região negativa e pode se estender até abaixo da isoterma de 0°C [WILLIAMS et al. 2003].

O modelo tripolar de nuvens de tempestades explica a controvérsia entre Wilson e Simpson sobre a existência de um dipolo positivo ou negativo na nuvem. O dipolo observado por Wilson referia-se aos os centros de carga em médios e altos níveis da nuvem, enquanto que o dipolo proposto por Simpson referia-se aos centros de carga na base e em níveis médios da nuvem [WILLIAMS et al. 1988].

3.2 Mecanismos de eletrificação das nuvens de tempestades

Simulações em laboratórios e um vasto número de dados experimentais coletados durante décadas não foram capazes de determinar uma teoria definitiva que descrevesse os processos físicos que levam à eletrificação de nuvens Cb [JAYARATNE et al. 2003]. Segundo Pinto Júnior et al. (2008) isso se deve ao fato de a estrutura elétrica de uma tempestade ser bastante complexa como resultado de processos macrofísicos e microfísicos ocorrendo simultaneamente dentro da nuvem. Somando-se a essa dificuldade ao fato de o relâmpago ser um fenômeno que se inicia com a eletrificação em uma escala atômica ($\sim 10^{-13}$ km) e se desenvolve para uma escala de mesoescala ($\sim 10^3$ km) [WILLIAMS et al. 1988].

A ocorrência da grande maioria dos relâmpagos está relacionada à presença de gelo dentro da nuvem. Com o passar do tempo, diversos mecanismos vêm sendo propostos para explicar a eletrificação e a separação de cargas nas nuvens de tempestades. A seção 3.2 apresenta os principais mecanismos de eletrificação de nuvem baseado em Jayaratne et al. (2003) e Williams et al. (1988) e (2003).

3.2.1 Mecanismo de separação gravitacional de cargas

Williams et al. (2003) indica que nuvens Cb devem ter uma extensão vertical entre 2 e 3 km, no nível de congelamento, antes de o relâmpago ocorrer. Essa observação é favorável ao mecanismo de eletrificação por separação gravitacional de cargas colisão entre grãos e cristais de gelo [WILLIAMS et al. 2003]. Para esse mecanismo é necessária a presença de água no estado

sólido, líquido e gasoso, conhecida como fase mista. Cristais de gelo são partículas sub-micrométricas formadas a partir da deposição de vapor nos núcleos de gelo. Os grãos de gelo são partículas micrométricas formadas quando cristais de gelo são acrescidos por água super-resfriada em sua superfície [WILLIAMS et al. 2003]. O contínuo acréscimo pode levar os grãos de gelo a terem tamanho de milímetros e, em casos de alta concentração de partículas super-resfriadas, terem tamanho de centímetros, quando passam a ser chamados de granizo. A colisão entre grãos de gelo com partículas de gelo menores promove a transferência seletiva de carga. Os grãos de gelo, mais pesados, ficam carregados negativamente. De acordo com esta teoria, a diferença de massa entre as partículas promove uma separação gravitacional entre as partículas mais leves e mais pesadas, carregadas com carga oposta, até chegar a um campo elétrico suficiente para a quebra da rigidez dielétrica do ar e a geração do relâmpago [WILLIAMS et al. 2003]. A separação de cargas devido a gravidade forma um dipolo positivo.

As partículas de gelo recebem diferentes denominações de acordo com seu estágio de desenvolvimento
Cristais de Gelo (Ice Crystals) – Sub-micrométricas.
Grãos de Gelo (Ice Graupel) – Micrométricas.
Granizo (Hail) – Milimétricas.

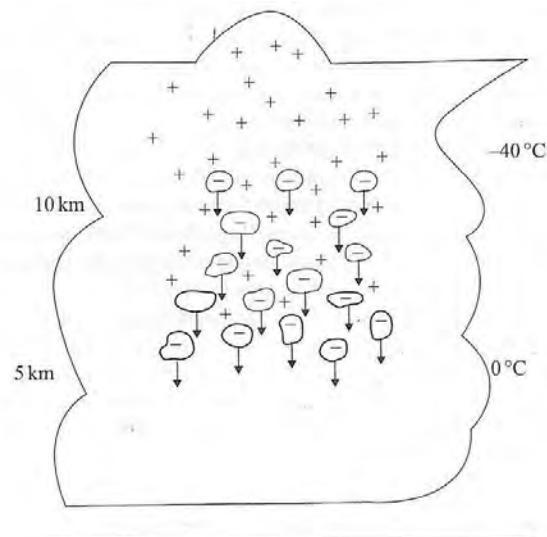


Figura 3.3 – Ilustração da separação de cargas devido à gravidade. A carga negativa nas partículas mais pesadas cria um dipolo positivo na nuvem.
Fonte: Williams (2003).

3.2.2 Mecanismo indutivo

O mecanismo indutivo foi um dos primeiros mecanismos propostos para explicar a eletrificação de tempestades e até hoje vem sendo popularmente aceito. Foi proposto inicialmente por Elster e Geitel et al. (1913) apud Jayaratne et al. (2003) e desde então vem sofrendo modificações. A Figura 3.4 mostra uma representação esquemática do mecanismo. Uma partícula d'água que cai através da região do campo elétrico vertical da tempestade está sujeita a sofrer polarização devido ao campo. No modelo em questão o campo aponta para baixo, considerando que o centro de cargas positivo está sobre o negativo. A partícula d'água ficará polarizada com carga negativa no seu topo e carga positiva na parte inferior. Pequenas gotículas podem ricochetear na porção inferior da partícula removendo um pouco de sua carga positiva. Devido a correntes de ar ascendentes, essa carga positiva poderá ser varrida para o topo da nuvem ampliando o centro de carga positiva. A partícula que está caindo, agora com carga líquida negativa, poderá ser transportada para parte de baixo da nuvem, reforçando o centro de carga negativa [JAYARATNE et al. 2003].

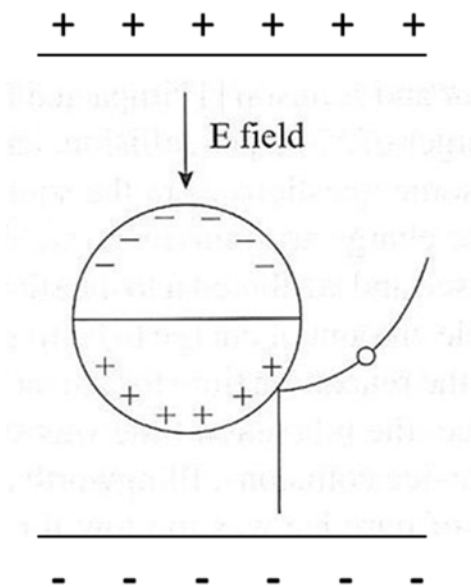


Figura 3.4 – Representação esquemática do mecanismo indutivo.
Fonte: Adaptado de Jayaratne (2003).

O mecanismo indutivo apresenta algumas incoerências. A condutividade do gelo é baixa para a completa transferência de cargas durante o rápido tempo de contato das partículas. No caso de gotas de água maiores colidindo com menores, tende a promover a coalescência entre partículas e não a separação de cargas.

3.2.3 Mecanismo convectivo

A teoria é baseada no transporte vertical de íons na atmosfera por fortes movimentos ascendentes dentro da nuvem, e compensado por movimentos descendentes na parte externa da nuvem. A teoria está esquematicamente ilustrada na Figura 3.5. Supõe-se que os íons positivos sob a nuvem são carregados para dentro das mesmas e seguidamente para o topo por movimentos ascendentes. Essas cargas positivas atraem íons carregados negativamente da atmosfera superior para a superfície superior da nuvem. Os íons rapidamente tornam-se aprisionados nas partículas da nuvem por junção eletrônica (*attachment*), e são transportadas por movimentos descendentes até a parte inferior da nuvem [JAYARATNE et al. 2003].

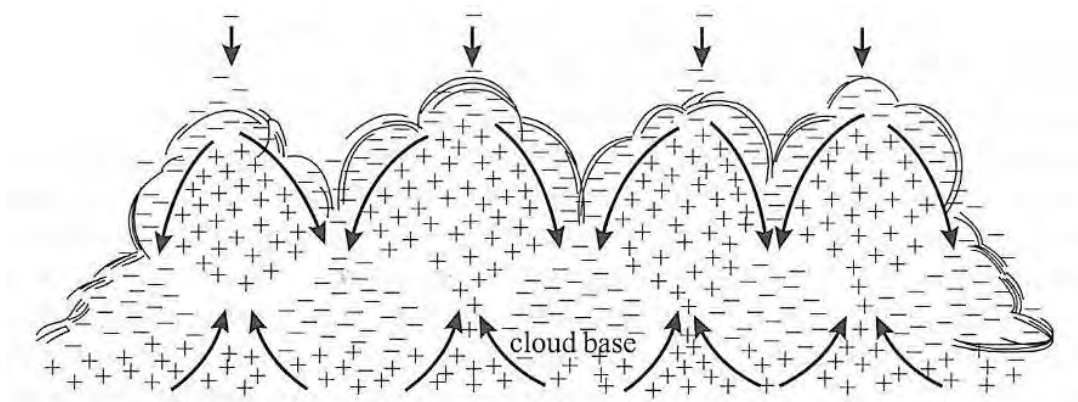


Figura 3.5 – Representação esquemática do mecanismo convectivo.
Fonte: Vonnegut (1963).

O mecanismo convectivo baseia-se na presença de íons positivos sob a base da nuvem. O processo que deu origem a estes íons iniciais ainda não é bem entendido. As hipóteses até o momento dependem da ionização da atmosfera

por raios cósmicos, porém não há evidências de que a quantidade de raios cósmicos é capaz de gerar estes íons.

Individualmente, os mecanismos de eletrificação indutivo e convectivo são incompletos na tentativa de explicar os processos de eletrificação nas nuvens de tempestades e a sua estrutura tripolar. Há evidências de que esses mecanismos ocorram, porém com importância secundária diante do processo de separação de cargas devido a gravidade [WILLIAMS et al. 1988].

Williams et al. (1988) indica que as localizações dos centros de carga são determinadas pela temperatura local e não pela altura em relação ao solo. Conforme mencionado anteriormente, o centro de carga negativa é geralmente localizado entre as isotermas de -10°C e -20°C , o centro de carga positiva está a alguns km sobre essa região e há um pequeno centro de carga positiva abaixo do centro negativo [JAYARATNE et al. 2003]. A Figura 3.6 mostra dados obtidos através de medidores de campos elétricos sob tempestades em diferentes localizações, tempestades de verão na Flórida, no Novo México e uma tempestade de inverno no Japão. Observa-se que as alturas do centro de carga independem da altura da nuvem e sim da temperatura.

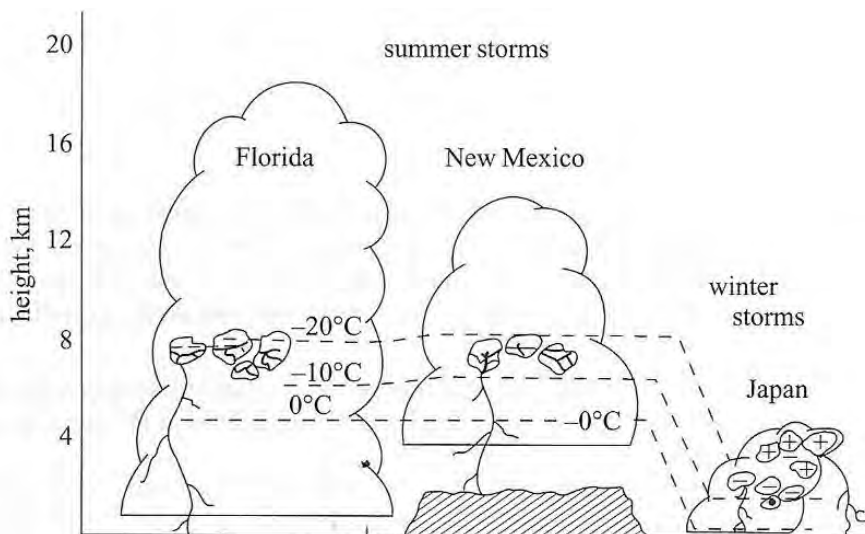


Figura 3.6 – Altura dos centros de carga em tempestades de verão na Flórida e Novo México, e de inverno no Japão, obtidas através de medidores de campo elétrico.

Fonte: Adaptado de Brook e Krehbiel (1986).

Williams et al. (1988) indica que durante as colisões a polaridade da carga transferida depende da temperatura local. A Figura 3.7 é a representação esquemática do que ocorre com grãos de gelo que caem num meio com partículas em suspensão, cristais de gelo e gotículas de água super-resfriada. Experimentos em laboratório indicam que quando a temperatura está acima de uma determinada temperatura, chamada de temperatura de reversão de carga (T_r), neste caso $T_r = -15^\circ\text{C}$, o grão de gelo adquire carga positiva (menor altitude). E em locais com temperatura abaixo da T_r o grão de gelo terá carga negativa (maior altitude) [WILLIAMS et al. 1988]. O contrário ocorre com as partículas menores, sendo esta uma possível explicação para a estrutura tripolar.

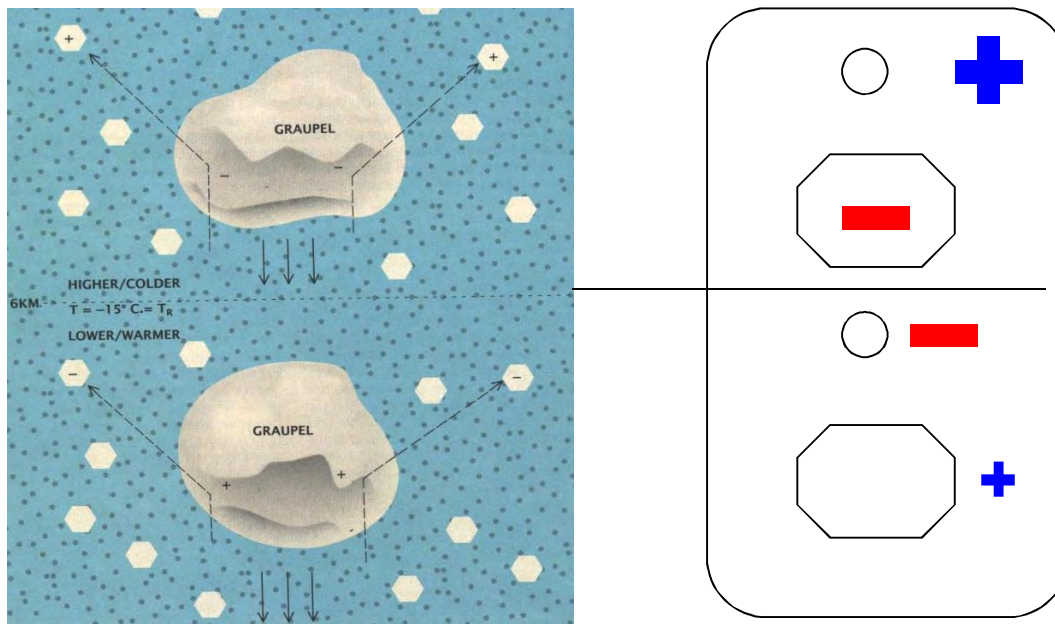


Figura 3.7 – Microfísica da transferência de cargas entre grãos e cristais de gelo.
 Fonte: Adaptado de Williams (1988).

4 RELÂMPAGOS

Os relâmpagos são descargas elétricas de grande intensidade que ocorrem na troposfera. Os relâmpagos e outras descargas atmosféricas, entre elas os sprites, se iniciam pelo processo da quebra da rigidez dielétrica do ar.

O primeiro mecanismo proposto para explicar a quebra da rigidez dielétrica do ar é o Mecanismo de Townsend, baseado na multiplicação de elétrons por avalanches eletrônicas, que é o processo inicial das descargas elétricas. Inicialmente um elétron livre sob a ação de um campo elétrico externo é acelerado, colide com uma molécula neutra gerando um par elétron-íon. Os elétrons resultantes são novamente acelerados e o processo se repete, levando a uma amplificação geométrica do número de elétrons [COORAY et al. 2003].

A principal diferença entre sprites e relâmpagos, além de diferentes regimes de pressão e temperatura em que ocorrem, é que sprites são formados por *streamers*, finos canais de plasma gerados pelo processo de avalanche eletrônica, e relâmpagos são formados por líderes, canais de plasma formados por uma “aglutinação” de *streamers*. Os *streamers* se formam com o campo elétrico mais elevado. Ambos os líderes e *streamers* podem ser considerados positivos ou negativos, dependendo da carga líquida nas suas extremidades. O experimento realizado em uma câmara para descargas elétricas por Briels et al. (2008) mostra a propagação de *streamers* positivos e negativos (Figura 4.1). As imagens mostram fotografias de *streamers* que se propagam por uma distância (d) de 40 mm entre as placas para diferentes tensões com regime de pressão (p) constante em 100kPa. Os resultados encontrados por Briels et al. (2008) indicam que em ambientes de mesma tensão o *streamer* positivo tem mais facilidade de se propagar em relação ao negativo.

Briels et al. (2008) indica que as descargas elétricas conservam as suas características para um mesmo valor do produto entre pressão (p) e distância das placas positivas e negativas (d). Entre $5,33 < p \cdot d < 133$ kPa.m a avalanche eletrônica se desenvolve formando o *streamer*, esses são canais de plasma

quase-neutro, fracamente ionizado, que observamos nos sprites. Desse modo a quebra de rigidez dielétrica do ar ocorre na ordem avalanche eletrônica – *streamer* – curto-circuito. Para valores de $p.d > 5,33 \text{ kPa.m}$, surge uma nova etapa nesse processo, a formação de um canal altamente condutor chamado líder. A manifestação mais conhecida do mecanismo de líderes ocorre em relâmpagos [RAKOV e UMAN et al. 2003]. Nesse caso a quebra de rigidez dielétrica do ar ocorre na ordem avalanche – *streamer* – líder – curto-circuito. O curto circuito é análogo a descarga de retorno de relâmpagos, que produz intensa luminosidade quando o canal do relâmpago toca o solo.

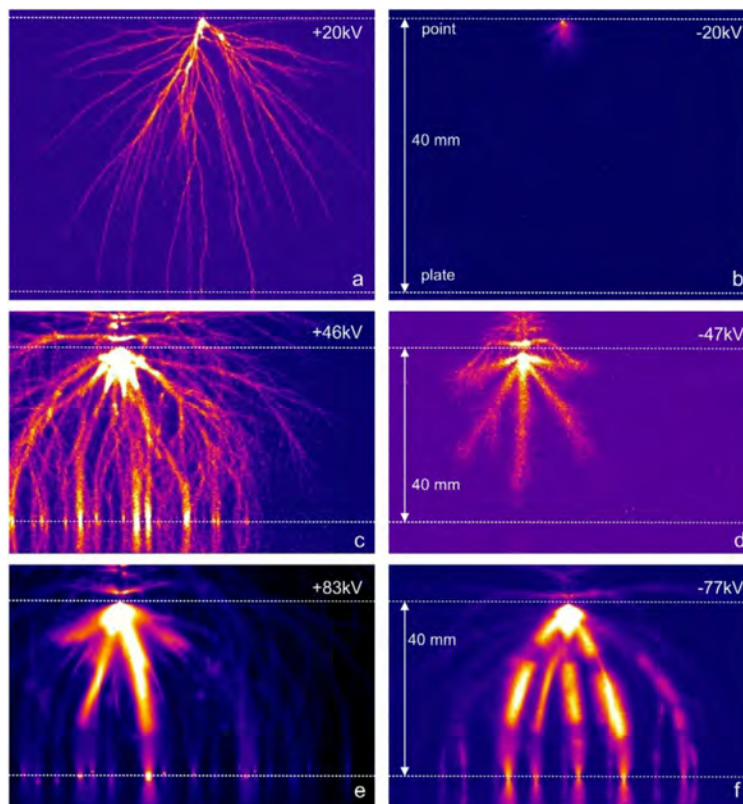


Figura 4.1 – Exemplos de *streamers* positivos (esquerda) e negativos (direita). Distância (d) de 40mm e regime de pressão (p) de 100kPa aplicadas em diferentes tensões.
Fonte: Briels (2008).

Rakov e Uman et al. (2003) indicam que dentro de uma nuvem Cb os valores de campo elétrico atingem centenas de kV/m. Experimentos realizados em laboratório mostram que os campos elétricos medidos dentro das Cbs não são suficientes para dar início à quebra de rigidez dielétrica do ar e

consequentemente ao processo de líder [LES RENARDIERÈS GROUP et al. 1981]. Essa é uma das discrepâncias que mantêm o mecanismo de iniciação dos relâmpagos como um assunto em aberto na eletrodinâmica atmosférica [PINTO JÚNIOR et al. 2008].

Entre as teorias da iniciação dos relâmpagos, a teoria do líder bidirecional proposta por Mazur et al. (1989) será abordada nesse texto. Essa teoria foi primeiramente proposta por Kasemir et al. (1950) e desde experimentos envolvendo medições e observações a bordo de aviões vêm sendo aceita na comunidade científica como a mais completa na tentativa de explicar a iniciação dos relâmpagos [MAZUR et al. 1989]. A teoria propõe que a partir de um intenso campo elétrico capaz de romper a rigidez dielétrica do ar há a propagação de líderes negativos e positivos dentro da nuvem em regiões com carga predominante positiva e negativa, respectivamente.

A maioria das descargas elétricas na atmosfera ocorre dentro das nuvens (relâmpagos intra-nuvem), porém, uma parte das descargas sai da nuvem em direção ao solo, sendo denominadas relâmpagos nuvem-solo. Esses relâmpagos, que atingem o solo, podem causar danos a redes de energia elétrica, mortes e incêndios [PINTO JÚNIOR et al. 2008].

De maneira geral podemos classificar os relâmpagos como os que tocam o solo ou não. Williams et al. (2003) classificou os principais tipos de relâmpago como sendo os relâmpagos intra-nuvem (IN), nuvem-solo (NS) e descargas no ar. Os relâmpagos NS, ainda podem ser classificados como Positivos (NS+) e Negativos (NS-).

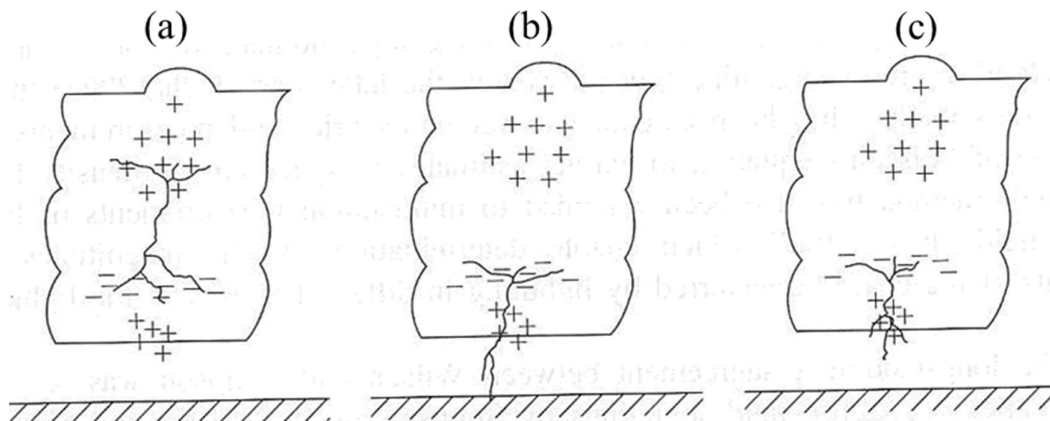


Figura 4.2 – Tipos predominantes de relâmpagos em uma estrutura tripolar de carga na nuvem (a) relâmpago IN, (b) relâmpago NS e (c) descargas no ar. Fonte: Williams (2003).

4.1 Relâmpagos nuvem-solo

Considerando o mecanismo do líder bidirecional proposto por Mazur et al. (1989) e a estrutura tripolar das nuvens de tempestades, temos que os relâmpagos iniciam-se entre os centros de carga positivos e negativos, região onde o campo elétrico é mais intenso. Os relâmpagos NS são os relâmpagos que partem da nuvem e tocam o solo removendo carga da nuvem. Ao tocar o solo ocorre a descarga de retorno, análoga a um curto-circuito. Considerando a estrutura tripolar da nuvem com centro de carga negativa em médios níveis e um centro positivo acima e outro pequeno centro positivo abaixo, os relâmpagos NS podem ser classificados como NS+ e NS-.

Os relâmpagos NS+ originam-se entre os centros de carga em médios e altos níveis e se propagam até tocar o solo aniquilando carga positiva na nuvem. Já o NS- iniciam-se entre os centros de cargas em médios e baixos níveis e, analogamente, aniquilam carga negativa da nuvem. Em ambos os casos os líderes positivos se propagam na região de carga negativa e os líderes negativos na região de carga positiva. Os líderes positivos possuem carga líquida positiva em sua extremidade e se propagam no sentido do campo elétrico enquanto que os líderes negativos possuem carga líquida negativa e se propagam no sentido contrário ao campo.

4.2 Relâmpagos intra-nuvem

Os relâmpagos IN não tocam o solo, sendo assim seus líderes positivo e negativo se propagam no interior da nuvem. Esses relâmpagos, como citado anteriormente, partem dos centros de carga de diferentes polaridades na nuvem. Estima-se que 80 % dos relâmpagos que ocorrem em tempestades no mundo sejam relâmpagos IN [PINTO JÚNIOR et al. 2008].

5 SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA

A maioria das nuvens, embora tenha algum reservatório de carga, não possui as características necessárias para geração de relâmpagos. Nuvens convectivas com movimentos verticais entre 5 e 10 m/s, no mínimo, e elevada extensão vertical da fase mista de precipitação (-10°C a -40°C) são necessárias para que ocorra atividade elétrica [LYONS et al. 2006]. As nuvens estratiformes não apresentam as características descritas, possuem grande desenvolvimento horizontal mas pouca espessura em relação a região convectiva e apresentam precipitação fraca e contínua. A exceção é a região estratiforme em Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs).

Os SCM são grandes sistemas convectivos que apresentam grande área de precipitação. Eles se formam quando nuvens convectivas se organizam em uma escala maior causando uma grande área de precipitação contínua. O SCM pode ter diferentes formas. Uma definição geral de SCM, que não inclui todas as suas formas, mas sim a maioria dos SCMs, é a de sistemas de nuvens cumulusnimbus que produzem área de precipitação de ~100km ou mais em uma direção [HOUZE et al. 2004].

Um dos tipos de SCM são os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), definidos por Maddox et al. (1980) conforme a tabela 5.1.

Todos os ELTs estão de certa forma associados a relâmpagos. Sendo assim, sistemas formados por nuvens estratiformes serão fontes de ELTs quando acompanhados de SCM ou CCM [LYONS et al. 2006].

Tabela 5.1 Definição de CCM

	Características Físicas
Tamanho	A – Nuvens contínuas com temperatura IR $\leq -32^{\circ}\text{C}$ com área $\geq 100 \text{ km}^2$ B – Nuvens no interior com temperatura IR $\leq -52^{\circ}\text{C}$ devem ter área $\geq 50 \text{ km}^2$
Iniciação	Definições de tamanho em A e B são satisfeitas
Duração	Definições de tamanho em A e B são satisfeitas para um período $\geq 6\text{h}$
Extensão máxima	Nuvens contínuas com temperatura IR $\leq -32^{\circ}\text{C}$ atinge área máxima
Forma	Excentricidade $\geq 0,7$ durante a máxima extensão
Término	Definições de tamanho em A e B não são mais satisfeitas

Fonte: Adaptado de Maddox (1980).

Williams et al. (1998) sugere que a porção estratiforme funciona como um reservatório de cargas positivas a serem removidas da nuvem por um relâmpago NS+. A propagação horizontal do relâmpago por grandes distâncias próximas à base da nuvem pode caracterizar um relâmpago aranha (*spider lightning*) [MAZUR et al. 1998], exemplificado na Figura 5.1. Esse tipo de relâmpago é tido como um potencial gerador de ELTs e é frequentemente observado na fase de dissipação da tempestade [MAZUR et al. 1998]. Em raras ocasiões, relâmpagos NS+ que produzem sprites ocorrem durante a fase mais intensa de crescimento da célula convectiva. Sendo assim, células convectivas podem ser fontes de jatos e raramente sprites, exceto na fase de dissipação do sistema [LYONS et al. 2006].



Figura 5.1 – Exemplo de um relâmpago aranha (*spider lightning*).
Fonte: Mazur (1998).

Os sprites são normalmente gerados por relâmpagos NS+ na região estratiforme de SCMs. Esses sistemas têm como características áreas de precipitação estratiforme acompanhadas de regiões convectivas. Dados de radar indicam que região de precipitação de um SCM se divide em convectiva e estratiforme [HOUZE et al. 2004]. Essas regiões de precipitação também podem, aproximadamente, ser estimadas por dados de satélites geostacionários no canal infravermelho (IR). A região convectiva consiste em núcleos que se estendem verticalmente enquanto que a região estratiforme é de uma forma mais uniforme, conforme está idealizada na Figura 5.2.

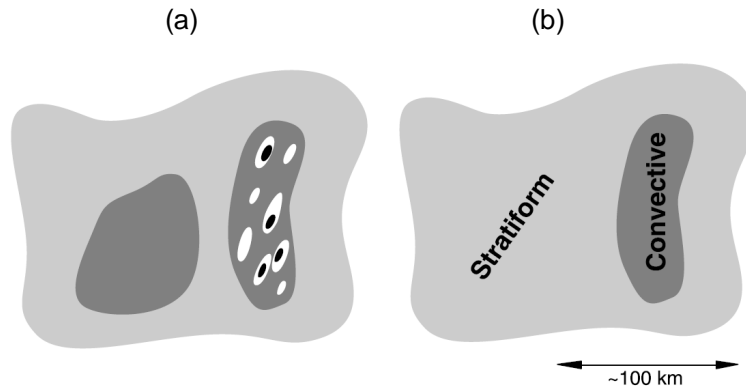


Figura 5.2 – (a) Idealização de uma seção horizontal de refletividade de radar (b) dividido entre região convectiva e estratiforme.
 Fonte: Houze (2004).

A principal diferença entre as regiões de precipitação convectiva e estratiforme está na dinâmica envolvendo as partículas de gelo na nuvem com relação a magnitude dos movimentos verticais. A partícula de gelo na nuvem é acelerada para baixo devido a força da gravidade, com a velocidade de queda aumentando, a resistência do ar tende a aumentar até igualar a força da gravidade e então a partícula cai em com velocidade constante, chamada velocidade terminal (v_t). A velocidade vertical (w) no interior da nuvem estratiforme é menor do que a velocidade terminal ($w \ll v_t$). Essa condição implica que as partículas de gelo em regiões mais altas da nuvem devem precipitar. Diferentemente do que é observado nas regiões convectivas, onde a magnitude da velocidade vertical é da mesma ordem ou superior à velocidade terminal das partículas de gelo. O esquema mostrado na Figura 5.3 mostra o processo de precipitação das partículas no interior de um SCM. Os asteriscos e linhas representam o deslocamento dos hidrometeoros da região convectiva para a estratiforme. Os círculos cheios representam a intensidade da precipitação, círculos grandes e pequenos indicam precipitação intensa e fraca, respectivamente. Essa região de precipitação estratiforme é produzida pela dissipação das células convectivas imersas no SCM [HOUZE et al. 2004].

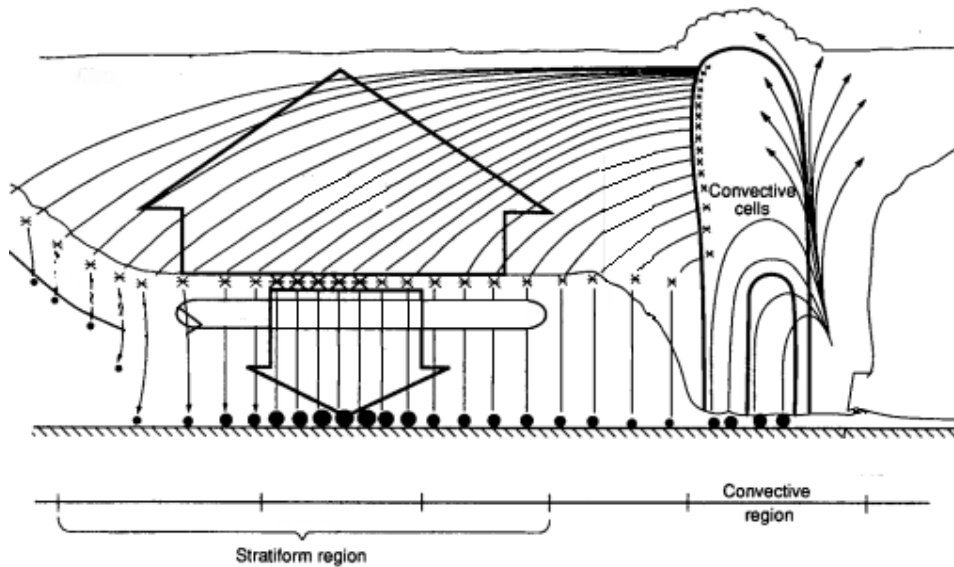


Figura 5.3 – Modelo conceitual da trajetória de precipitação e movimentos verticais médios de um SCM.

Fonte: Adaptado de Biggerstaff e Houze (1993).

O conhecimento da evolução do SCM e o comportamento das suas porções convectiva e estratiforme podem auxiliar no entendimento quanto à região do sistema e período do seu ciclo de vida favorável à geração de sprites. A evolução do ciclo de vida de um SCM proposto por Houze et al. (1982), é indicada na Figura 5.4, mostra quatro fases bem identificadas e o período em que a região estratiforme apresenta um maior crescimento. A fase de iniciação (a) é o período em que as células convectivas começam a se desenvolver. O surgimento da convecção pode ser devido a diferentes fatores que favorecem a instabilidade atmosférica, como fatores dinâmicos, termodinâmicos, efeitos orográficos, etc. Essas células convectivas, geralmente crescem agregadas, isto resulta em uma superfície contínua de precipitação. Esse fator aliado à circulações de mesoescala permitem ao SCM durar por várias horas. A fase de maturação (b) ocorre quando o sistema apresenta uma grande área de precipitação estratiforme em função da dissipação das células convectivas, cujas partículas remanescentes tornam-se um componente da parte estratiforme dos SCM. Essa característica permite que a fase de maturação dure por várias horas e conseqüente aumento no tempo de vida do SCM. Na fase de enfraquecimento (c) o sistema já não apresenta células convectivas e a

fase de dissipação (d) é correspondente à diminuição das áreas de precipitação do SCM e consequente fim da vida do SCM.

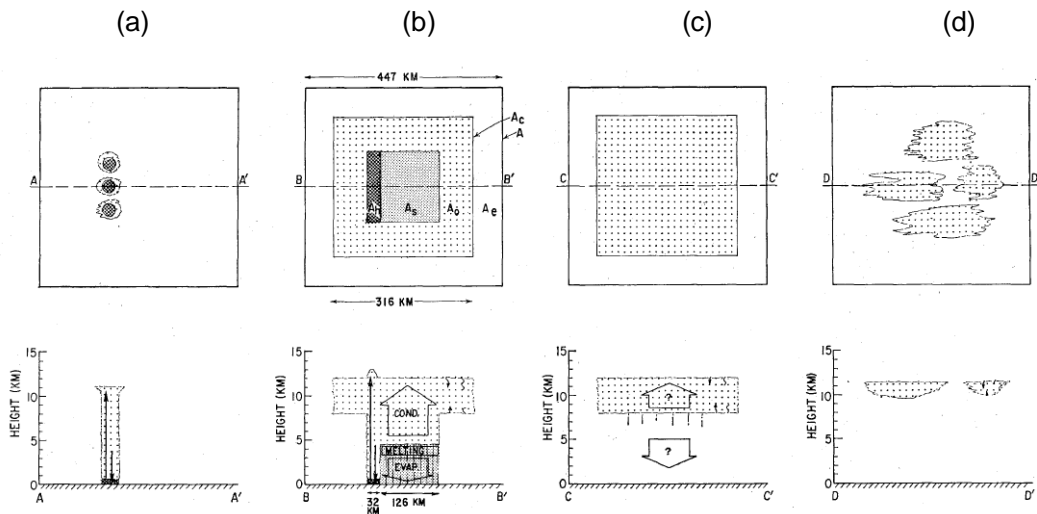


Figura 5.4 - Modelo conceitual do ciclo de vida dos sistemas convectivos determinados a partir de medições de radar (a) fase de iniciação; (b) fase de maturação; (c) fase de enfraquecimento; (d) fase de dissipação. Fonte: Houze (1982).

A cobertura de radares meteorológicos de superfície e a dependência de passagem de satélites com radares a bordo implicam no uso de outras fontes de dados para a detecção e caracterização de SCM no seu ciclo de vida. Na estimativa das áreas e as regiões de precipitação imersas nos SCM, comumente são utilizados dados de temperatura de brilho (TB) no canal infravermelho medidas por satélites geoestacionários. Uma série de trabalhos aplicaram diferentes técnicas para a detecção, rastreamento e caracterização de SCM a partir de dados de TB. Os limiares de temperatura usados na definição dos SCMs diferem na literatura, mas a maioria dos autores utiliza um limiar de temperatura inferior a -28°C (245 K) [MADDOX et al. 1980; MACHADO et al. 1998; ZIPSER et al. 2006; VILA et al. 2008; ANABOR et al. 2008; FIOLEAU et al. 2010]. A escolha do limiar de temperatura é arbitrária, a concordância do limite utilizado pela maioria dos autores concorda com a identificação de sistemas convectivos que penetram na alta troposfera. A topo da nuvem deve estar acima de médios níveis troposféricos (450 hPa) o que corresponde a uma altura de 9-10 km [MACHADO et al. 1998].

Machado et al. (1998) utilizou os limiares de temperatura de -28°C (245 K) e -55°C (218 K) no estudo de SCM em regiões tropicais e médias latitudes. Nesse trabalho foi avaliada a evolução e as características morfológicas dos SCM no seu ciclo de vida. Os resultados indicaram que SCMs com tempo de vida curto e áreas menores apresentaram uma menor taxa de expansão inicial e topos mais baixos em relação aos sistemas com tempos de vida longos e maiores áreas. O trabalho também constatou que velocidade de deslocamento dos SCM, determinada pelo deslocamento do centro de massa, acima de 30-40 m/s pode ser um indicativo de que o SCM se uniu a outro sistema ou se dividiu.

Anabor et al. (2008) usou três limiares de temperatura (-38°C , -45°C e -50°C) para caracterizar o ciclo de vida e evolução de SCM em relação as condições sinóticas. Os resultados mostraram que esses SCMs, de tempo de vida superior a 18 horas, se iniciam na região da Bacia do Rio da Prata e se deslocam em médios e baixos níveis (500 hPa e 850 hPa) no sentido leste ou sudeste, porém a região de desenvolvimento convectivo se desloca contra esse fluxo, no sentido norte e noroeste. Foram 10 SCM analisados por Anabor et al. (2008).

Fiolleau et al. (2010) utilizou três limiares de temperatura e no estudo do ciclo de vida de sistemas conectivos em regiões tropicais. Os limites de temperatura serviram para discriminar a convecção profunda (-68°C (205 K)), a área precipitante (-53°C (220 K)) e um limite de cumulusnimbus (-38°C (235 K)). Esses limiares de temperatura serviram como parâmetro para determinar a fração convectiva (FC) e precipitante (FP) dentro da área de cumulusnimbus (área total do SCM). As FC e FP são as razões das áreas imersas, -68°C e -53°C , respectivamente, na área total do SCM. A imagem mostrada na Figura 5.5 é a ilustração do comportamento de SCM no ciclo de vida descrito por Fiolleau et al. (2010). O ciclo de vida é dividido em três fases com diferentes características quanto à fração convectiva e fração precipitante. A fração convectiva aumenta até 25% do ciclo de vida do SCM e diminui até a sua dissipação. A fração precipitante se mantém constante até a metade do tempo de vida do SCM e passa a diminuir até a dissipação.

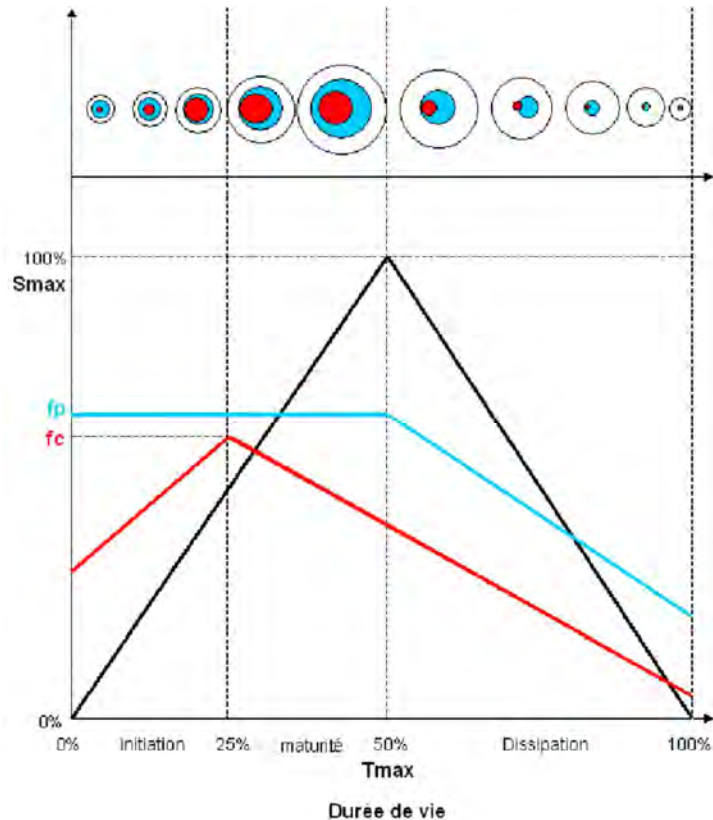


Figura 5.5 - Ilustração de modelos conceituais de superfície fria (preto), frações precipitantes (azul), e frações de chuva convectiva (vermelho) ao longo do ciclo de vida dos sistemas convectivos de monção. Fonte: Fiolleau (2010).

A fase de iniciação é o primeiro terço do ciclo de vida do SCM, caracterizada pelo aumento da área do SCM e da fração de chuva convectiva enquanto a fração precipitante se mantém constante. A fase madura do SC é o segundo terço do ciclo de vida do SCM. Nessa fase a área, a área continua aumentando, a fração convectiva passa diminuir e a fração precipitante se mantém constante. Na fase de dissipação, a área do SCM passa a diminuir até o fim do SCM, assim como as frações precipitantes e convectivas.

Vila et al. (2004) utilizou os valores de -38°C (235 K) e -63°C (210 K) com o objetivo de desenvolver e validar um algoritmo de rastreamento e previsão de características radiativas e morfológicas de SCM durante o seu ciclo de vida. As principais características desse algoritmo são (1) método de detecção do SCM baseado no limiar de -38°C (235 K); (2) técnica de acompanhamento do

SCM com base em sucessivas imagens e (3) método de previsão com base na evolução de cada SCM. Mattos et al. (2011) a partir desse algoritmo analisou a relação entre as propriedades físicas de SCM e a atividade elétrica de relâmpagos NS no estado de São Paulo, Brasil. Os resultados indicam que a maior taxa de ocorrência de relâmpagos ocorre próxima a máxima fração convectiva do SCM. Concordando com os resultados encontrados por Machado et al. (1998), a taxa de expansão do SCM nas fase inicial exerce uma influência sobre o tamanho do sistema e duração. Essas características indicam que processos de condensação e fluxo de massa durante a fase inicial dos sistemas pode proporcionar condições favoráveis para a eletrificação de nuvens e ocorrência de relâmpagos [MATTOS et al. 2011].

A ocorrência de sprites está relacionada com as características elétricas e físicas do sistema convectivo envolvido. Algumas questões necessitam ser melhor analisadas quanto as características necessárias para um sistema convectivo ser gerador de sprites e em que período do ciclo de vida do sistema é mais favorável a ocorrência do fenômeno. A atividade elétrica de relâmpagos está diretamente relacionada com as características dos SCMs. Sendo os relâmpagos NS fundamentais na geração de sprites e outros ELTs, as características dos SCM determinadas por TB de satélites geoestacionários são relevantes na avaliação dos sistemas que geraram os sprites.

6 DADOS

Neste trabalho serão utilizados os seguintes dados descritos nas sub-sessões seguintes

- Dados de localização (latitude, longitude) e horário de ocorrência de sprites obtidos a partir das filmagens realizadas em campanhas de observação de ELTs no Brasil;
- Dados de temperatura de topo de nuvem nos canais infravermelho (IR) e vapor d'água (WV) dos satélites GOES 10 e 12;
- Dados de relâmpago localização e polaridade dos relâmpagos e fornecidos pela rede RINDAT, e localização dos relâmpagos detectados pela Rede Mundial de Detecção de Relâmpagos (WWLLN).

6.1 Observação de sprites

Os dados de sprites foram obtidos em três campanhas de observação descritas a seguir.

Desde 2002 campanhas observacionais de ELTs vem sendo realizadas no Brasil e na América do Sul em colaboração com pesquisadores brasileiros e estrangeiros. Os ELTs possuem baixa intensidade luminosa, portanto o principal equipamento utilizado para a observação de ELTs são câmeras de vídeo sensíveis a baixos níveis de luminosidade.

Os ELTs ocorrem na região da atmosfera acima das tempestades e são necessárias condições meteorológicas adequadas para filmá-los, isto é: (1) uma tempestade com atividade elétrica a uma distância, entre ~200-1000 km do sítio de observação; (2) é fundamental céu claro, sem nebulosidade no sítio de observação; (3) considerando que as câmeras detectam baixos níveis de luminosidade, a fase da lua é importante, tendo em vista que influencia na luminosidade do céu.

As campanhas ocorridas no Brasil, realizadas de diferentes sítios de observação, possibilitaram filmagens de sprites em diversos estados no Brasil e países da América do Sul, que foram estudados neste trabalho. Os sistemas convectivos analisados geraram os sprites observados nas campanhas de observação realizadas em 2005, 2006 e 2007. As localizações desses sprites estão ilustradas na Figura 6.1.

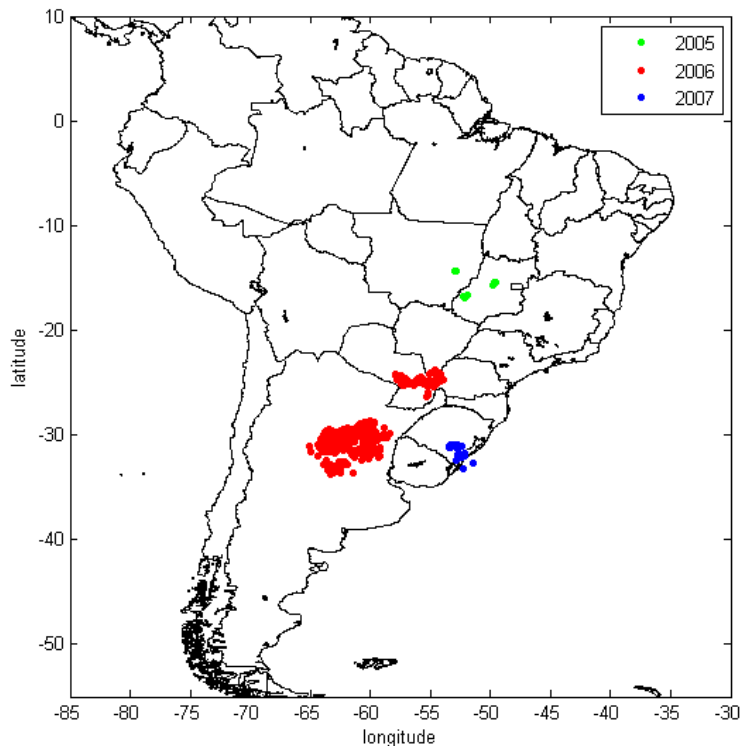


Figura 6.1 – Localização dos sprites observados analisados no trabalho de acordo com o ano da campanha de observação 2005 (verde), 2006 (vermelho) e 2007 (azul).

As observações realizadas em 2005 foram a partir do município de São João da Aliança, GO, (14.70°S , 47.52°W). Em apenas uma noite da campanha foi possível observar sprites. Foram documentamos 11 sprites na noite entre 25 e 26 de outubro.

As observações de ELTs realizadas em 2006 a partir do Observatório Espacial do Sul (OES/CRS – INPE) em São Martinho da Serra, RS, (29.53°S , 53.85°W) foram bem sucedidas. Nessa campanha foram observados mais de 300 sprites

sobre uma tempestade na Argentina, na noite de 22-23/fevereiro, e mais de 90 sobre uma tempestade no Paraguai, na noite de 03-04/março.

Em outubro de 2007 foi realizada a primeira campanha exclusivamente brasileira, isto é, com equipamento próprio e sem a colaboração de instituições de pesquisa estrangeiras. O sítio de observação foi novamente o Observatório Espacial do Sul (OES/CRS – INPE), localizado no município de São Martinho da Serra, RS. Durante a noite entre os dias 09 e 10 de outubro foram observados ELTs acima de uma tempestade sobre o sul do Brasil e norte do Uruguai.

6.2 Temperatura de topo de nuvem

Os dados de temperatura de topo de nuvem (TB) usados são os dos canais infravermelho (IR / 10.2 - 11.2 μm) e vapor d'água (WV / 6.5 - 7.0 μm) dos satélites GOES no período das campanhas.

Os satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) circulam a Terra em uma órbita geoestacionária, o que significa que eles orbitam o plano equatorial da Terra com uma velocidade correspondente à sua rotação. Isto possibilita ao satélite pairar continuamente sobre uma mesma posição na superfície, fornecendo assim o monitoramento contínuo de uma região [NOAA, 2009]. Os satélites GOES dão suporte principalmente à pesquisa e serviços de previsão do tempo, são operados pela *National Environmental Satellite, Data, and Information Service* (NESDIS), que atualmente conta com 5 satélites em operação, GOES-12, GOES-13, GOES-14 e GOES-15. O satélite GOES-12, designado *GOES-South*, está sobre o Equador em 60°W e sua área de cobertura é a América do Sul. No Brasil, os dados desses satélites são disponibilizados pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA/CPTEC - INPE) no formato binário e em projeção retangular.

Os dados utilizados no trabalho são os dos satélites GOES 10 e 12. O GOES-10 foi lançado em Abril/1997 e esteve em funcionamento até Dezembro/2009, possuía resolução temporal de 15 minutos. O GOES-12 foi lançado em

Julho/2001 e ainda se encontra em funcionamento. Entre Julho/2005 e Abril/2010 possuía resolução temporal de 30 minutos, desde Maio/2010 opera com resolução de 15 minutos. Ambos os satélites possuem sensores registrando radiação proveniente da Terra em seis faixas de comprimento de onda (canais) visível - VIS (0.53 – 0.75 μm), quatro canais no infravermelho - IR (3.8 – 4.0; 10.2 – 11.2; 11.5 – 12.5; 12.9 – 13.7 μm) e um no vapor d'água - WV (6.5 – 7.0 μm). A resolução para cada canal difere 1 km para o VIS, 4 km para o IR, 8 x 4 km² para o WV no Equador [NOAA, 2009]. A precisão de temperatura do GOES é de 0,4 K [NOAA, 2009].

A utilização desses dados visa monitorar o deslocamento e determinação das propriedades físicas do sistema convectivo em questão, e avaliar a intensidade da convecção por meio da capacidade de penetração das nuvens além da tropopausa (*overshooting*) na localização estimada dos sprites.

6.3 Parâmetros de relâmpagos

Foram usados dados de duas redes de detecção de relâmpagos, RINDAT e Rede Mundial de Detecção de Relâmpagos (*World Wide Lightning Location Network / WWLLN*). Embora a WWLLN não informe a polaridade do relâmpago, que é uma informação importante para este estudo, a WWLLN foi utilizada pois a rede brasileira não possui sensores de detecção em todas as regiões do Brasil e outros países da América do Sul nas quais foram observados os ELTs. A rede RINDAT informa a localização, polaridade e o pico de corrente do relâmpago, enquanto a rede WWLLN informa somente a localização e o pico de corrente. Além disso, duas tempestades observadas nas campanhas estavam sobre países da América do Sul, que não possuem uma rede local de detecção de relâmpagos. Como a WWLLN detecta relâmpago em todo o mundo, também foi utilizada nesses casos.

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) baseia-se na radiação eletromagnética gerada pelo relâmpago. A RINDAT possui sensores espalhados por diversos estados brasileiros e as localizações estão mostradas na Figura 6.2.

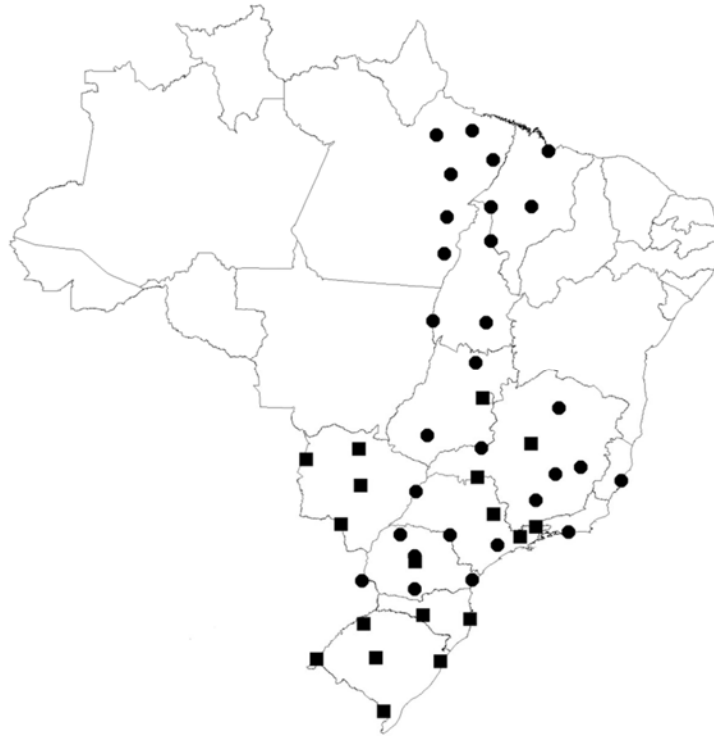


Figura 6.2 – Localização dos sensores da rede de detecção de relâmpagos RINDAT.

O sistema de detecção utiliza duas tecnologias de detecção combinadas método da direção magnética e método do tempo de chegada [NACCARATO et al. 2005].

O método da direção magnética utiliza sensores capazes de determinar a direção da descarga. Quando dois sensores detectam uma descarga, a interseção das retas determinadas pelos azimutes localiza o ponto de impacto da descarga. No caso de três ou mais sensores detectarem a descarga, o processo de triangulação mostrado na Figura 6.3, minimiza o erro, permitindo encontrar a Estimativa Ótima de localização da descarga [NACCARATO et al. 2005].

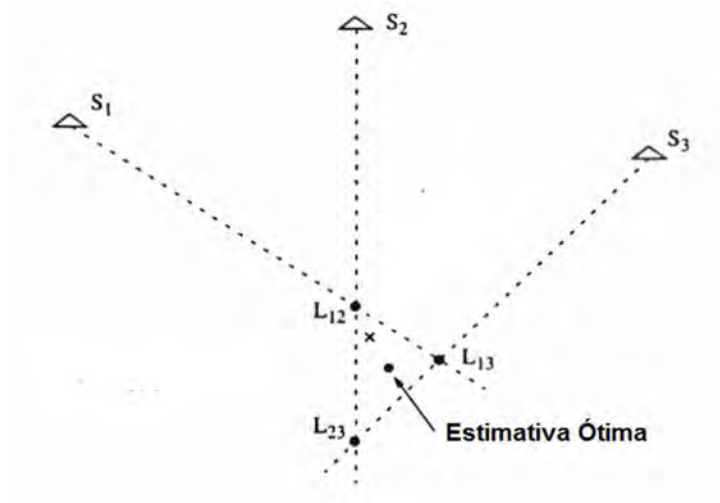


Figura 6.3 – Uso da triangulação para o Método da Direção Magnética na determinação da Estimativa Ótima de localização do relâmpago. Fonte Adaptado de Naccarato (2005).

O método do tempo de chegada utiliza sensores que detectam o horário de chegada da radiação eletromagnética gerada pela descarga. É feito o cálculo da diferença temporal relativa entre os tempos de chegada registrados pelos sensores, considerando para cada par de sensores uma hipérbole que satisfaz a diferença temporal medida. A hipérbole representa as possíveis localizações para o relâmpago. A interseção entre as hipérboles indica a localização do relâmpago [NACCARATO et al. 2005]. O desempenho de uma rede de detecção em localizar descargas NS dependem da eficiência da rede e da precisão de localização das descargas [NACCARATO et al. 2005].

A eficiência da rede e precisão na localização do relâmpago depende basicamente da probabilidade de cada sensor detectar ou não um relâmpago. Esta probabilidade de detecção irá depender do valor do pico de corrente do relâmpago, distância entre descarga e o sensor, número de sensores envolvidos na detecção e eventuais falhas técnicas no sistema.

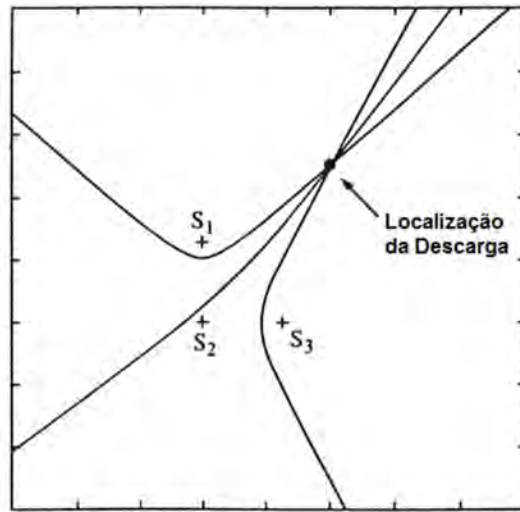


Figura 6.4 – Uso da intersecção hiperbólica para o Método do Tempo de Chegada para a localização do relâmpago.
Fonte Adaptado de Naccarato (2005).

7 METODOLOGIA

A seguir é apresentada uma descrição da metodologia a ser empregada na análise dos dados anteriormente descritos, desde a análise das filmagens aos parâmetros envolvidos na análise das características físicas dos sistemas convectivos.

7.1 Análise das filmagens de sprites

Localização as coordenadas dos sprites foram estimadas a partir dos dados de vídeo feitos em solo. O horário de ocorrência do sprite a ser considerado é o primeiro campo no qual o sprite é observado. As estimativas de localização dos sprites dependem da qualidade dos vídeos e são determinadas da seguinte forma

- Os vídeos são separados em quadros (*frames*);
- Os quadros são desentrelaçados e os campos (*fields*) formados pelo grupo de linhas pares e ímpares separadamente, que são gravados em instantes diferentes e são separados;
- Um software, que se baseia na posição das estrelas presentes no campo de visada da câmera é utilizado para estimar a localização dos eventos.

Estimativas das localizações dos sprites foram fornecidas pela *Utah State University* (USU) utilizando um software desenvolvido pela USU, para os anos de 2005 e 2006. Em 2007 as localizações estimadas dos sprites foram feitas no INPE utilizando-se o software *StarStereo*.

Erro na localização Com base nas localizações estimadas para cada sprite foram determinadas suas distâncias em relação ao sítio de observação. Essas distâncias serviram como parâmetro para o cálculo do erro na localização do sprite. O erro na localização do sprite considera, além da distância do sítio de observação, a altura assumida para o topo do sprite. Nesse trabalho foi

assumida a altura de 90 km para o topo do sprite. Essa hipótese é válida uma vez que a altura medida, utilizando a técnica de triangulação é 88 ± 5 km para o topo do sprite [SENTMAN et al., 1995]. Foi determinado um círculo de erro em torno da localização do sprite a partir do gráfico mostrado na Figura 7.1, na qual x é a distância entre o sprite e o sítio de observação. Foi feito um ajuste no gráfico para determinar a função que representa o erro de localização do sprite utilizando o software OriginPro 8.

O raio de erro de localização do sprites é determinado pela equação

$$f(x) = B1x^3 + B2x^2 + B3x + Intercept \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde x é a distância entre o sprite e o sítio de observação, os valores de $B1$, $B2$, $B3$ e $Intercept$ estão na Figura 7.1. Para todos os sprites com localização estimada foi determinado um raio de erro.

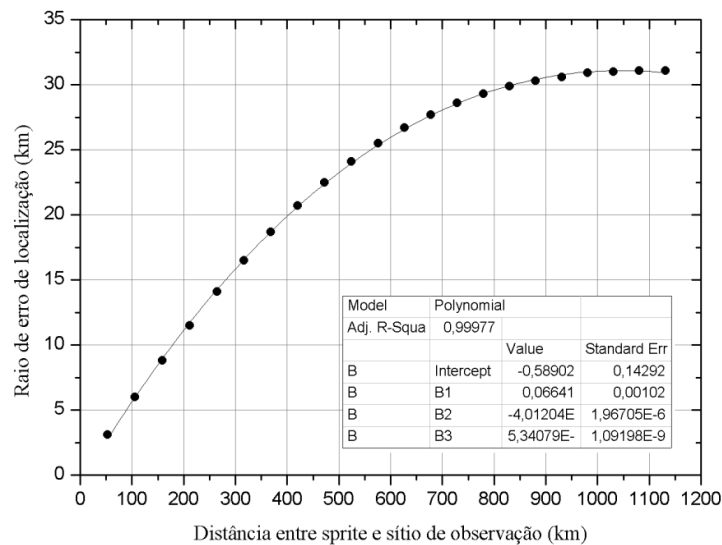


Figura 7.1 - Erro de localização dos sprites assumindo que o topo esteja em 90 km de altitude.

Cada conjunto de quadros que formam um sprite observado foi denominado como um evento. As localizações dos sprites nos anos de 2005 e 2006 foram consideradas para cada evento, ou seja, cada sprite está identificado com uma localização e horário de ocorrência.

No ano de 2007 a localização estimada dos sprites foi feita utilizando-se o software *StarStereo*. Devido à qualidade das filmagens e ao funcionamento do software, em cada evento de 2007 foi determinada mais de uma localização para os sprites. A imagem mostrada na Figura 7.2 é um exemplo da metodologia aplicada para os sprites observados em 2007. O quadrado amarelo indica que o evento foi classificado como sprite múltiplo (SM), uma vez que é formado por três unidades de sprite (US). Com o *StarStereo* estimamos as localizações de cada US, ou seja, três localizações para esse evento. Para 2007 será considerada a localização do grupo estimada como o centro geométrico das localizações de cada unidade de sprite.

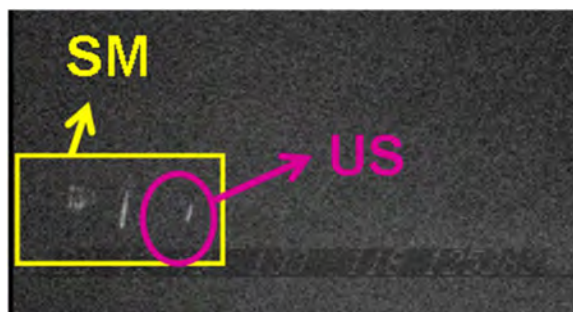


Figura 7.2 – Exemplo de um evento de sprite múltiplo, com três unidades de sprite, observado em 2007.

7.2 Descrição da técnica de monitoramento do SC

Nessa seção é apresentada a técnica usada e para o monitoramento dos SC e determinação de suas características. O monitoramento do SC foi feito com dados de TB do satélite GOES 10 e 12 no canal IR em projeção retangular. A seleção da área é feita manualmente, pois são poucos os sistemas convectivos analisados.

Georreferenciamento dos dados de satélite: os dados de satélite são disponibilizados em formato binário e inicialmente são dispostos em uma matriz. Essa matriz é georreferenciada com base nos pontos de máxima e mínima latitude dos dados e distribuídos de acordo com a resolução do satélite (0,04° para GOES-10 e 12). Para os dados do satélite GOES 10, os pontos

extremos de longitude são (-100°; -28.04°) e latitude (-50°; 21.96°) e para o GOES 12 são (-100; -25.24) e (-56; 12,52).

Identificação: o próximo passo consiste em identificar o início do SC a ser monitorado. Com os dados georreferenciados, foram criadas as imagens com a localização e horário de ocorrência dos eventos. Através de análise visual do SC ao longo do tempo de vida, foram identificadas as células convectivas que deram início ao sistema convectivo. Foi considerado o horário de início do SC quando a área formada por pixels com $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ atinge 80 km².

Acompanhamento do SC: o acompanhamento do SC foi feito utilizando imagens sucessivas do satélite com base na metodologia usada por Vila et al. [2008], descrita a seguir. A área do sistema considerada foi determinada pela isoterma de -38°C (235 K). Sendo a resolução do satélite de 4 km x 4 km, a área do sistema é a soma dos pixels com $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ multiplicada por 16. No acompanhamento do sistema ocorrem três situações diferentes na determinação do SC a serem consideradas continuidade, divisão e junção. Em caso de continuidade considera-se o mesmo SC, em caso de divisão, o acompanhamento segue no SC com maior área e em caso de junção de SCs, considera-se a área total entre eles. Estas situações estão exemplificadas na imagem mostrada na Figura 7.3.

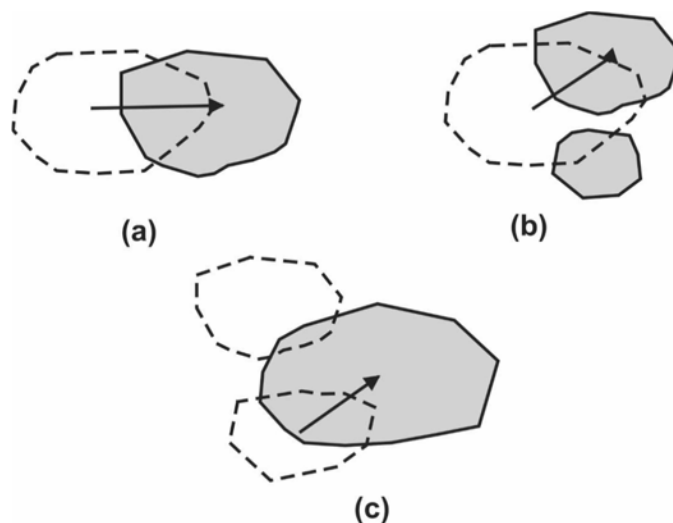


Figura 7.3 - Representação esquemática do acompanhamento do SC em situação de (a) continuidade, (b) divisão e (c) junção. As setas representam a evolução do sistema. As linhas tracejadas representam o sistema em um passo anterior no tempo de sua evolução e as linhas sólidas representam a evolução do sistema.
 Fonte: Vila (2008).

Foi considerado como início do SC o horário em que a área formada pelos pixels com $TB \leq -38^{\circ}\text{C}$ é superior a 80 km^2 . Para o término do SC foi assumido o horário em que é observado o último pixel com $TB \leq -38^{\circ}\text{C}$. Foi assumido como o horário em que o SC atinge a maturação como o horário de área máxima formada pela pelos pixels com $TB \leq -38^{\circ}\text{C}$. Também foi monitorada a região com atividade convectiva mais profunda dos sistemas, considerando-se os topos com temperatura menor que -63°C (210 K).

Acompanhamento dos relâmpagos dos SCs: foi criado um critério espacial e outro temporal para selecionar os relâmpagos associados a cada SC estudado. Temporalmente os relâmpagos foram selecionados 7,5 minutos antes e 7,5 minutos depois do horário dos dados de satélite. Espacialmente foram selecionados todos os relâmpagos localizados no interior da área do SC monitorado, definido pelo limiar de $T \leq -38^{\circ}\text{C}$. Essa seleção de dados dentro da área de interesse em sucessivas imagens dados de satélite permitiu o acompanhamento da região das nuvens onde ocorreram os relâmpagos ao longo da vida do SC.

Parâmetros analisados: uma vez identificado o SC gerador de sprites e os relâmpagos produzidos por eles e detectados pelas redes de detecção utilizadas, foi possível colocar uma série de parâmetros que foram utilizados para analisar e caracterizar os SCs produtores de ELTs e a sua produção de sprites.

- **Área:** área total do sistema convectivo, determinada pela soma dos pixels com $T \leq -38^{\circ}\text{C}$ (235K), em km^2 ;
- **Centro do SC:** centro geométrico da figura formada pelos pixels selecionados pela área determinada;
- **Temperatura média de brilho (T_{med}):** temperatura média entre todos os pixels do SC, em $^{\circ}\text{C}$;
- **Temperatura mínima de brilho (T_{min}):** temperatura mínima entre todos os pixels do SC, em $^{\circ}\text{C}$;
- **Total de relâmpagos nuvem-solo (NS):** total de relâmpagos que ocorreram na área selecionada pela isoterma, em $(15\text{min})^{-1}$.
- **Fração Convectiva (FC):** percentual que a área de $T \leq -63^{\circ}\text{C}$ ocupa na área total do SC ($T \leq -38^{\circ}\text{C}$);
- **Direção de deslocamento:** expressa através do azimute determinado pelo deslocamento do centro geométrico entre duas imagens sucessivas;
- **Velocidade (Vel):** determinada pela distância entre o centro do SC entre duas imagens, em km/h .

$$vel = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

ΔS distância entre dois centros de massa (km);

Δt intervalo de tempo entre duas imagens (horas).

- **Densidade de raios:** a razão entre o total de relâmpagos pela área do sistema convectivo, em NS/km²;

7.3 Identificação do relâmpago gerador de sprites

Foi feita uma seleção de todos os relâmpagos NS que tiveram uma diferença de tempo de 500 ms e distância horizontal de 200 km em relação aos sprites. O objetivo dessa seleção é avaliar a polaridade predominante dos relâmpagos NS que ocorreram próximos e no horário de ocorrência dos sprites.

Dentro desse conjunto foram utilizados dois critérios com o intuito de identificar os prováveis relâmpagos geradores dos sprites (1) atraso máximo de 100 ms entre sprite e o relâmpago; (2) distância horizontal máxima de 200 km entre localização do sprite e o relâmpago. Dentre os relâmpagos que preencheram esses requisitos, foram identificados aqueles que tiveram menor atraso e distância horizontal em relação ao sprite, que serão considerados os prováveis geradores dos sprites. Sabendo quais são esses relâmpagos, foram analisados:

- A distância horizontal entre os sprites e o relâmpago gerador;
- Atraso entre os sprites e o relâmpago gerador.

7.4 Penetrabilidade das nuvens

A metodologia utilizada para determinar as temperaturas de topo de nuvem associadas aos sprites foi determinada pela localização estimada e o círculo de erro de localização. Para ter melhor representatividade da temperatura de topo de nuvem em relação aos sprites, foi determinada a temperatura média no círculo de erro de localização dos sprites.

A diferença entre as medidas dos canais de vapor d'água (WV / 6.5 - 7.0 μm) e infravermelho (IR / 10.2 - 11.2 μm) do satélite GOES para o topo da nuvem nas localizações estimadas dos sprites e seus círculos de erro, é dada por ($\Delta T = T_{\text{WV}} - T_{\text{IR}}$) é um importante parâmetro que permite avaliar a profundidade da

tempestade e inferir o quão penetrativas são as nuvens. Machado et al. (2005) encontrou que valores de WV-IR maiores que -15°C estão associados com nuvens com potencial para a alta atividade elétrica. Os processos físicos por trás desses resultados indicam que WV-IR são associados com nuvens profundas próximas à tropopausa ou topos de tempestade penetrantes na estratosfera (do inglês, *overshooting cloud tops*).

Os dados de satélite associados aos sprites foram selecionados com um intervalo de tempo de 15 minutos do horário de ocorrência do fenômeno (7,5 minutos antes e 7,5 minutos depois).

8 RESULTADOS: ESTUDO DE CASOS

8.1 25-26 de Outubro de 2005

Em 2005 as observações de ELTs foram a partir de um sítio de observação no município de São João da Aliança, GO. Foram documentamos 11 sprites na noite entre 25 e 26 de outubro. As imagens mostradas na Figura 8.1 são exemplos de 1 grupo de sprites, considerando um evento, observado na campanha, que persistiu por dois quadros.

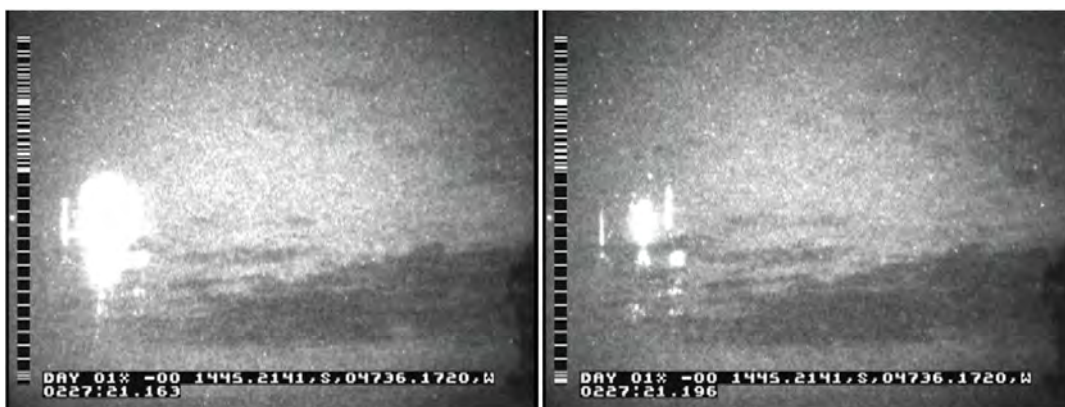


Figura 8.1 – Grupo de sprites observado sobre os estados de Goiás e Mato Grosso (25-26/10/2005), durante campanha de observação de ELTs, a partir do município de São João da Aliança, GO.

Os sprites foram observados entre 23:00 UTC do dia 25/10 e 01:30 UTC do dia 26/10, por um período de ~2,5 horas de observação dos eventos. Um total de 11 eventos; observados sobre dois diferentes sistemas convectivos SC1 e SC2. Esses sistemas convectivos estão mostrados na Figura 8.2, bem como a localização dos eventos observados e seus respectivos círculos de erro.

No SC1 os sprites foram observados entre 23:00 UTC e 00:00 UTC sobre duas regiões diferentes do sistema convectivo, Região 1 e 2, mostradas na Figura 8.2(a) e (b), respectivamente. Foram observados dois sprites na Região 1 e quatro sprites na Região 2. Cinco sprites foram observados no SC2 no período entre 01:00 e 01:30 UTC. O SC2 está mostrado na Figura 8.2 (c).

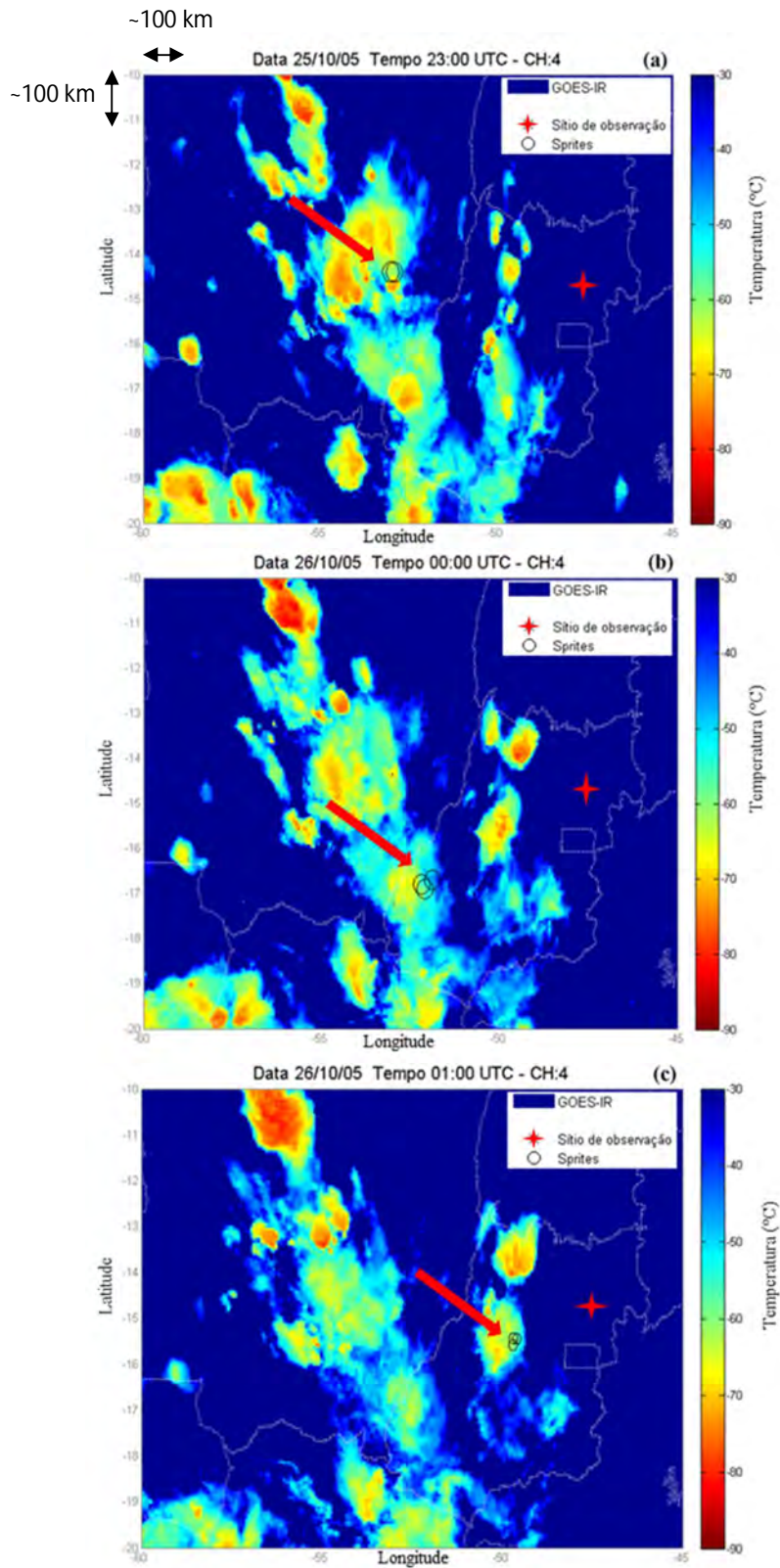


Figura 8.2 – Diferentes sistemas convectivos onde foram observados sprites em 2005, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro. (a) 2300 SC1 (Região 1); (b) SC1 (Região 2); (c) SC2.

A Figura 8.3 mostra o deslocamento do SC1 determinado através do seu centro geométrico. O SC1 teve início às 15:30 UTC do dia 25 de Outubro e um tempo de vida de 21 horas, chegando ao fim às 12:30 UTC do dia 26 de Outubro.

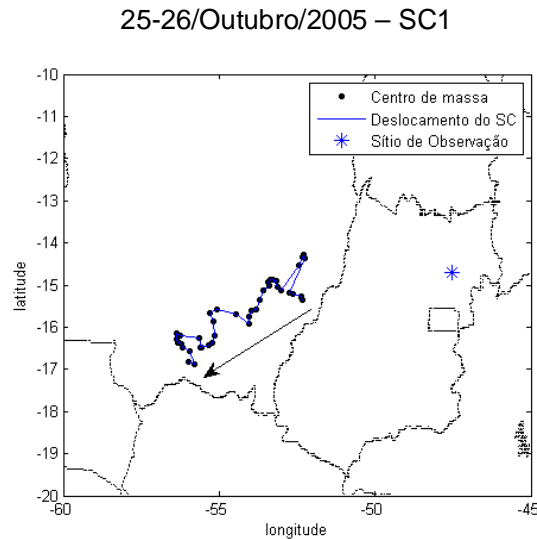


Figura 8.3 – Deslocamento do sistema convectivo (SC1) sobre o qual foram observados 6 sprites.

A área do SC1 está mostrada na Figura 8.4(a) e indica que o sistema apresentou um rápido crescimento até às 21:00 UTC, horário em que atingiu a maturação. O sistema atingiu a extensão horizontal máxima de $214,8 \times 10^3$ km², 5,5 horas após o seu início. Após atingir a maturação o SC1 decresceu até o seu fim. O período entre a maturação e fim do SC1 foi de 15,5 horas, indicando que o sistema atingiu a maturação na primeira metade do ciclo de vida. No período de 1 hora, entre 23:00 e 00:00 UTC (indicado pela linhas vermelhas), seis sprites foram observados. Os sprites foram observados 7,5 horas após o início do sistema, entre a maturação e fim do SC1 quando este apresentou áreas entre 140×10^3 e 160×10^3 km².

O gráfico (b) na Figura 8.4 indica a área de topos frios do SC1, definida como a área do sistema com $T \leq -63^\circ\text{C}$. Essa área foi observada 30min após o início do SC1 e apresentou maiores valores entre o início e maturação do sistema. A maior área com $T \leq -63^\circ\text{C}$ foi observada às 20:30 UTC, 30min antes do SC1

atingir a maturação. Entre 20:30 UTC e 01:30 UTC essa área diminuiu significativamente, variando de 72×10^3 para $3,5 \times 10^3$ km² em 5 horas. Foi nesse período de decréscimo que os sprites foram observados.

A fração convectiva (FC) do SC1, mostrada na Figura 8.4(b), apresentou maiores valores entre o início e maturação do SC1. A máxima FC, de 53 %, foi observada às 17:30 UTC, 3,5 horas antes do SC1 atingir a maturação. Após o máximo, a FC diminuiu com pequenas oscilações até o fim do sistema. No período de decréscimo da FC do SC1 foram feitas as observações dos sprites.

O gráfico (c) na Figura 8.4 mostra a temperatura média (T_{med}) do SC1 ao longo do seu tempo de vida. A T_{med} do sistema apresentou valores mínimos entre o início e maturação do SC1, sendo a T_{med} mínima observada duas horas após o início do SC1. Após às 19:00 UTC a T_{med} do SC1 aumentou até o fim do sistema, com algumas oscilações. Esse período de aumento da T_{med} do sistema ocorreu no horário em que os sprites foram observados. A T_{med} do sistema convectivo apresentou uma variação inversamente à FC; o aumento da T_{med} do SC1 representou uma diminuição da sua FC.

A taxa de ocorrência de relâmpagos NS (NS- em preto e NS+ em vermelho) está mostrada na Figura 8.4(d). Um total de 567 relâmpagos NS foi detectado pela rede RINDAT no SC1, sendo a maioria de NS-, ~70% do total. A taxa de ocorrência de relâmpagos é maior nas horas iniciais do SC1. No período entre início e maturação foram detectados pela rede 405 NS, sendo ~77% de NS-. Ao longo da vida do SC1 a taxa de NS- permaneceu maior do que NS+, com exceção de dois períodos, após 01:30 UTC, e entre 22:30 e 00:15 UTC. Entre a maturação e o fim do SC1 a taxa total de NS diminuiu, porém a taxa de NS+ aumentou. Nesse período foram observados os sprites e um total de 162 NS, sendo ~55% NS+. A Figura 8.4(d) indica que a taxa de ocorrência de relâmpagos NS possui uma relação com a FC e T_{med} do sistema. A maior taxa de incidência de NS ocorre nos período de máxima FC e mínima T_{med} . O fato da FC atingir valor máximo 2 horas após o início do SC1, indica o desenvolvimento de áreas convectivas mais intensas nesse período e, portanto, favoráveis a uma maior atividade elétrica. A T_{med} com valores baixos

também indica a presença de topos de nuvens mais profundos no sistema o que é indicativo de uma maior atividade convectiva e elétrica do SC.

Os resultados da análise desse caso indicam que após o SC1 atingir uma grande área, valor máximo de FC e alta atividade de relâmpagos NS no início do tempo de vida, o sistema se estabiliza em tamanho. Essa característica é evidenciada pela pouca variação da área do SC após o sistema atingir a maturação, incluindo o horário de ocorrência dos sprites. Os sprites foram observados com a área do SC1 estabilizada, a FC em decréscimo e uma reversão entre a taxa de ocorrência de NS- e NS+. O processo indica que o SC1 foi fortemente eletrificado na extensa área estratiforme que o sistema construiu após a dissipação da região convectiva imersa no sistema.

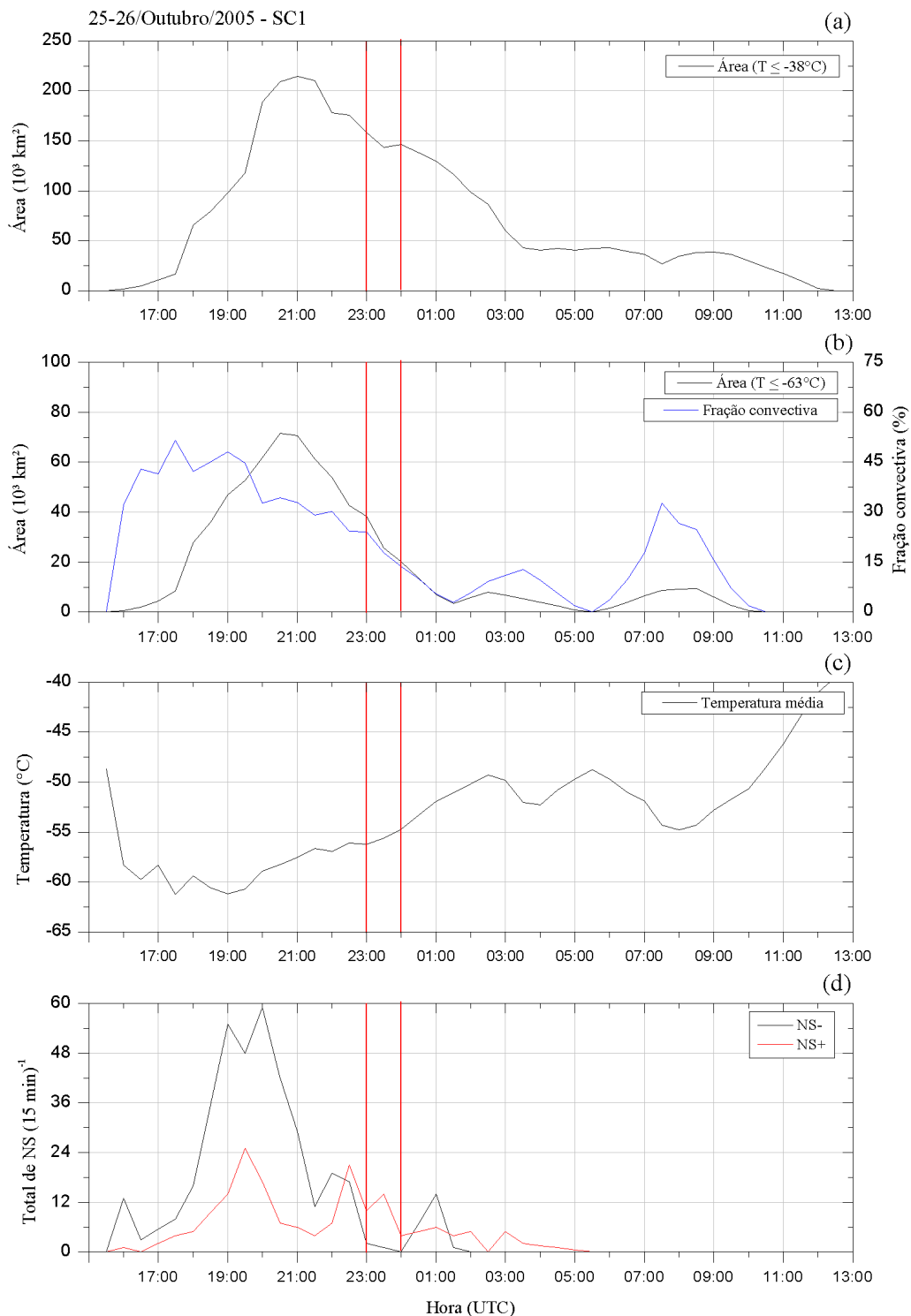


Figura 8.4 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

O gráfico na Figura 8.5 mostra a taxa de ocorrência de sprites (15 min^{-1}) em relação a densidade de relâmpagos NS e a FC em um período de 7 horas, e 3 horas posteriores ao período em que os sprites foram observados, que durou 1 hora. Uma hora antes dos primeiros sprites serem observado, a FC era superior a 30%. Ela decaiu de 24% para 10% entre o primeiro e último sprite, portanto todos os sprites observados ocorreram quando a FC estava decaindo. Trinta minutos antes de o primeiro sprite ser observado a densidade de NS+ no SC1 passou a ser maior que de NS- e permaneceu assim durante todo o período em que os sprites foram observados. Essa característica indica uma maior taxa de ocorrência de NS+, principal gerador de sprites.

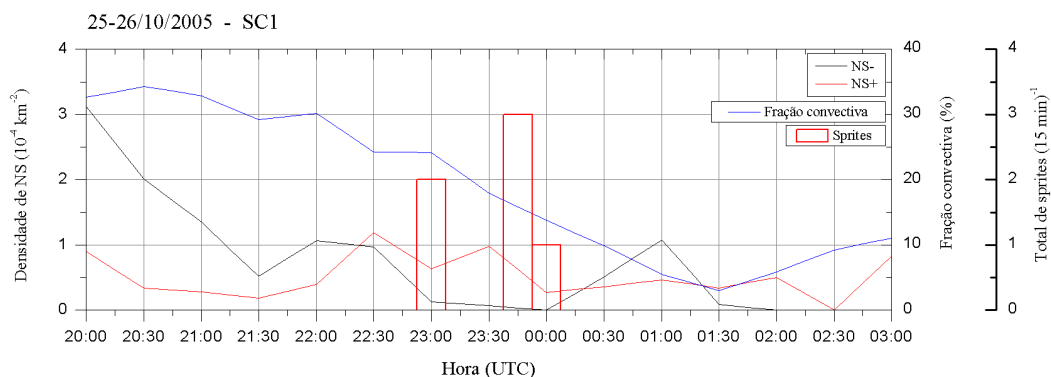


Figura 8.5 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min^{-1}).

As imagens mostradas nas Figuras 8.6 (Região 1) e 8.7 (Região 2) são referentes ao sistema convectivo analisado. Nos dois sprites observados na Região 1 observamos uma área convectiva mais intensa às 22:00 UTC. Às 22:30 UTC essa área perde intensidade e há a ocorrência de relâmpagos NS+. No horário das 23:00 UTC, a região convectiva em dissipação, responsável pela geração dos sprites, perde mais intensidade e os sprites ocorrem nesse horário.

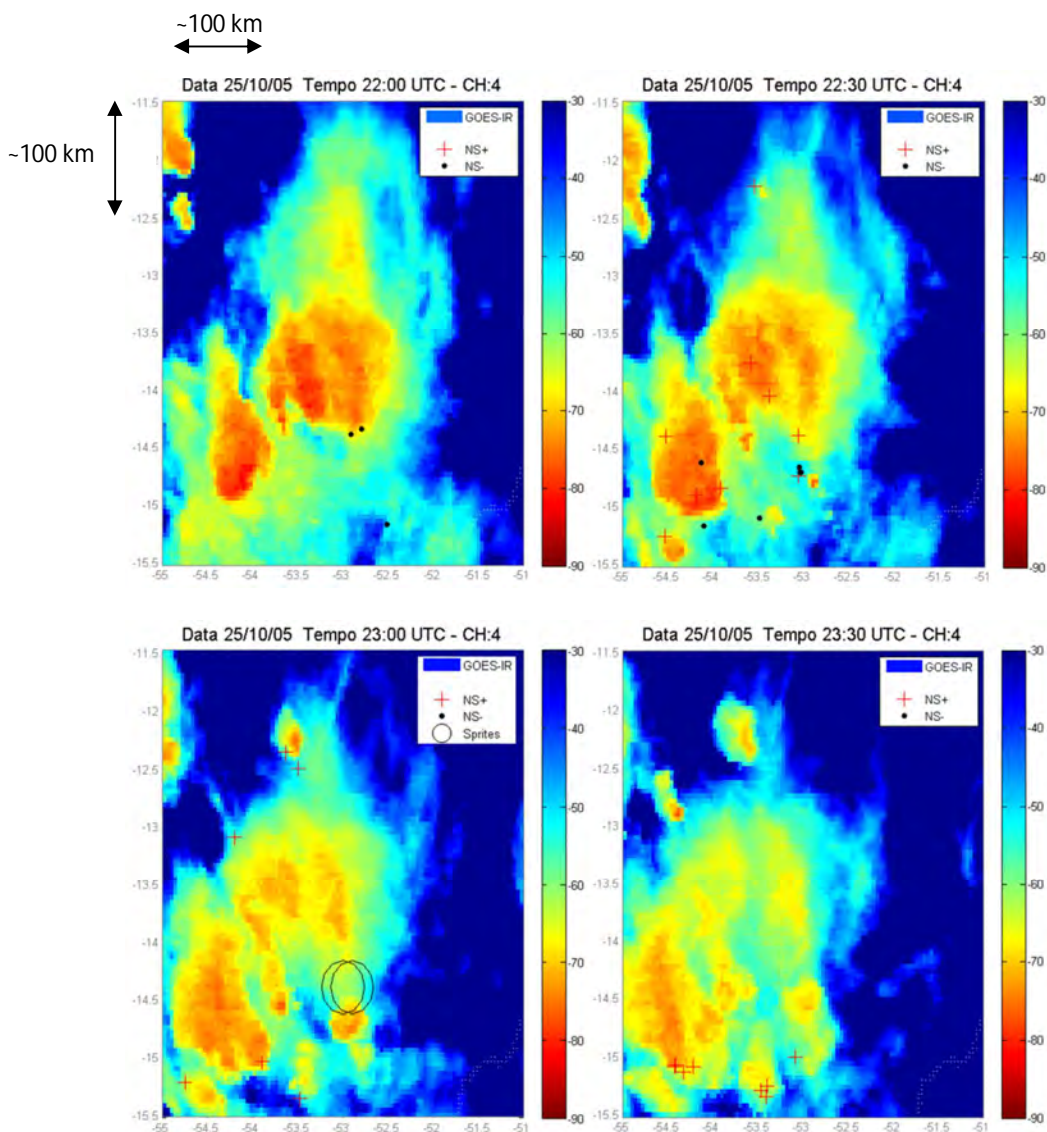


Figura 8.6 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 (SC1 – Região 1) com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.

Na Região 2 (Figura 8.7), a imagem das 22:30 UTC mostra uma intensa área convectiva onde ocorreu a maior quantidade de relâmpagos NS. No horário das 23:00 essa área convectiva ficou mais fraca, evidenciando, um espalhamento, até que no horário das 23:30 UTC, mantendo essas mesmas características, ocorreu o primeiro sprite observado. Às 00:00 UTC, com a região convectiva em dissipação, foram observados mais três sprites.

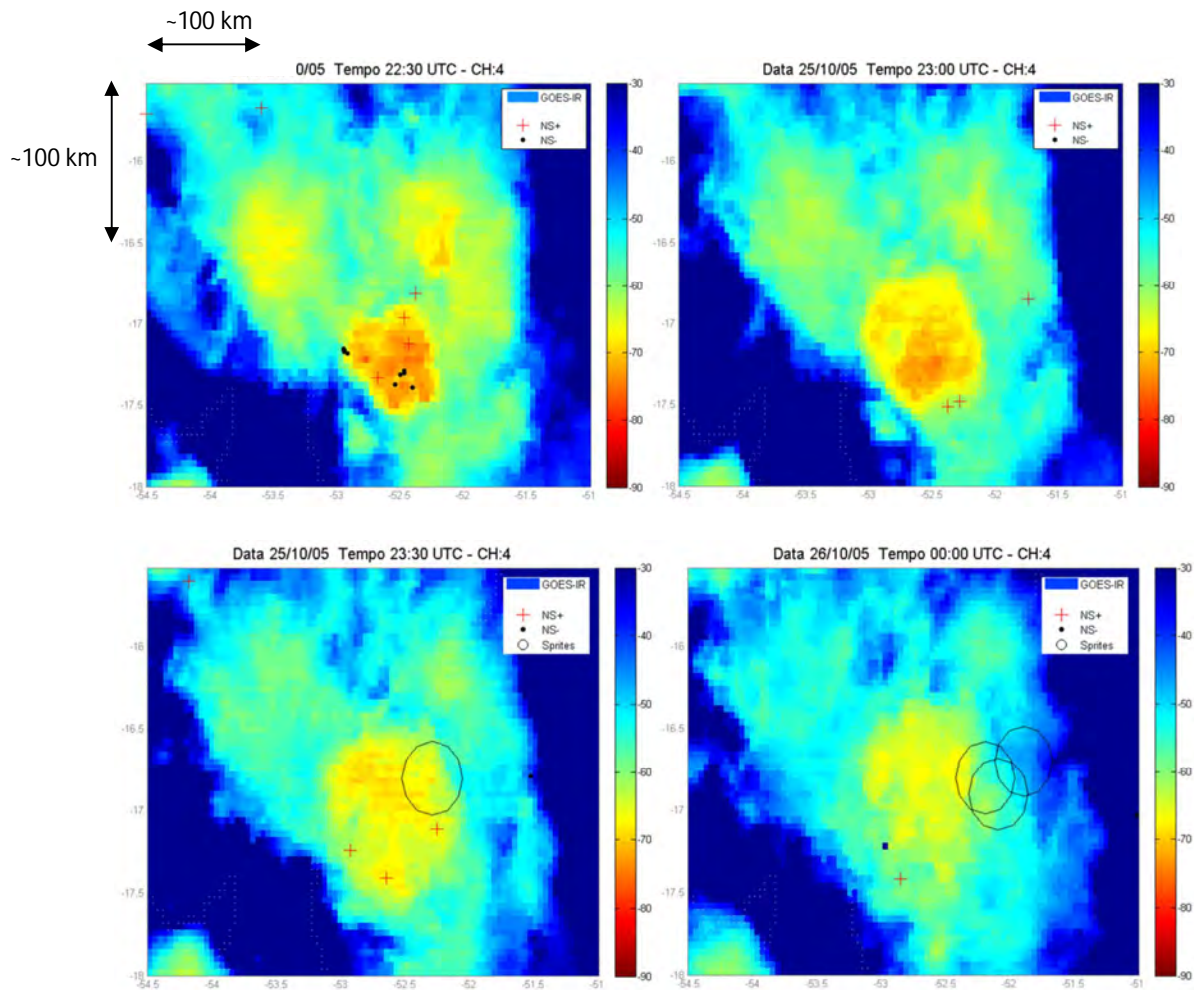


Figura 8.7 - Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 (SC1 – Região 2) com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.

A Figura 8.8 mostra o deslocamento do SC2 que teve início às 17:00 UTC do dia 25 de Outubro e um tempo de vida de 16,5 horas, chegando ao fim às 09:30 UTC do dia 26 de Outubro.

25-26/Outubro/2005 – SC2

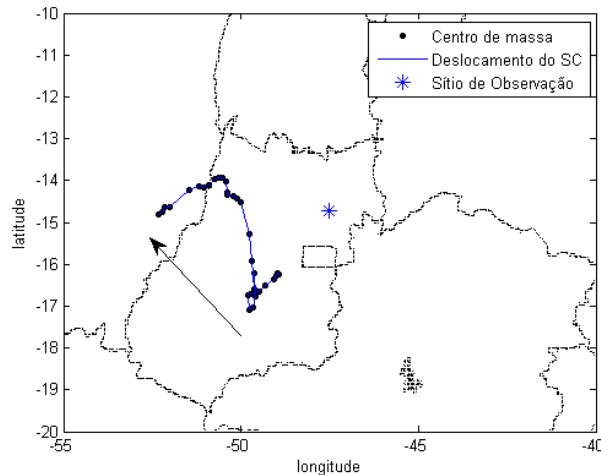


Figura 8.8 – Deslocamento do sistema convectivo (SC2) sobre o qual foram observados 5 sprites.

A Figura 8.9(a) mostra a área do SC2 e indica que o sistema atingiu a maturação 6,5 horas após seu início, às 23:30 UTC com área de $65,1 \times 10^3$ km². Após a maturação o SC2 diminuiu até 01:30 UTC, e depois se uniu a outro sistema convectivo. Os cinco sprites observados nesse sistema ocorreram entre 01:00 e 01:30 UTC, período em que a área do SC2 esteve decrescendo de $42,1 \times 10^3$ para $24,5 \times 10^3$ km², antes de se unir ao outro sistema convectivo.

A área com $T \leq -63^\circ$ C, indicativa de topos frios do SC2, mostrada na Figura 8.9(b), apresentou um pico com a maturação do SC2, às 23:30 UTC, depois decresceu até o SC2 unir-se com outro sistema convectivo às 01:30 UTC. Os sprites foram observados entre 01:00 e 01:30 UTC, período em que a área dos topos frios estava em decréscimo.

A FC apresentou um aumento inicial até às 21:30 UTC, após pequena variação, voltou a aumentar até a maturação do SC2 (Figura 8.9(b)). Sprites foram observados entre 01:00 e 01:30 UTC, período em que a FC estava aumentando. A FC do SC2 apresentou característica oposta a do SC1, que diminuiu no período de observação dos sprites. Embora a área do SC e dos topos frios estivesse decrescendo, a primeira apresentou uma variação muito

maior que a segunda. Entre 00:00 e 01:30 UTC a área do SC2 diminuiu pela metade, variando de 50×10^3 até $24,5 \times 10^3$ km², enquanto que a área de topos frios diminuiu de 5,5 para $4,5 \times 10^3$ km², implicando assim em um aumento na fração convectiva no SC2 no horário de ocorrência dos sprites.

A T_{med} do SC2 no período em que foram observados os sprites, diferentemente do SC1, estava diminuindo. O motivo dessa característica se deve ao mesmo motivo da FC aumentar nesse horário, isto é, uma maior quantidade de topos de nuvens mais profundos no sistema.

A Figura 8.9(d) mostra a taxa de ocorrência de relâmpagos NS no SC2. Um total de 376 relâmpagos NS foi detectado ao longo da vida do SC2, sendo 333 NS- e 43 NS+. Nas 6,5 horas entre o início e maturação do SC foram detectados 204 NS. Nesse período ~87% dos relâmpagos era NS-. Entre a maturação e fim se passaram 10 horas, nesse período ocorreram 172 NS, sendo ~90% NS-. Diferentemente do SC1, a taxa de NS- aumentou entre a maturação e fim. Essa característica se deve ao fato do SC2 unir-se a outro sistema. Essa união aumentou a área e a região de topos frios do SC2, conseqüentemente influenciando a FC, a T_{med} , e a ocorrência de NS, uma vez que prolongou o tempo de vida do sistema.

Os resultados da análise do SC2, até a união deste com outro sistema, são semelhantes ao encontrado para o SC1. O sistema atingiu uma grande área, altos valores de FC e alta atividade de relâmpagos NS até que a área passou a diminuir. Os sprites foram observados durante o decréscimo da área, aumento da FC e diminuição da T_{med} do sistema. No geral, o processo indica que o SC2 foi fortemente eletrificado. O aumento da FC do sistema indica que a área de topo frio mais significativo no SC e pode estar associado ao surgimento de novos núcleos convectivos.

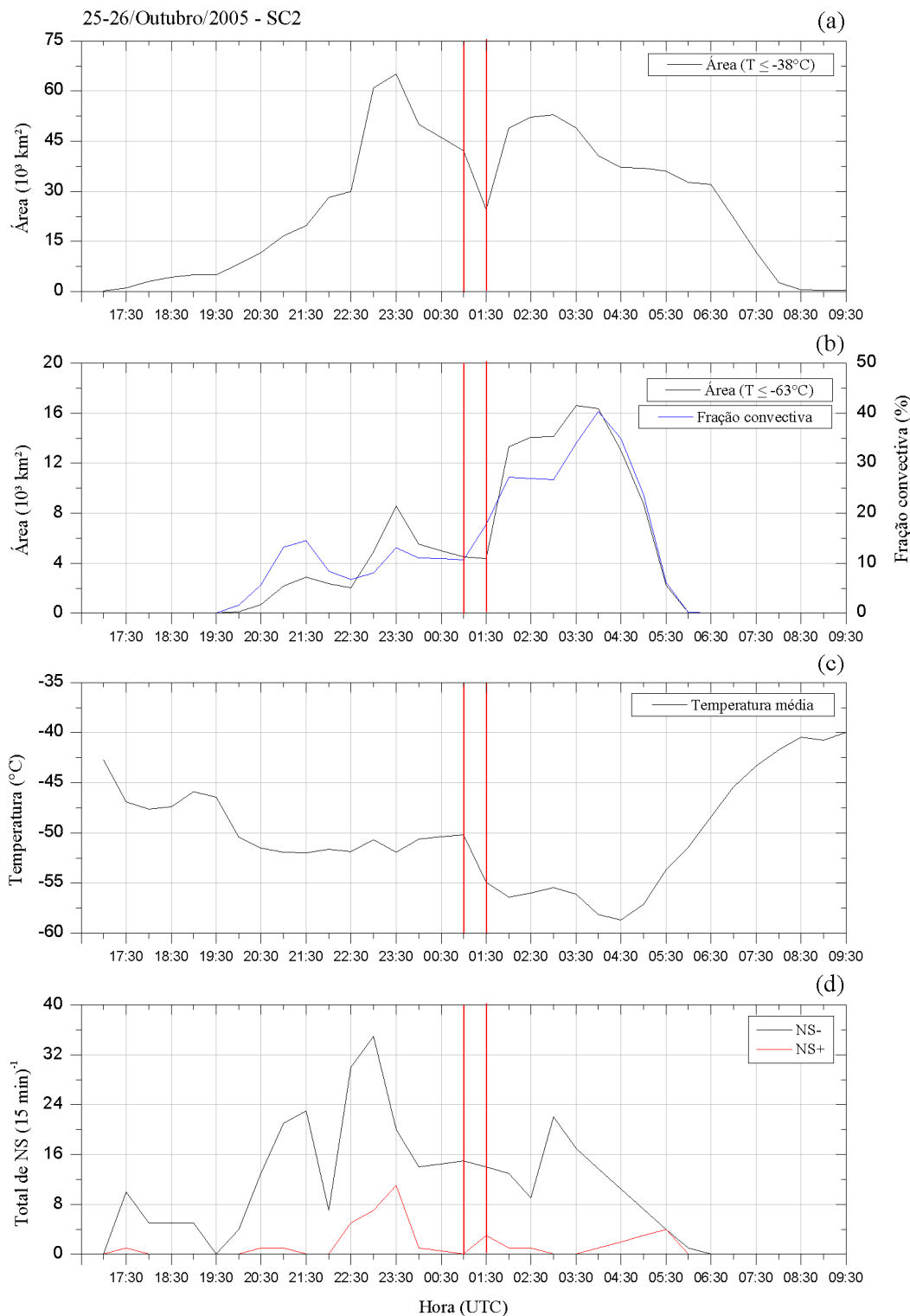


Figura 8.9 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

A Figura 8.10 mostra que todos os sprites foram observado quando a FC estava crescendo. A densidade de NS- se manteve maior do que a de NS+. Considerando os dados de densidade de 15 minutos que antecederam os sprites, os cinco sprites foram observados com o aumento da densidade de NS- e NS+, indicando uma maior atividade elétrica de NS durante a ocorrência dos sprites.

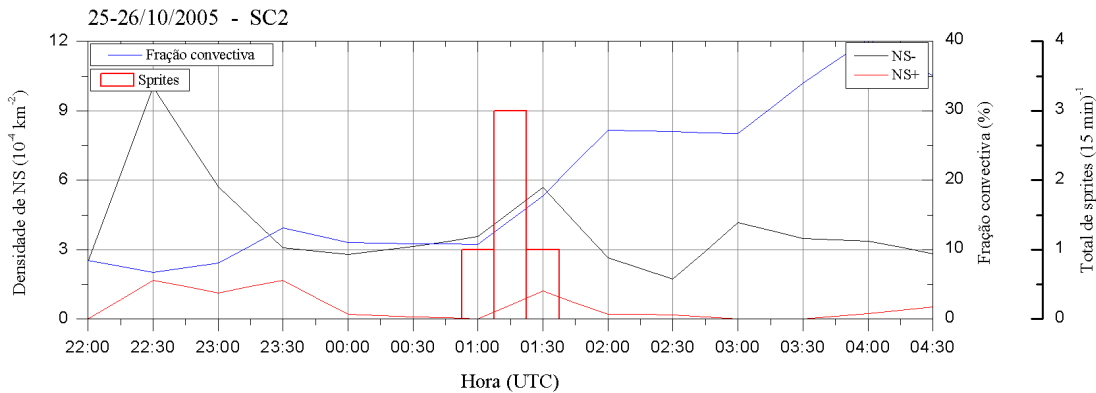


Figura 8.10 – Densidade de relâmpagos ($10^{-4} / \text{km}^2$), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min^{-1}) no tempo, 3 horas antes e depois do primeiro sprite observado.

No outro SC sobre o qual foram observados sprites em 2005, o SC2, foi registrada uma maior quantidade de relâmpago nas áreas convectivas do SC mostradas nas imagens de 23:30 e 00:00 UTC. No horário de 01:00 UTC a área convectiva mostrou um enfraquecimento e ocorreram três sprites. No horário de 01:30 UTC foram observados mais 2 sprites na mesma área dos anteriores.

Foi registrada uma maior quantidade de relâmpagos nas áreas convectivas do SC mostradas nas imagens de 23:30 e 00:00 UTC. No horário de 01:00 UTC a área convectiva mostrou um enfraquecimento e ocorreram três sprites. No horário de 01:30 UTC foram observados mais 2 sprites na mesma área dos anteriores. O motivo da não visualização desses resultados nos resultados analisados é o nascimento de novas regiões convectivas imersas no sistema convectivo, indicados na Figura 8.11 nos horários das 01:00 e 01:30 UTC.

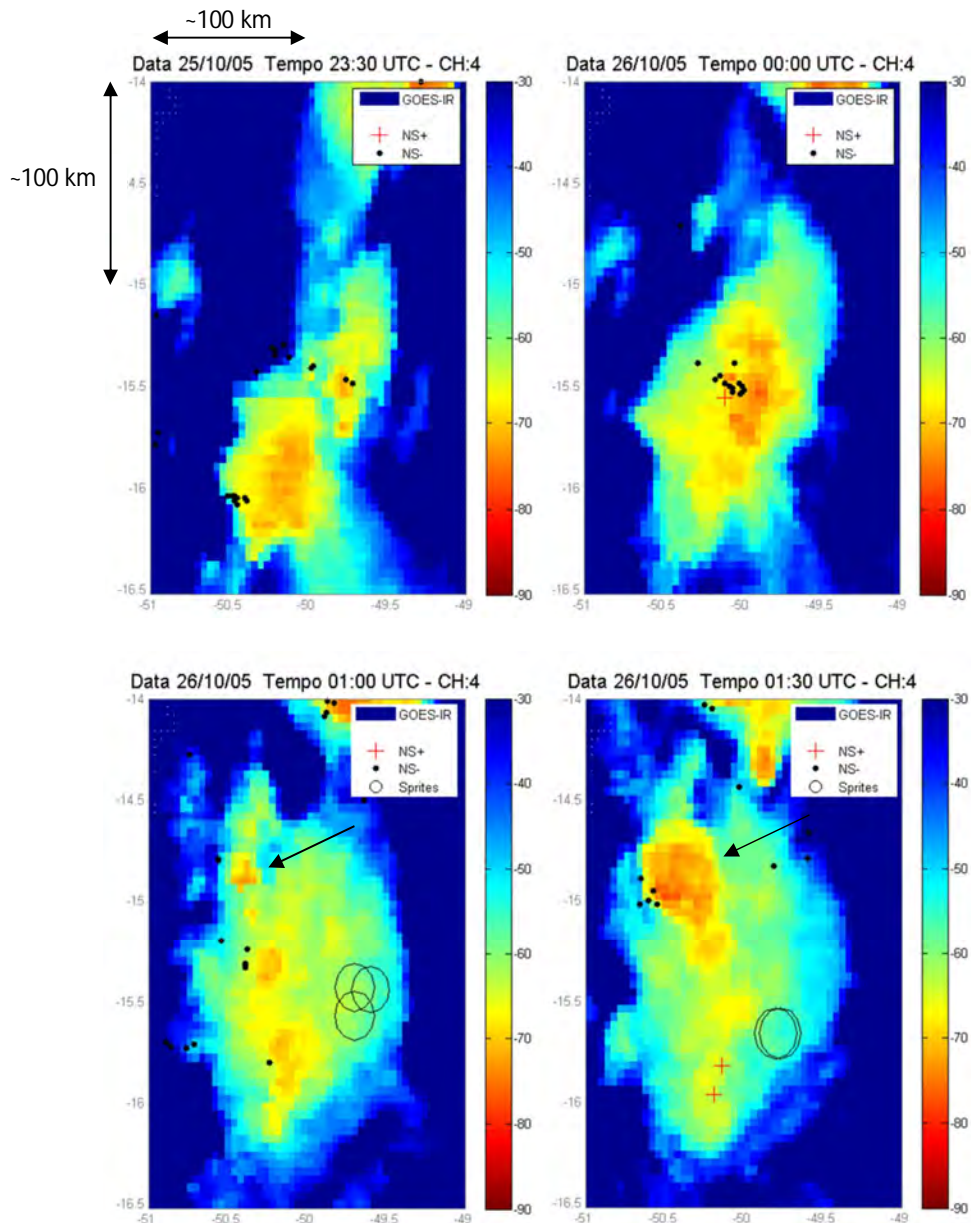


Figura 8.11 – Imagens no canal IR do GOES com o SC2 onde foram observados sprites em 25-26/10/2005 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização.

A Figura 8.12 mostra os possíveis NS geradores para os sprites observados em ambos sistemas convectivos (SC1 e SC2). Para os dois sistemas convectivos cinco relâmpagos foram detectados pela RINDAT 500 ms antes do sprite e a 200 km de distância. O gráfico indica o erro da localização dos sprites na distância horizontal entre os sprites e o NS gerador. Desses cinco, a maioria

apresentou polaridade positiva, houve somente 1 NS-. Para cada sistema convectivo foi identificado 1 relâmpago NS gerador.

No SC1, o sprite com possível NS gerador apresentou um atraso de 5 ms em relação ao mesmo e a distância horizontal entre a localização estimada do sprite e do NS+ gerador foi de ~88 km. No SC2, o relâmpago NS gerador ocorreu com 2 ms de antecedência em relação ao sprite e a uma distância horizontal de ~23 km em relação a localização estimada do sprite.

No outro SC produtor de sprites em 2005, o SC2 (Figura 8.12), observamos uma maior quantidade de relâmpago nas áreas convectivas do SC às 23:30 e 00:00 UTC. No horário de 01:00 UTC a área convectiva enfraqueceu e ocorreram três sprites. No horário das 01:30 UTC foram observados mais 2 sprites na mesma região dos anteriores.

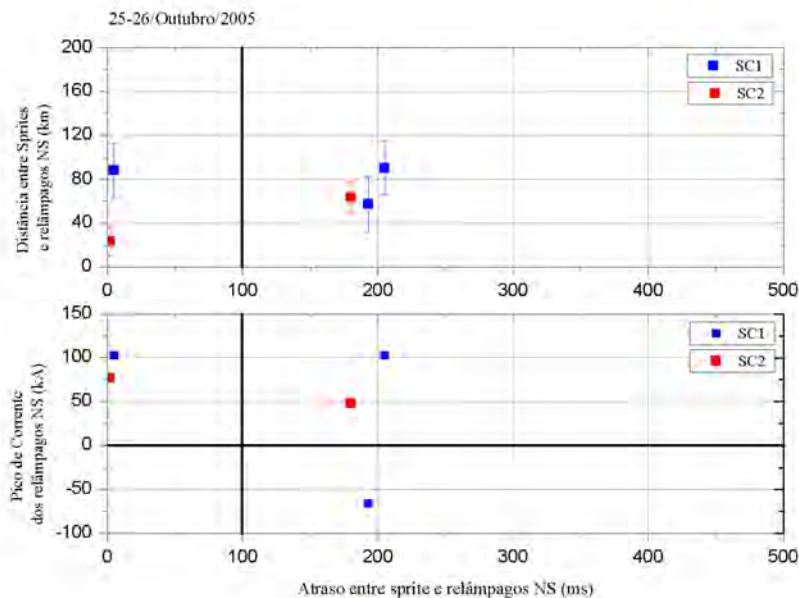


Figura 8.12 - Relâmpagos selecionados com um atraso de 500 ms em relação ao sprite, comparados com a distância horizontal da localização estimada dos sprites (gráfico superior) e o pico de corrente dos relâmpagos (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores pelo atraso de 100 ms numa distância máxima de 200 km. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.

8.2 22-23 de Fevereiro de 2006

Entre os dias 22 e 23 de Fevereiro de 2006, um total de 381 sprites foi documentado sobre a Argentina. Esses sprites foram observados a partir do Observatório Espacial Sul – OES do INPE, localizado no município de São Martinho da Serra, RS, entre as 02:30 e 08:30 UTC. As imagens mostradas na Figura 8.13 são exemplos dos eventos observados nessa noite.

A imagem mostrada na Figura 8.14 indica a localização do sítio de observação e dos sprites com os respectivos círculos de erro. Todos os sprites, com exceção de um, foram observados sobre um único sistema convectivo (SC1), esse único sprite foi observado sobre um sistema convectivo menor.

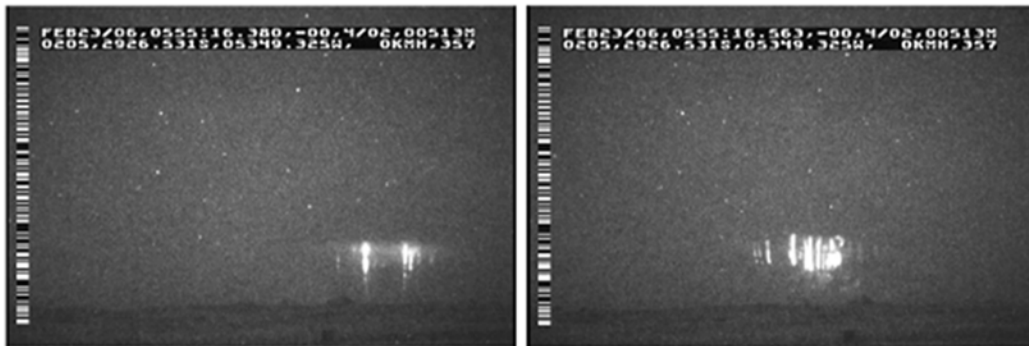


Figura 8.13 - Sprites observados sobre a Argentina (22-23/02/2006), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES.

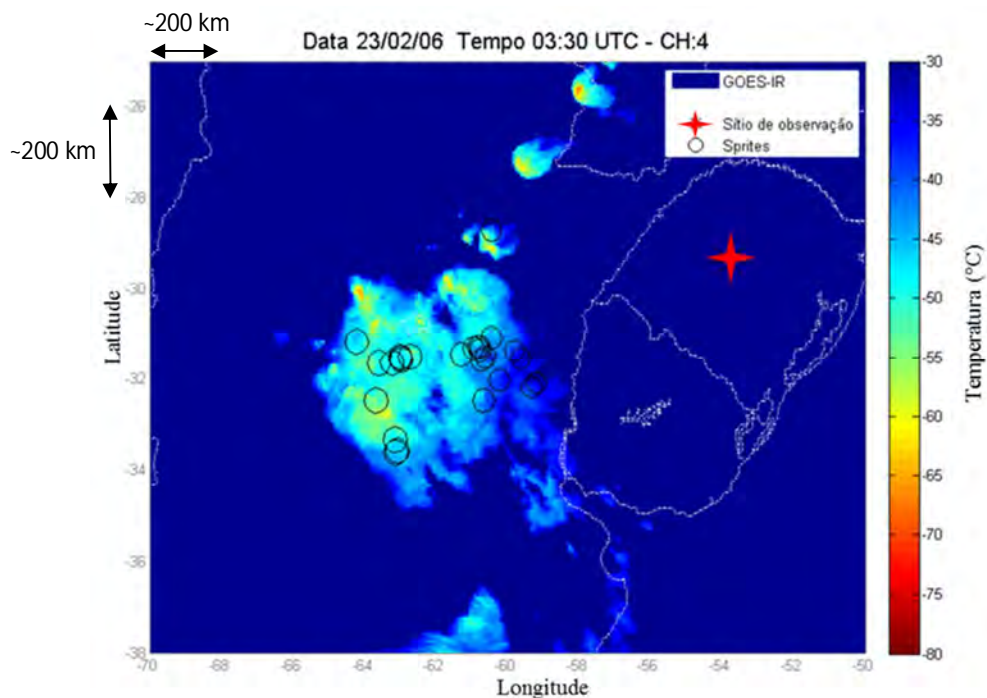


Figura 8.14 – Diferentes sistemas convectivos sobre os quais foram observados sprites em fevereiro de 2006, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.

O SCM sobre o qual foram observados os 380 sprites foi formado pela união de cinco sistemas convectivos (SC). Os primeiros SCs se formaram a partir das 17:30 UTC do dia 22/02 e estão identificados na Figura 8.15 (a) como SC1, SC2 e SC3. Conforme a metodologia de acompanhamento de sistemas convectivos descrita na seção 7.2, o sistema convectivo monitorado é o SC1. Os horários de união do SC2 e SC3 ao SC1 foram 22:00 e 23:30 UTC, respectivamente. A imagem na Figura 8.15(b) mostra o SC1 unido a dois sistemas menores e um outro, SC4, que se uniu ao SC1 às 02:30 UTC. Foi observado 1 sprite às 03:30 UTC sobre um sistema convectivo menor, SC5. No decorrer do tempo, às 04:30 UTC, esse sistema se uniu ao SC1. A imagem na Figura 8.15 (c) mostra o SC1 resultante e o SC5.

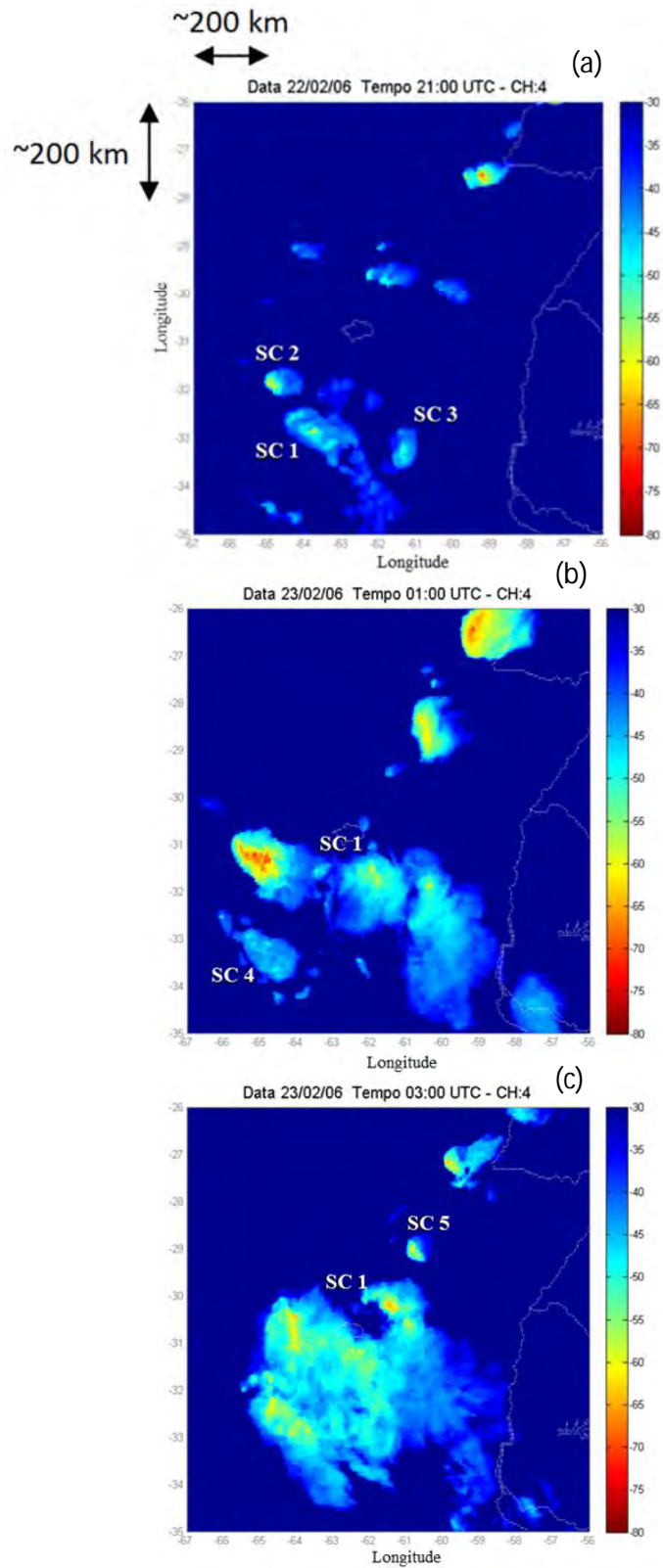


Figura 8.15 – Diferentes SCs convectivos que se uniram e formaram o MCS sobre o qual foram observados sprites em fevereiro de 2006.

A Figura 8.16 mostra o deslocamento do SC1. Seu início foi às 17:30 UTC do dia 22 e o fim às 09:30 UTC do dia 23 de Fevereiro, totalizando um tempo de vida de 30 horas.

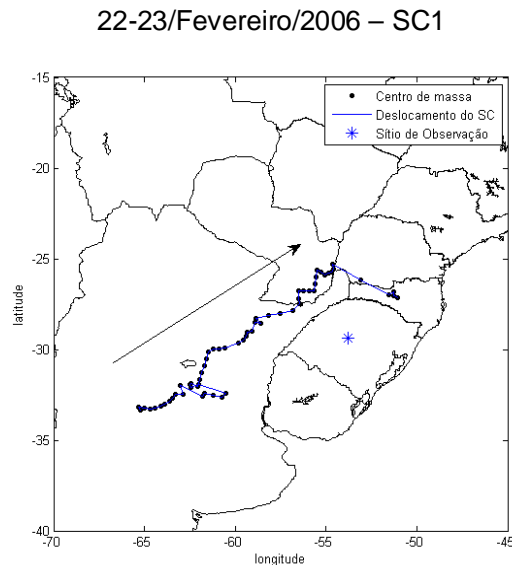


Figura 8.16 – Deslocamento do sistema convectivo (SC1) sobre o qual foram observados 380 sprites entre os dias 22-23 de Fevereiro de 2006.

A Figura 8.17(a) indica a área do sistema. O sistema monitorado, SC1, iniciou às 17:30 UTC, e atingiu a maturação às 04:30 UTC, com área de $221,3 \times 10^3$ km².

O limiar de temperatura adotado na metodologia deste trabalho para a identificação e cálculo da área de topos frios, $T \leq -63^\circ\text{C}$, resultou em valores muito baixos de área para esse sistema, que não refletiam a realidade de sua atividade convectiva, inferida pela sua eletrificação e prolífica produção de ELTs, tendo em vista que a T_{med} mínima do sistema -53°C , se mostrou $\sim 8^\circ\text{C}$ mais elevada do que a maioria dos casos estudados neste trabalho. Portanto, para esses sistemas, dos dias 22-23/Fevereiro/2006, foi adotado o limiar de temperatura $T \leq -54^\circ\text{C}$ para a identificação e cálculo de área de topos frios, seguindo a metodologia adotada por São Sabbas et al. [2010] para este mesmo caso.

A Figura 8.17(b) mostra a área de topos frios do sistema e indica que esta esteve presente desde o início do SC1. Essa área cresceu até o SC atingir a maturação, após esse horário a área de topos frios oscilou até atingir seu valor máximo às 10:30 UTC. Os sprites foram observados entre 02:30 e 08:30 UTC, período em que, na maior parte do tempo, a área de topo frio e a FC estavam em crescimento. Os 380 sprites foram observados antes de o sistema apresentar sua máxima FC.

A T_{med} oscilou nas horas iniciais do SC1 e apresentou valores mais baixos juntamente com o aumento da FC. No período em que os sprites foram observados a T_{med} do SC1 estava diminuindo, indicando uma maior atividade convectiva no sistema.

A Figura 8.17(d) indica a taxa de ocorrência de relâmpagos NS no SC1 detectados pela rede *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN). O gráfico mostra que os primeiros relâmpagos foram detectados duas horas após o início do sistema convectivo. Um total de 819 relâmpagos NS foi detectado pela rede em 30 horas de tempo de vida do SC. A maior parte dos relâmpagos NS ocorreu nas 19h entre a maturação e fim do sistema, ~53% do total de relâmpagos, período durante o qual houve uma maior FC no sistema. Nessa fase a taxa de relâmpagos/hora era de ~23 NS/hora. Na fase inicial do SC1, entre o início e maturação, embora a FC fosse menor, a taxa de NS era quase 10 vezes maior, ~35 NS/hora. Esse resultado, uma taxa de ocorrência de relâmpago maior nas horas iniciais do sistema, é igual aos resultados encontrados nos 2 casos de 2005 (seção 8.1).

Na análise deste caso não há evidências de uma dissipação das regiões convectivas na eminência da ocorrência dos sprites. O sistema foi formado pela união de diversos sistemas convectivos, implicando em diversas células convectivas em dissipação alimentando a região estratiforme em diferentes horários.

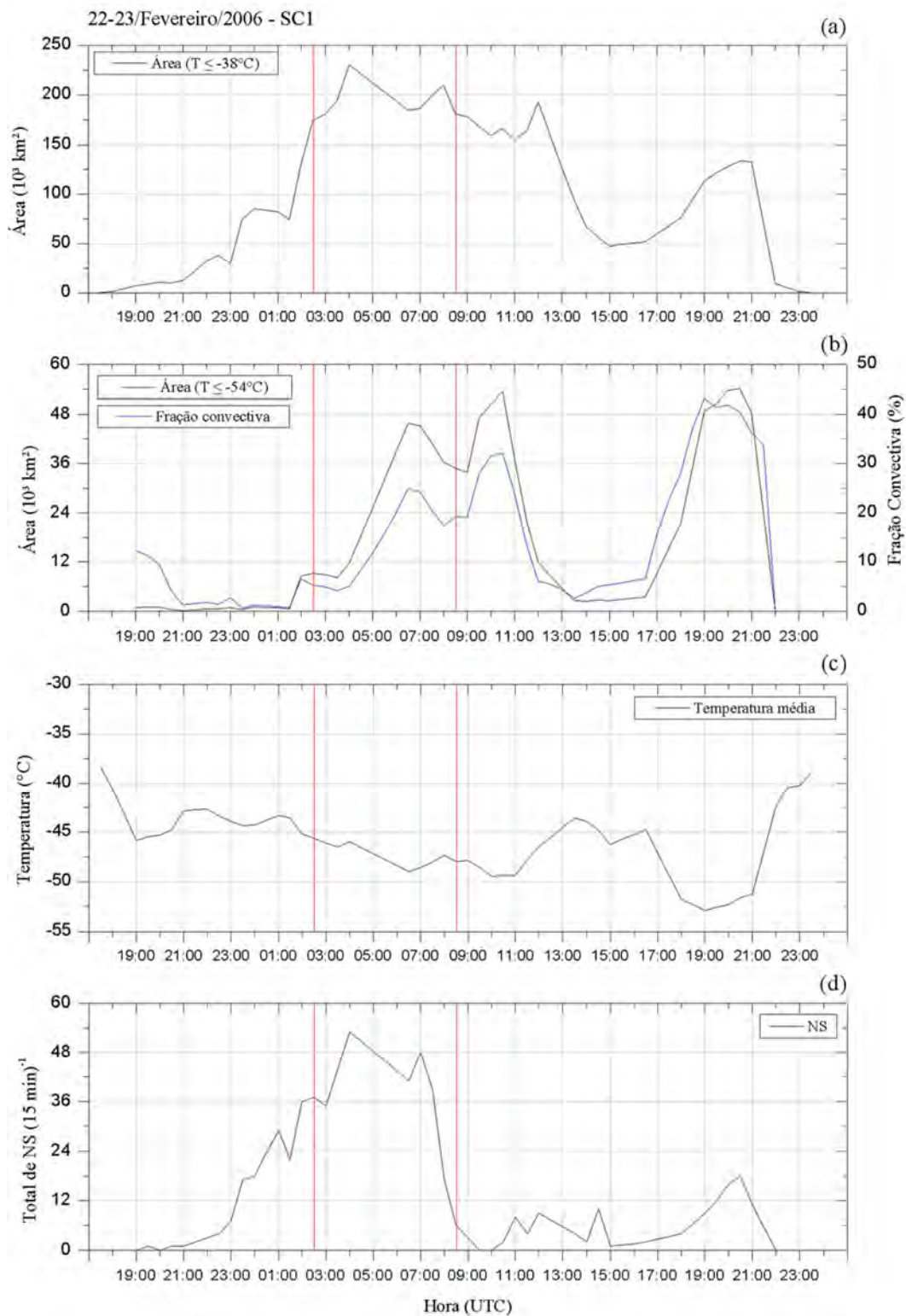


Figura 8.17 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -54^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

Trinta minutos antes da ocorrência do primeiro sprite, entre 02:00 e 03:30 UTC, a FC estava decrescendo, conforme mostrado na Figura 8.18. Um total de 297 sprites foi observado com a FC em aumento e 83 sprites com a FC em diminuição.

A densidade de relâmpagos NS ocorridos no sistema apresentou um pico à 01:00 UTC, 1,5 horas antes do primeiro sprite ocorrer. A densidade de NS decresceu até as 03:00 UTC, 1 h depois de ocorrerem os primeiros sprites. A densidade de NS se manteve constante durante a maior parte do período de ocorrência dos sprites, vindo a decrescer apenas a partir das 07:00 UTC, e chegando a zero após a observação dos sprites. A maioria dos sprites, 307 do total, ocorreu em um período em que a densidade de relâmpagos NS estava diminuindo, somente 73 sprites foram observados quando o sistema apresentou um aumento da densidade de NS.

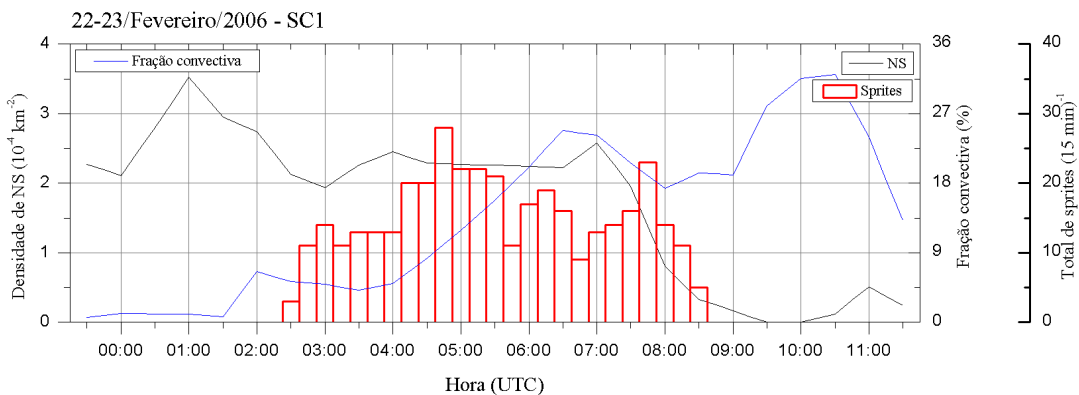


Figura 8.18 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), fração convectiva (%) e o total de sprites ($15 \text{ min})^{-1}$.

Analisando o sistema convectivo na sequência de imagens (Figura 8.19), observamos diferentes SCs nas horas iniciais do sistema convectivo, entre 20:00 e 22:00 UTC. Nos horários entre 23:00 e 01:00 UTC os SCs estão unidos e as ocorrências dos relâmpagos evidenciam região convectivas separadas. No momento em que todos se uniram, a partir das 02:00 UTC até o fim do sistema, havia diversas regiões convectivas iniciadas em tempos distintos dentro do SC, e em regiões aleatórias. Como foi dito anteriormente, esse SC apresenta diversas regiões convectivas imersas que possuem um ciclo de vida individual.

A medida que cada célula convectiva enfraqueceu alimentou uma porção estratiforme com hidrometeoros eletricamente carregados, aumentando a atividade de relâmpagos NS+, e conseqüentemente a geração de sprites.

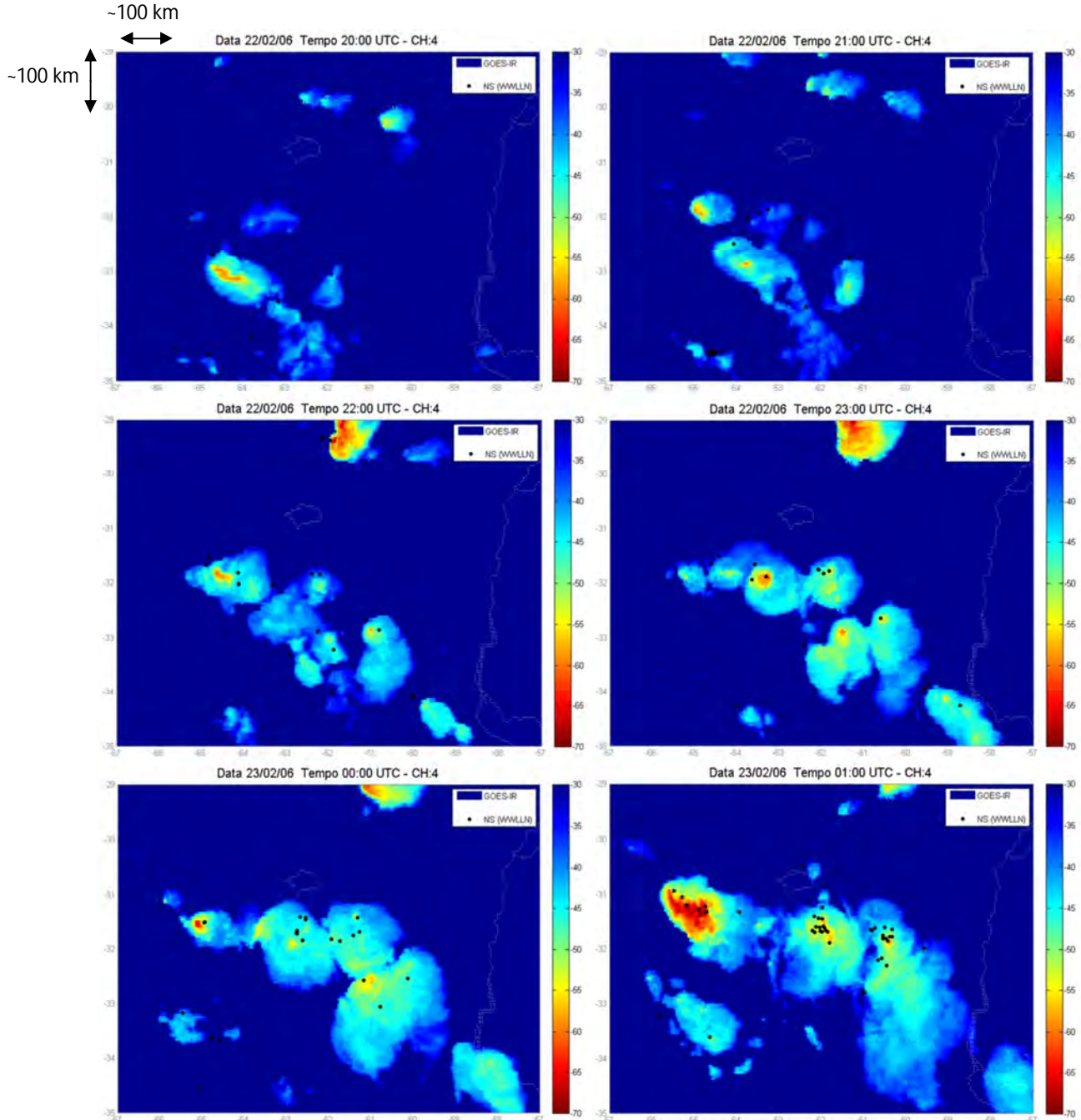


Figura 8.19 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 22-23/02/2006 com localização de relâmpagos NS e sprites com círculos de erro de localização (Continua).

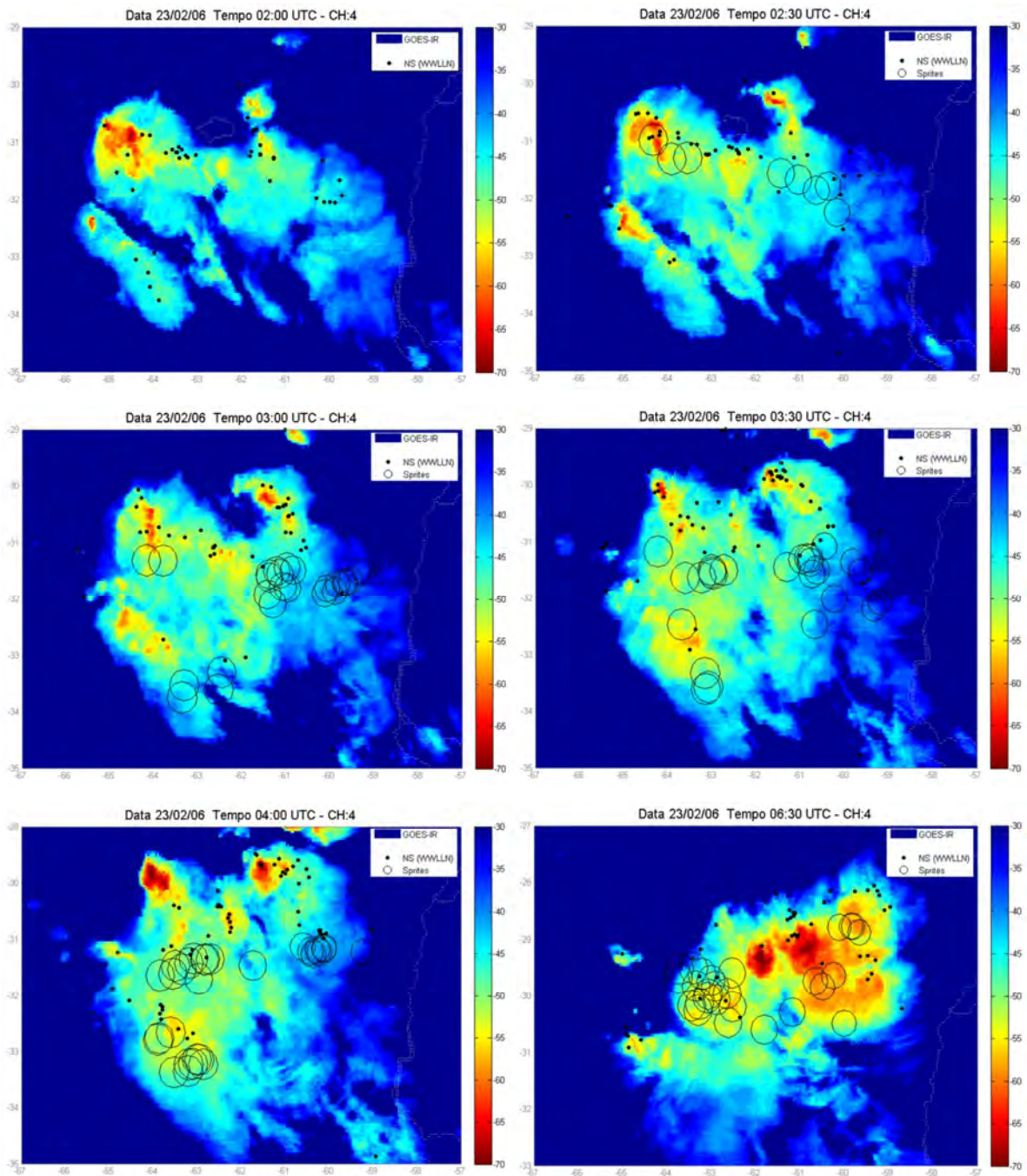


Figura 8.19 – Continuação.

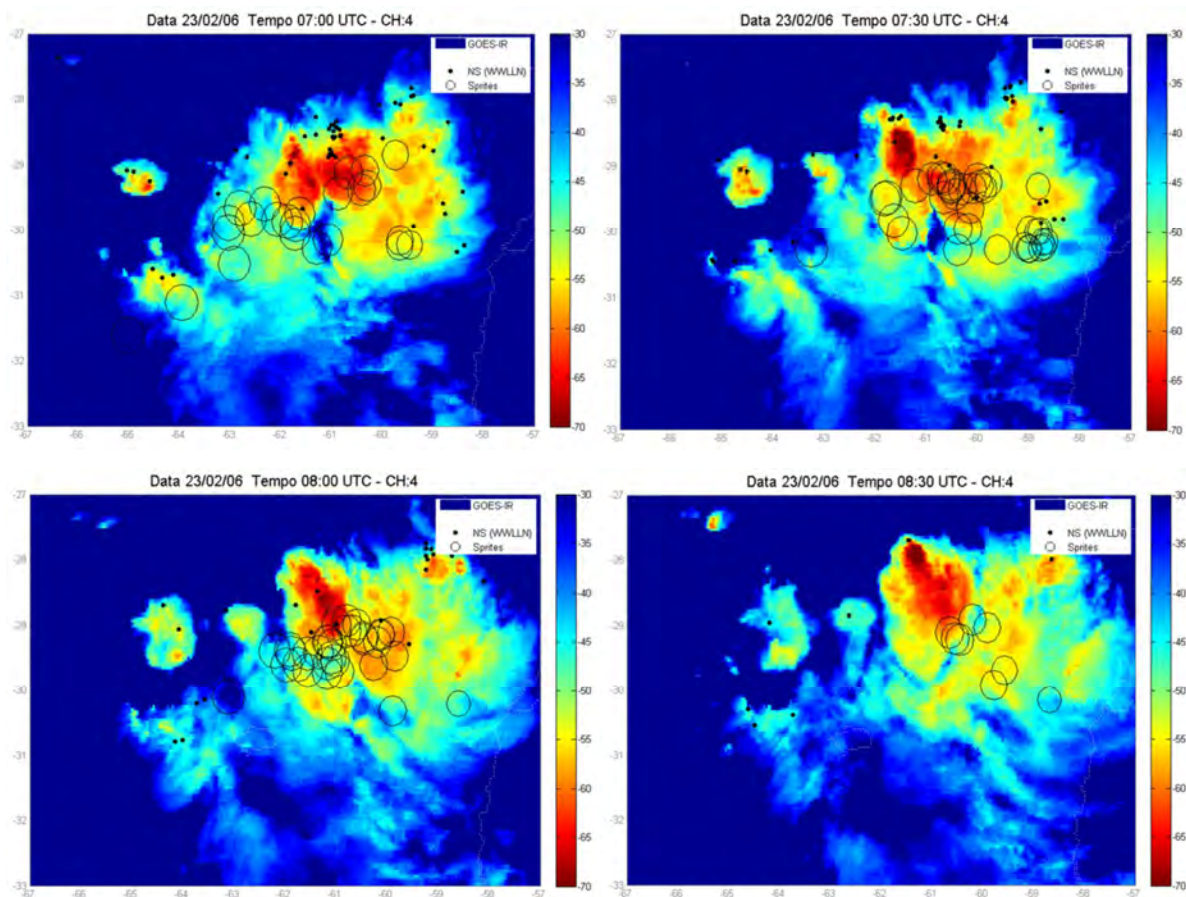


Figura 8.19 – Conclusão.

O mapa mostrado na Figura 8.20 indica que o deslocamento do SC5 foi no sentido sudoeste, indo contra o sentido de deslocamento do SC1.

22-23/Fevereiro/2006 – SC5



Figura 8.20 – Deslocamento do sistema convectivo (SC5) sobre o qual foi observado 1 sprite entre os dias 22-23 de Fevereiro de 2006.

Os gráficos mostrados na Figura 8.21 indicam o horário em que o sprite foi observado (linha vermelha) e o horário em que o SC5 se uniu ao SC1 (linha pontilhada preta). O sistema se iniciou as 01:00 UTC e teve a sua área determinada pela isoterma de -38°C em constante aumento até a união com o SC1, principal, discutido anteriormente. No momento em que o único sprite foi observado nesse sistema, a área estava aumentando e o seu valor era de $6 \times 10^3 \text{ km}^2$. A área máxima que esse sistema apresentou, antes do SC se unir ao outro foi de $12,2 \times 10^3 \text{ km}^2$. O sistema desenvolveu topos com $T \leq -54^{\circ} \text{C}$ às 02:00 UTC que cresceram até a união dos SCs. A FC do sistema cresceu até as 03:00 UTC, e entre esse horário e 03:30 UTC a FC apresentou um pequeno decréscimo. O período relatado é na eminência da ocorrência do sprite.

A temperatura média (T_{med}) do sistema inicialmente aumentou, entre 01:00 e 01:30 UTC, e diminuiu continuamente até as 03:00 UTC, 0,5 horas antes da ocorrência do sprite. Entre às 03:00 e 03:30 UTC a T_{med} aumentou até a junção dos SCs, quando voltou a diminuir. O aumento da T_{med} do sistema, na iminência da ocorrência do sprite, indica um aquecimento do mesmo.

A análise deste caso indica que tempo necessário entre o início de um sistema e o tempo necessário para gerar um sprites pode ser de apenas 2,5h. O sistema pode apresentar uma área relativamente pequena quando comparada com os demais casos estudados, como 6.000 km^2 , que é o caso deste sistema. O decréscimo da FC do sistema e o aumento da T_{med} na eminência da ocorrência do evento podem ser interpretados como um aumento de área estratiforme, favorecendo a geração do sprite.

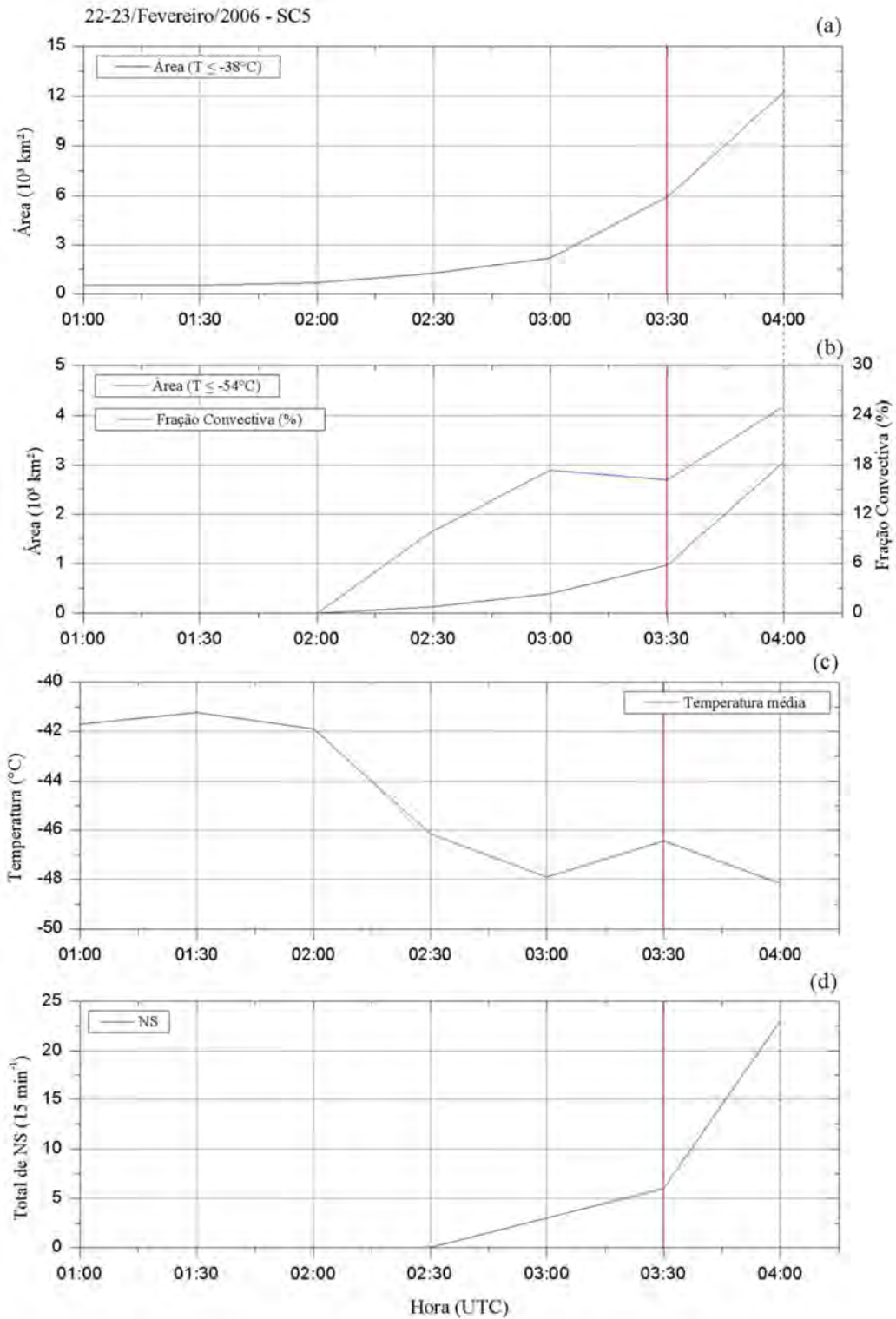


Figura 8.21 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -54^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

A sequência de imagens de satélite mostra que ele é uma pequena célula que se desprende de um sistema convectivo, à 01:00 UTC, e se desenvolve até se unir a um terceiro sistema, maior, o SC1 descrito anteriormente. O SC5 precisou de um pouco mais de 2,5 horas (contadas a partir da separação de SC original) para ter condições de gerar o sprite.

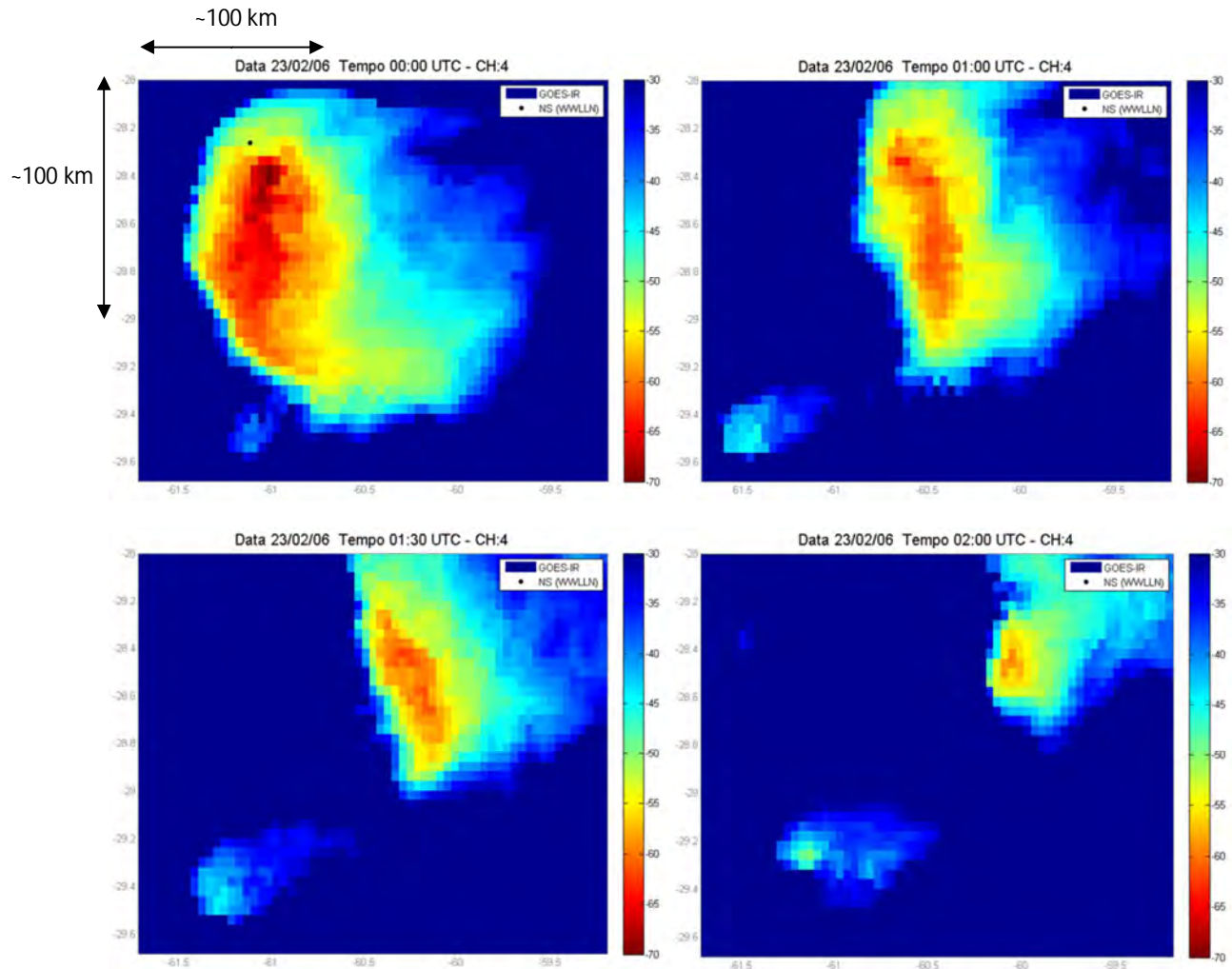


Figura 8.22 – Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 22-23/02/2006 com localização de relâmpagos NS e sprites com círculos de erro de localização (Continua).

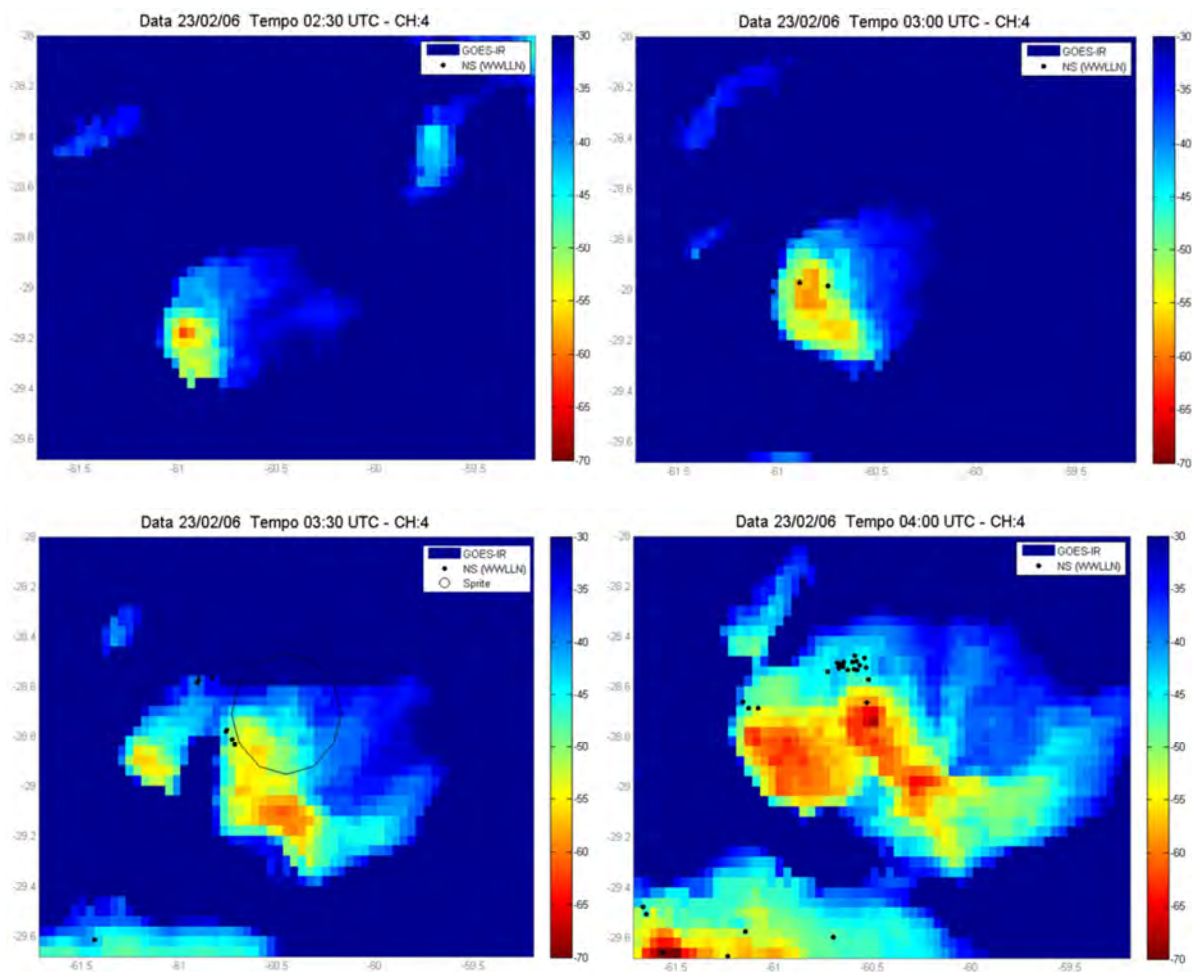


Figura 8.22 – Conclusão.

Foram detectados 32 relâmpagos NS pela WWLLN, nas 3,5 horas de vida do SC5. O primeiro NS foi detectado às 03:00 UTC, duas horas após o início do sistema e 30 min antes do sprite observado. Nos dois SCs em que foram observados sprites (SC1 e SC5), foram detectados ao todo 851 relâmpagos NS. O baixo número de relâmpagos identificados é resultado direto da eficiência de detecção da WWLLN. Rodger et al. [2005] realizou uma análise do desempenho global da WWLLN, e estimou que a eficiência global da rede de detecção é ~3%, aumentando para ~7% na América do Sul e ~75% destes relâmpagos NS tiveram pico de corrente acima de 50 kA. Nenhum dos relâmpagos detectados pela WWLLN satisfaz o critério usado para selecionar os possíveis relâmpagos NS que geraram os sprites.

8.3 03-04 de Março de 2006

Na noite entre os dias 03 e 04 de Março de 2006 foram observados 94 sprites a partir do OES (São Martinho da Serra, RS). As imagens mostradas na Figura 8.23 são exemplos de sprites observados naquela noite.

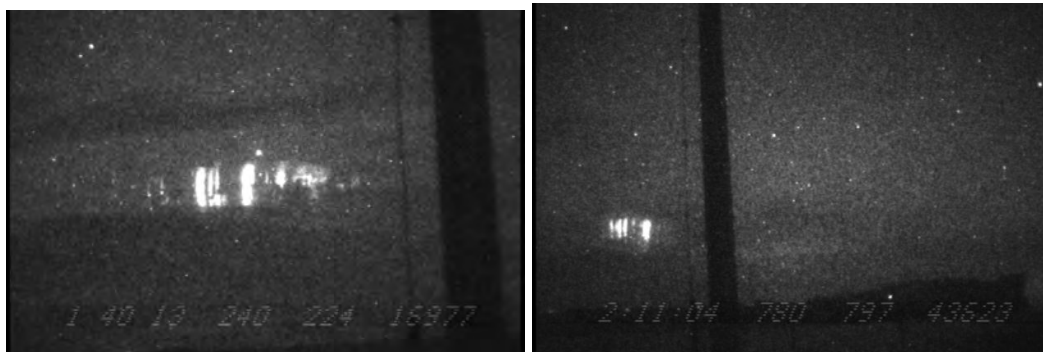


Figura 8.23 - Sprites observados sobre o Paraguai (03-04/03/2006) durante campanha de observação de ELTs a partir do OES.

Os sprites foram observados sobre um SC que se propagou pelo norte da Argentina e Paraguai entre 01:30 e 05:30 UTC. A imagem mostrada na Figura 8.24 indica a localização do sítio de observação, sprites com os círculos de erro de localização, e o sistema convectivo sobre o qual foram feitas as observações.

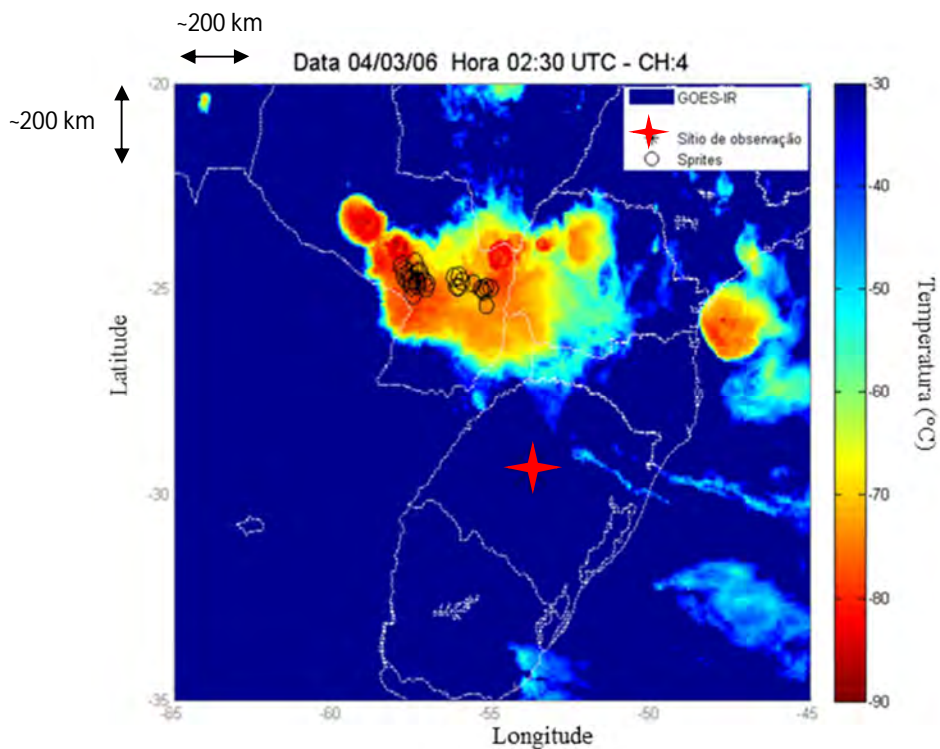


Figura 8.24 – Sistema convectivo sobre o qual foram observados sprites em Março de 2006, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.

O SC iniciou seu deslocamento às 0700 UTC do dia 03/03. Houve um período sem dados do satélite GOES-IR entre os horários das 04:00 e 06:30 UTC, de modo que não foi possível precisar o instante inicial do SC, portanto o SC foi monitorado a partir das 07:00 UTC.

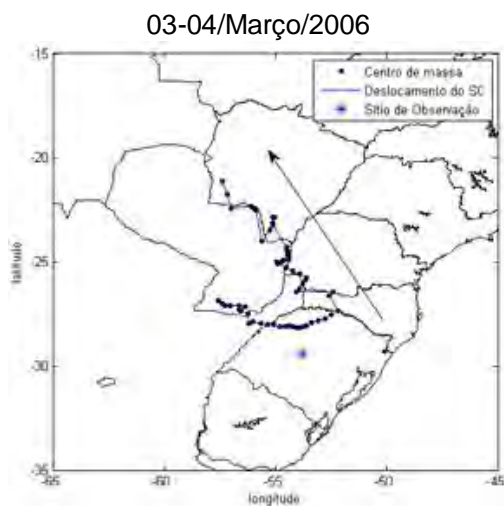


Figura 8.25 – Deslocamento do sistema convectivo sobre o qual foram observados 94 sprites entre os dias 03-04 de Março de 2006.

O SC iniciou-se as 07:00 UTC e a área do sistema aumentou continuamente até o sistema atingir a maturação às 20:00 UTC (Figura 8.26(a)). Nesse período o SC se propagou para leste, como pode ser observado no deslocamento do SC na Figura 8.25. Após atingir a maturação, a área diminuiu até às 21:30 UTC, quando voltou a aumentar. Esse novo aumento da área foi acompanhado de uma nova direção predominante de deslocamento do SC, no sentido noroeste. Esse sistema se trata de um SCM caracterizado por possuir uma região convectiva em sua extremidade se propagando contrariamente ao seu o fluxo em baixos níveis. Esses SCM ocorrem frequentemente nessa região, iniciam-se como sistemas convectivos na região da Bacia do Rio da Prata e se comportam propagando-se para leste ou nordeste, enquanto a região convectiva se propaga no sentido Noroeste [Anabor et al. 2008]. No período em que os sprites foram observados, demarcados pelas linhas vermelhas nos gráficos mostrados na Figura 8.26, a área do SC estava inicialmente crescendo, e a partir das 03:30 UTC o sistema passou a diminuir até a sua dissipação. No período de geração dos sprites a área do sistema variou entre 300×10^3 e 350×10^3 km².

Topos frios estão presentes no SC desde o horário que o sistema começou a ser monitorado, conforme indicado na Figura 8.26(b). Sua área aumentou continuamente até as 13:00 UTC e decaiu até as 18:00 UTC. Após às 18:00 UTC, juntamente com a mudança na direção de deslocamento, a área dos topos frios do sistema voltou a aumentar até às 02:00 UTC. No horário de observação dos sprites, essa área aumentou nos primeiros 30 minutos e após isso diminuiu até o fim do SC.

A FC apresentou valores altos logo no início do monitoramento do SC. Após atingir valores baixos a FC voltou a aumentar, acompanhando a nova direção de deslocamento do SC. Todos os sprites foram observados após o SC apresentar sua máxima FC. No período em que os sprites foram observados a FC estava diminuindo, conforme mostra a Figura 8.26(b).

A T_{med} acompanhou a FC do sistema ao longo da vida do SC. No período em que os sprites foram observados a T_{med} estava aumentando.

No tempo de vida do SC, 30 horas, um total de 23.685 NS foi detectado pela rede RINDAT (Figura 8.26(d)). A maioria dos relâmpagos NS era de polaridade negativa, ~76% do total. A taxa de NS no SC acompanhou valores máximos de FC e mínimos de T_{med} . Essa característica é facilmente observada em dois períodos, entre 09:30 – 11:30 UTC e 20:30 – 22:30 UTC. Essa mesma característica não foi observada à 01:30 UTC, horário de máxima FC e mínima T_{med} . Esse horário apresentou uma baixa taxa de relâmpagos NS, porém marcou o início uma taxa de relâmpagos NS+ superior a NS-. O único período em que a taxa de NS+ foi maior que NS- é entre 01:30 e 03:00 UTC, coincidente com o início das observações dos sprites. O primeiro sprite foi observado 10 minutos após a taxa de NS+ ser maior do que NS-.

Os resultados da análise desse caso indicam que após atingir uma grande área, alta taxa de ocorrência de relâmpagos e máxima FC, o sistema se estabilizou em tamanho por 6h, com pequena variação da área. No período em que os sprites foram observados, a FC diminuiu e a T_{med} aumentou. Esses resultados, junto com a reversão entre a taxa de ocorrência de NS- e NS+ no período em que foram observados os sprites, indicam que o SC foi eletrificado na extensa área estratiforme gerada após a dissipação da região convectiva.

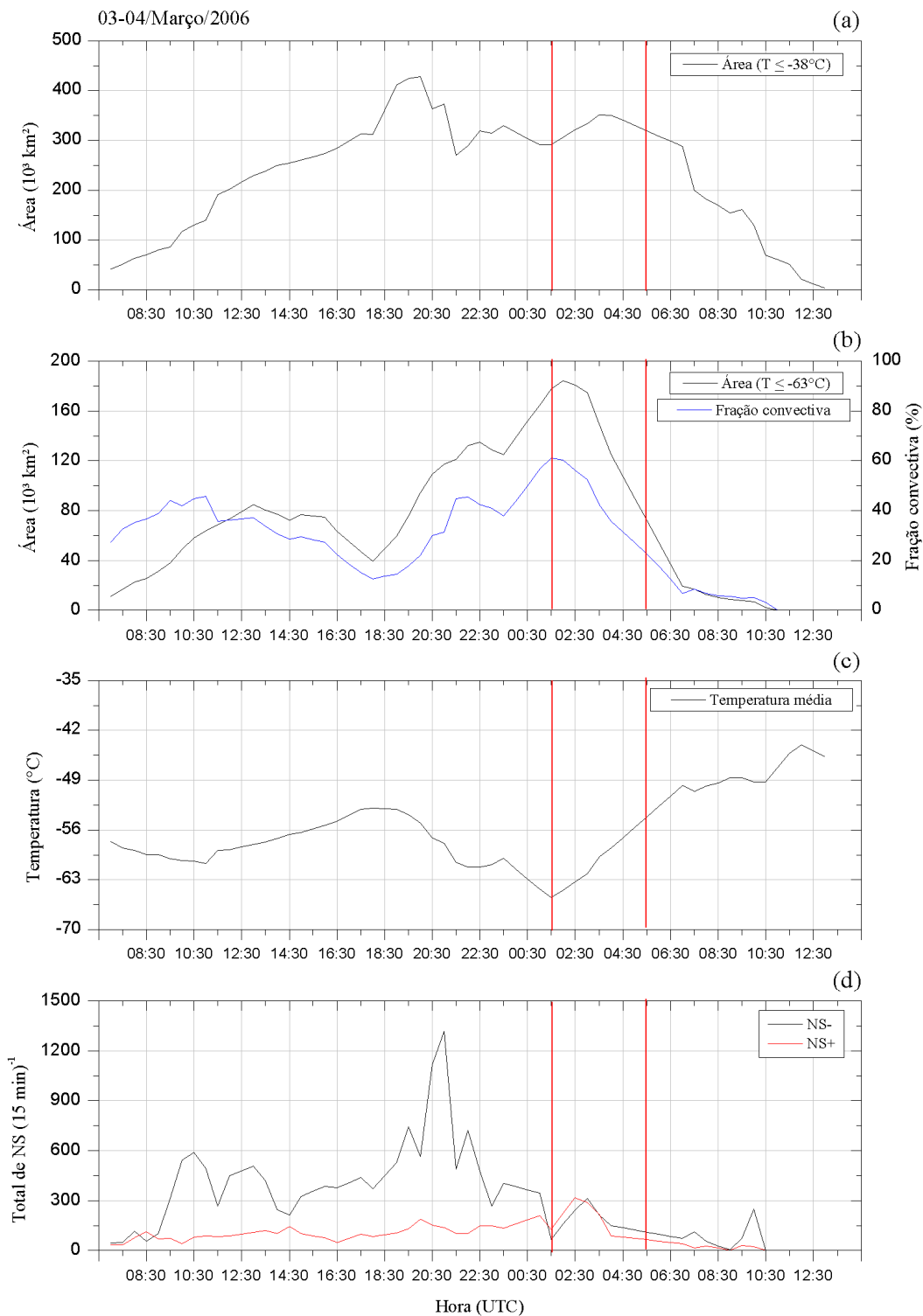


Figura 8.26 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

Durante todo o período em que sprites foram observados a FC esteve diminuindo, conforme mostrado na Figura 8.27. Aproximadamente 10 minutos antes do primeiro sprite ser observado a taxa de ocorrência de NS+ passou a ser superior a de NS-. A maioria dos sprites, ~57% do total de 94 eventos, ocorreu até às 02:30 UTC, período em que a taxa de NS+ se manteve superior a de NS-. Após as 03:00 UTC a densidade de NS passou a diminuir, assim como e a taxa de ocorrência de sprites.

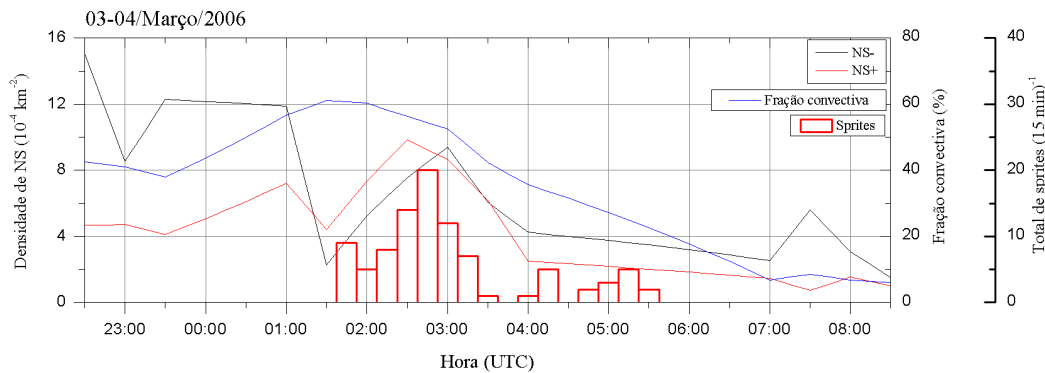


Figura 8.27 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), Fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min^{-1})

A sequência de imagens indica que o sistema estava se intensificando e a atividade elétrica estava em crescimento até 01:00 UTC. A imagem das 01:30 UTC, antecede a ocorrência do primeiro sprite em aproximadamente 10 minutos. Nela pode-se observar que a porção convectiva está em dissipação. A região convectiva do SC se dissipa alimentando a região estratiforme em área e conteúdo de água e gelo, deixando essa região favorável à ocorrência de NS+ que poderão gerar os sprites.

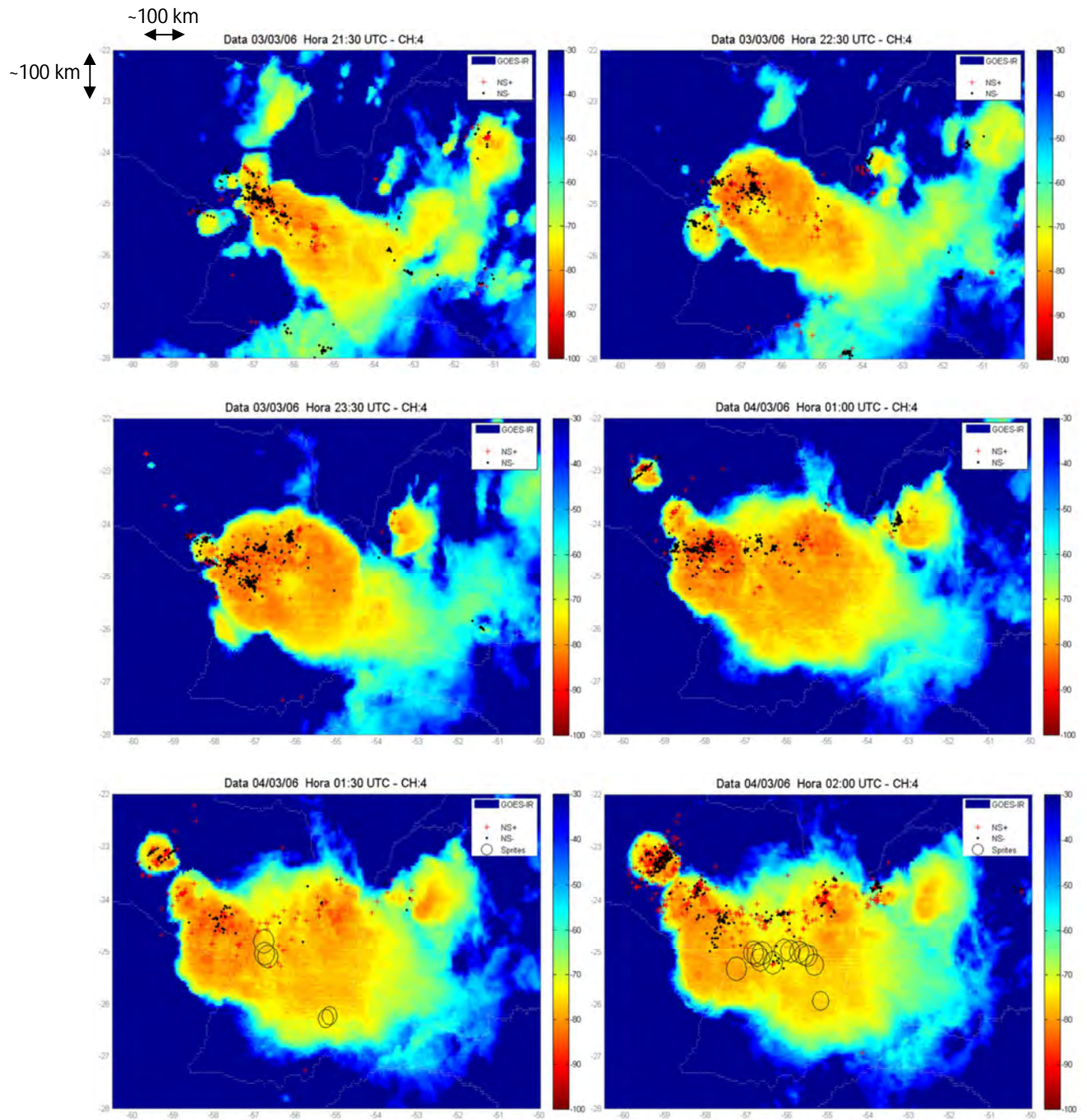


Figura 8.28 - Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 03-04/03/2006 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização (Continua).

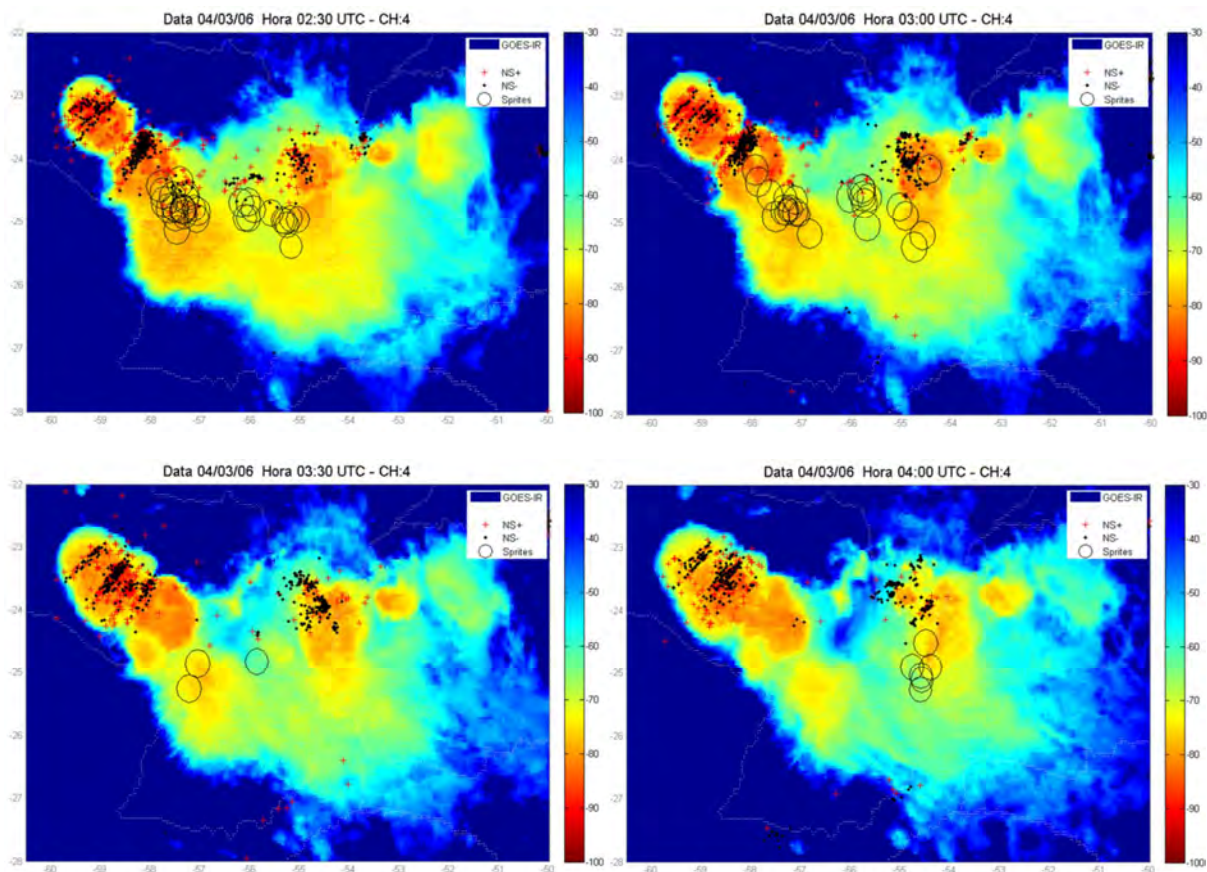


Figura 8.28 - Conclusão.

Considerando a metodologia descrita na identificação de possíveis NS geradores de sprites, foram selecionados 75 relâmpagos (Figura 8.29). A maioria desses relâmpagos era de NS+ (85,33% do total selecionado), indicando uma maior atividade de relâmpagos com polaridade positiva, favorecendo a geração dos sprites. Um total de 40 sprites teve um possível NS gerador identificado, sendo 3 NS- e 38 NS+.

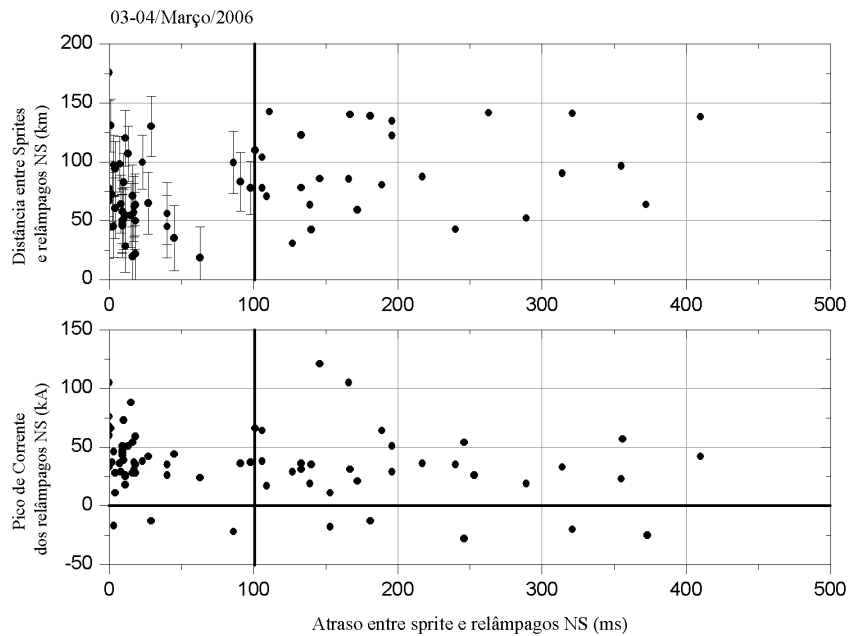


Figura 8.29 – Distância entre sprites e relâmpagos que ocorreram até 500 ms antes dos sprites em função do atraso do sprite (gráfico superior), e o pico de corrente desses mesmos relâmpagos em função do atraso (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores determinados pelo atraso máximo de 100 ms e distância máxima de 200 km do sprite. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.

8.4 09-10 de Outubro de 2007

Em outubro de 2007 foi realizada uma nova campanha de observação de ELTs a partir do Observatório Espacial do Sul. Na noite entre os dias 09-10 de Outubro de 2007, 20 sprites foram observados sobre o Rio Grande do Sul e o Oceano Atlântico. As imagens mostradas na Figura 8.30 são exemplos de sprites observados nessa noite.

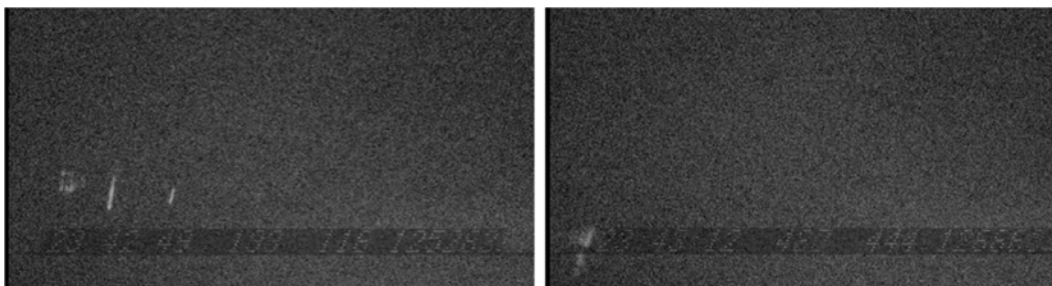


Figura 8.30 - Sprites observados sobre o estado do Rio Grande do Sul e Oceano Atlântico (09-10/10/2007), durante campanha de observação de ELTs a partir do OES.

A imagem de satélite na Figura 8.31 mostra o SC sobre o qual foram feitas as observações, a localização do sítio de observação e os sprites com os respectivos círculos de erro de localização. Nessa figura fica evidente a relação entre o erro de localização dos sprites e a distância do sítio de observação, quanto maior a distância maior o erro.

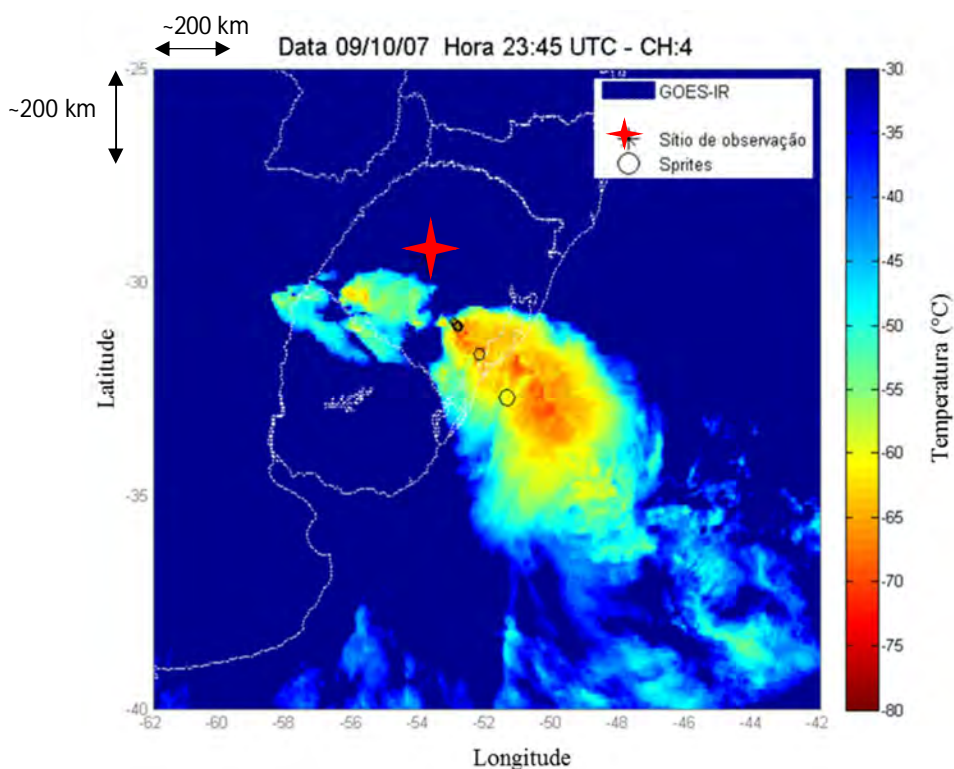


Figura 8.31 – Sistema convectivo sobre o qual foram observados sprites em 2007, com a localização do sítio de observação e localizações estimadas dos sprites com círculo de erro.

09-10/Outubro/2007

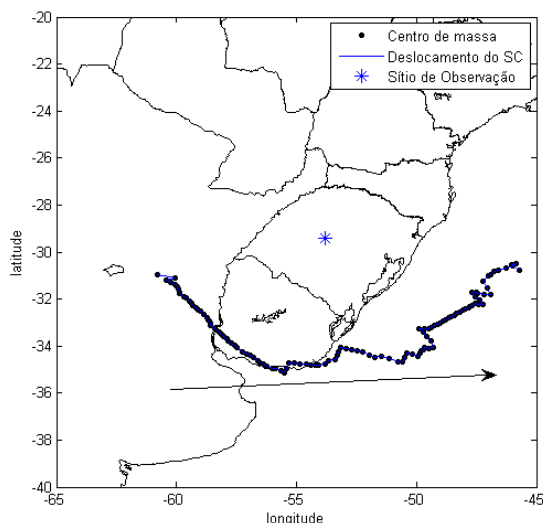


Figura 8.32 – Deslocamento do sistema convectivo sobre o qual foram observados 20 sprites entre os dias 09-10 de Outubro de 2007.

A Figura 8.32 mostra o deslocamento do SC. O sistema teve início 04:45 UTC e cresceu apresentando oscilações até atingir a maturação às 02:00 UTC, com área máxima de $485,3 \times 10^3 \text{ km}^2$. O tempo entre o início e a maturação do SC foi de 21,15 horas. Após atingir a maturação a área do SC decresceu até chegar ao fim às 11:00 UTC. O tempo entre a área máxima e dissipação do SC foi de 9 horas. Diferentemente dos outros sistemas convectivos estudados, o SC atingiu a maturação na segunda metade do tempo de vida do SC, e os sprites foram observados antes do SC atingir a maturação com a área em ascensão.

Áreas de topo frio cresceram continuamente com algumas oscilações até atingir máxima área de topo frio as 02:00 UTC. O que ocorreu após os sprites serem observados.

A FC apresentou um valor máximo 30 min antes do primeiro sprite ser observado. Durante todos os sprites observados a FC estava aumentando, conforme mostrado na Figura 8.33(b).

A T_{med} do SC (Figura 8.33(d)) apresentou grande oscilação entre o início e maturação do SC. Com antecedência de 45 min do primeiro sprite observado, a

T_{med} passou a aumentar até quando o último sprite foi observado. Após esse horário a T_{med} voltou a diminuir até as 00:30 UTC. A T_{med} se mantém com valores baixos atingindo um valor mínimo às 00:30 UTC. Com a diminuição da FC a T_{med} aumentou continuamente até o fim do SC.

Os primeiros relâmpagos foram detectados a partir das 10:45 UTC do dia 09/10, 6 horas após o início do SC (Figura 8.33(d)). Essa característica pode ser justificada pela distância do SC em relação a rede de detecção (RINDAT). O gráfico de NS mostra 3 grandes variações na quantidade de relâmpagos ocorridos, com máximos observados às 18:15, 21:00 e 23:45 UTC. A taxa de ocorrência de relâmpagos NS- foi maior do que NS+ na maior parte do tempo de vida do SC, exceto entre 22:30 e 23:15 UTC. Nesse período a taxa de relâmpagos NS+ foi maior que de NS-, e o período coincidiu com o início da observação dos sprites. Isso ocorreu após um pico de atividade de relâmpagos de ambas polaridades, conforme mostra a Figura 8.33(d).

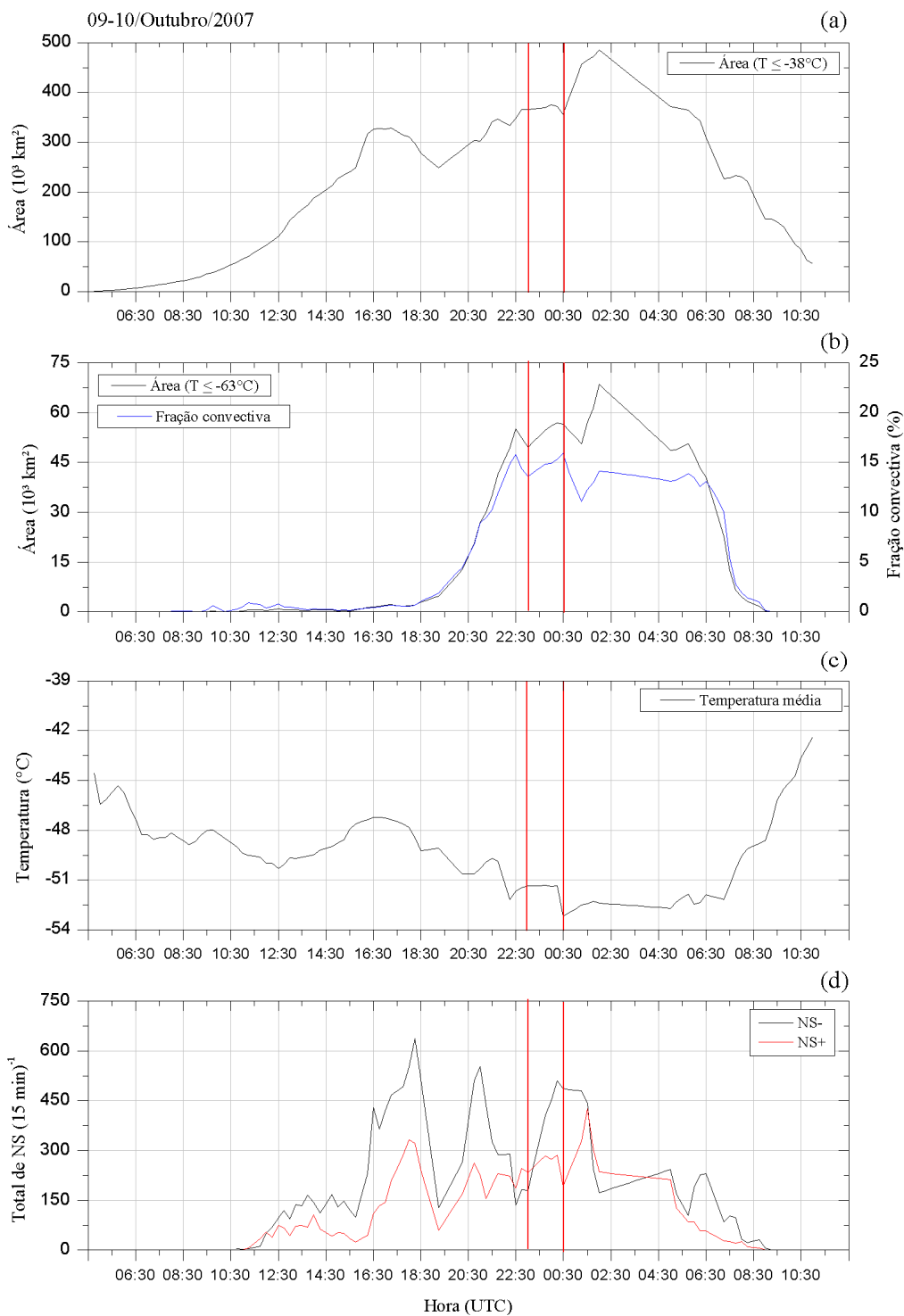


Figura 8.33 – (a) Área $T \leq -38^\circ\text{C}$ (km^2); (b) Área $T \leq -63^\circ\text{C}$ (km^2) e fração convectiva (%); (c) Temperatura média ($^\circ\text{C}$) e (d) Total de NS-, NS+ em intervalos de 15 minutos. Delimitado pelas linhas vermelhas está o período em que os sprites foram observados.

A FC aumentou até 30 minutos antes dos sprites serem observados, quando atingiu um máximo, e diminuiu quando os primeiros sprites começaram a ser observados, às 23:00 UTC (Figura 8.34). Após esse horário a FC tornou a aumentar até ter um novo máximo às 00:30 UTC, de modo que todos os 20 sprites foram observado durante o aumento da FC. A partir das 22:30 UTC a densidade de NS- passou a aumentar, acompanhando a FC e assim se manteve até o último sprite ser observado, conforme a Figura 8.34.

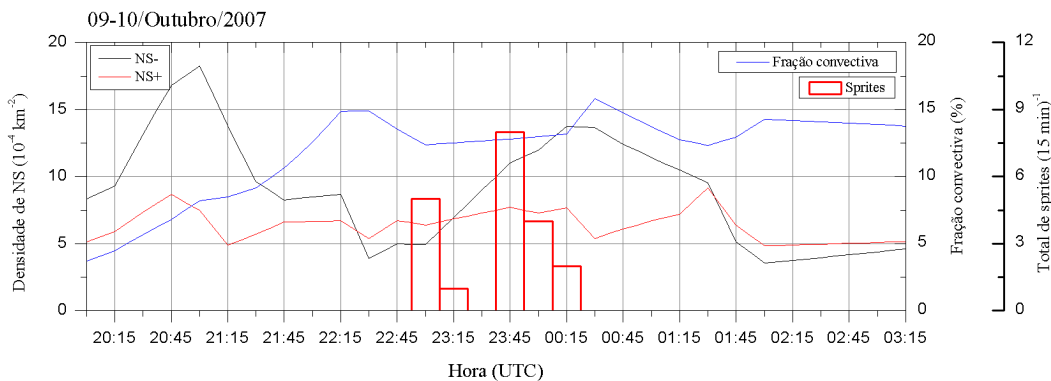


Figura 8.34 – Densidade de relâmpagos NS (10^{-4} km^{-2}), fração convectiva (%) e o total de sprites (15 min^{-1}).

Esses resultados indicam que neste caso de 2007, os sprites foram observados quando o SC atingiu uma grande área, altos valores de FC e elevada atividade elétrica. A atividade elétrica do SC no período em que os sprites começaram a ser observados apresentou uma reversão da taxa de ocorrência de NS- e NS+, sugerindo que o SC foi eletrificado positivamente na área estratiforme formada após a dissipação da região convectiva.

A Figura 8.35 mostra a evolução temporal do sistema convectivo. A localização predominante dos relâmpagos evidencia a região convectiva do SC. Ele se moveu no sentido Sudoeste-Nordeste, deixando uma porção estratiforme na sua região posterior, denominada rastro (do inglês “trail”), sendo essa a região favorável à ocorrência dos sprites, como mostram as imagens entre 23:00 e 23:45 UTC.

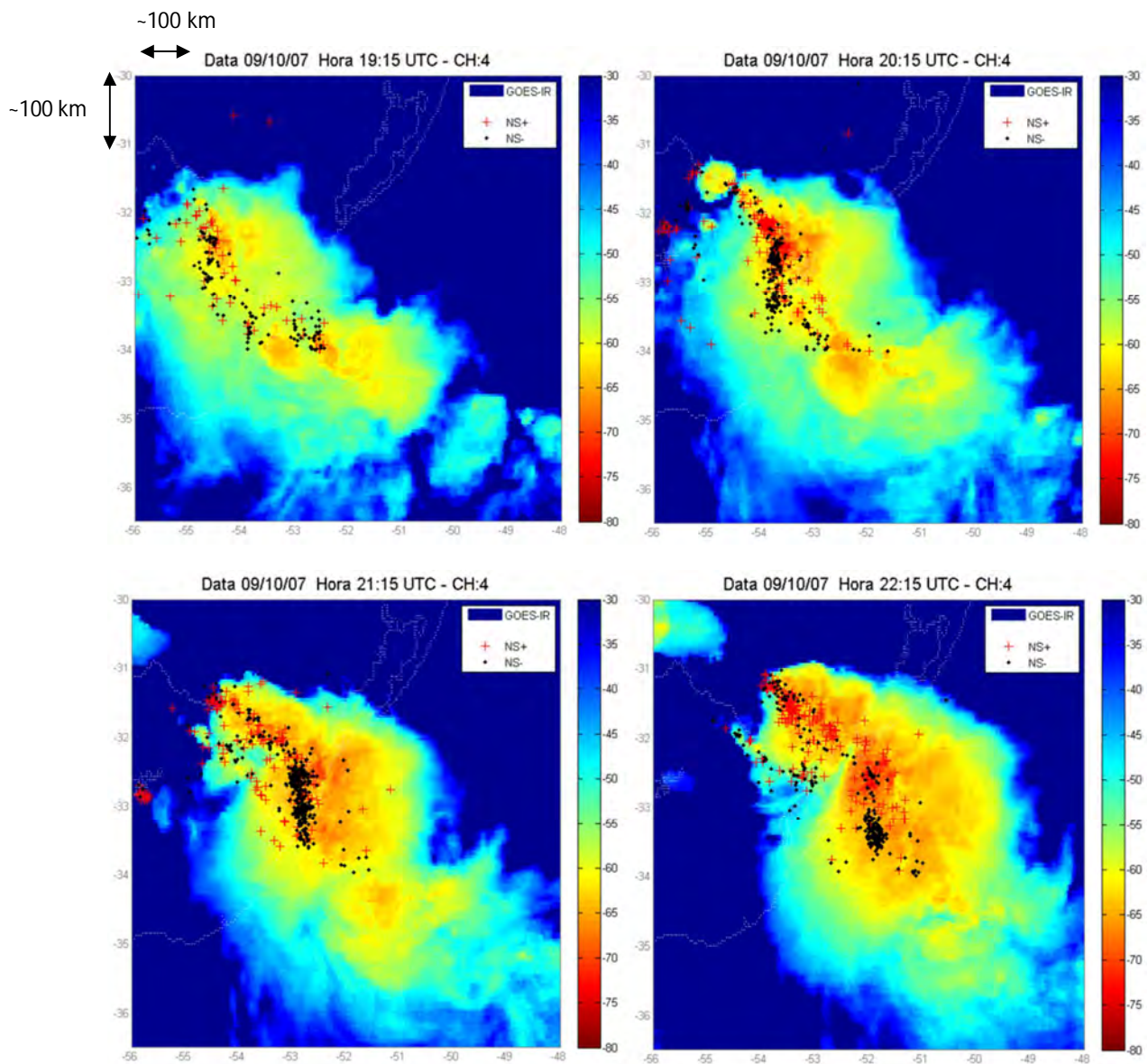


Figura 8.35 - Imagens no canal IR do GOES com o SC onde foram observados sprites em 09-10/10/2005 com localização de relâmpagos NS-, NS+ e sprites com círculos de erro de localização (Continua).

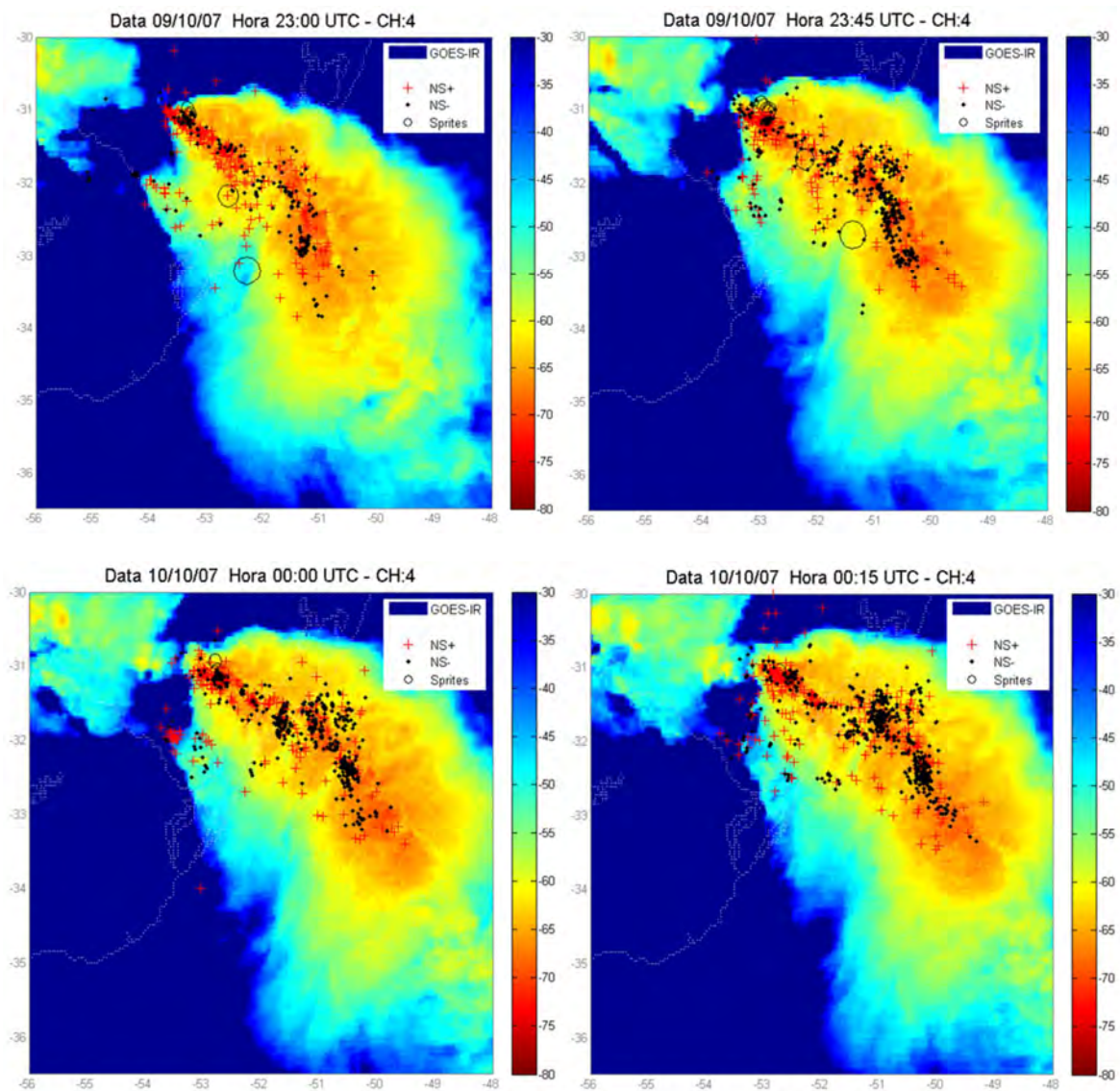


Figura 8.35 - Conclusão.

Um total de 27 relâmpagos NS com $\Delta t < 500$ ms e distância menor que 200 km dos sprites como possíveis relâmpagos geradores de sprites. Os relâmpagos selecionados são predominantemente de polaridade positiva, 23 são NS+ e 4 são NS-. Dentre os 20 sprites observados, 17 tiveram o seu possível NS gerador identificado, todos de polaridade positiva.

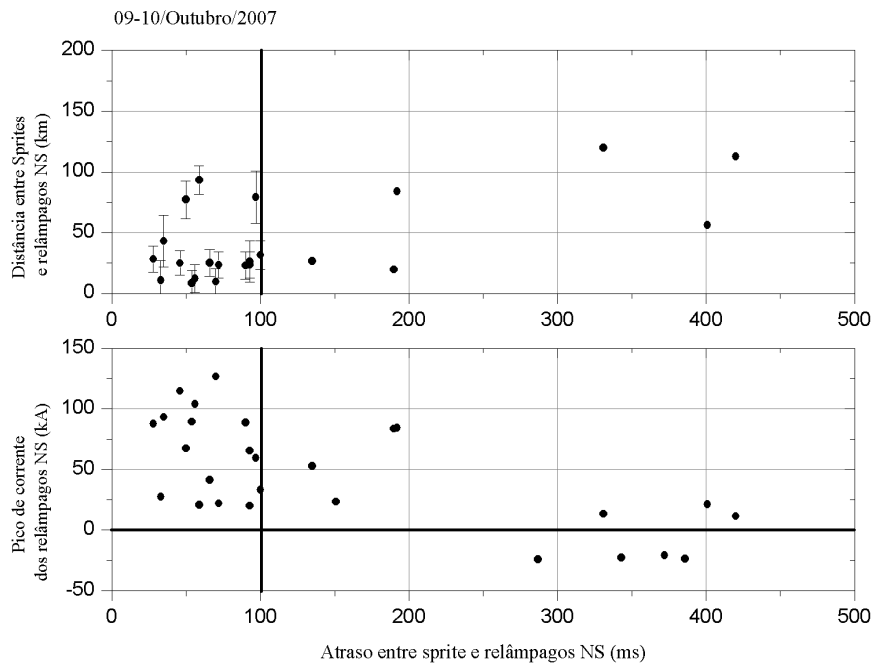


Figura 8.36 - Relâmpagos selecionados com um atraso de 500 ms em relação ao sprite, comparados com a distância horizontal da localização estimada dos sprites (gráfico superior) e o pico de corrente dos relâmpagos (gráfico inferior). As linhas verticais em ambos os gráficos delimitam os possíveis NS geradores pelo atraso de 100 ms e a uma distância máxima de 200 km. A linha horizontal no gráfico inferior separa relâmpagos positivos de negativos.

9 DISCUSSÃO

O Capítulo 9 apresenta uma discussão dos resultados encontrados. É feita uma abordagem física na explicação dos resultados encontrados, quanto aos relâmpagos NS geradores e às características dos sistemas convectivos estudados.

No total de 506 sprites observados sobre 6 tempestades (ou sistemas convectivos), 59 tiveram um relâmpago NS gerador identificado, sendo 56 NS+ e 3 NS-. O baixo número de relâmpagos geradores identificados reflete a baixa eficiência de detecção para a maioria dos casos estudados. A identificação dos relâmpagos NS que poderiam ter gerado os sprites foi realizada utilizando os seguintes critérios temporais e espaciais: um atraso máximo de 100 ms do sprite em relação ao relâmpago e uma distância máxima de 200 km entre eles. O resultado encontrado está de acordo com o reportado na literatura, pois a maioria dos sprites reportados está associada a relâmpagos NS+. Por exemplo, Williams et al. (2007) encontrou que a proporção de sprites gerados por NS+ e NS- é de 1000:1, respectivamente.

A distância horizontal entre o sprite e o relâmpago NS gerador pode ocorrer devido a diversos fatores relacionados com a localização e área ocupada pela carga na nuvem. Um dos motivos pode ser o fato de a descarga do relâmpago não ser exatamente vertical, isto é, há um deslocamento horizontal entre a localização da carga elétrica dentro da nuvem e o ponto de contato com o solo. Entre outros fatores, o atraso entre o relâmpago gerador e o sprite pode estar relacionado com a escala de tempo de remoção da carga da nuvem durante um relâmpago. Saba et al. (2010) mostrou que aproximadamente 70% dos NS+ tem longa corrente contínua, na faixa de 40 a 400 ms. Essa longa corrente contínua implica em longas escalas de tempo de remoção de carga.

A seleção dos relâmpagos NS que ocorreram até 500 ms antes dos sprites e 200 km de distância deles indica uma grande atividade de relâmpagos NS+ temporalmente e espacialmente próximos dos eventos. Em todos os casos estudados em que havia dados com a polaridade dos relâmpagos NS foi

observada uma maior atividade de relâmpagos NS+ próximos ao sprites e em torno de seu horário de ocorrência. A maioria desses relâmpagos e os relâmpagos geradores de sprites se iniciaram na região estratiforme dos sistemas convectivos estudados. Esses resultados dão suporte a ideia de que as regiões compostas por nuvens estratiformes são carregadas positivamente e, portanto, favoráveis a geração dos sprites.

E função disso, sugerimos que há uma maior probabilidade de ocorrência de sprites na fase que favorece a intensificação da área estratiforme do sistema gerador. O modelo proposto por Houze et al. (1982) indica que a região de precipitação estratiforme se forma a partir da dissipação das células convectivas. Com base nos resultados de Fiolleau et al. (2010), e considerando as variáveis analisadas neste trabalho desenvolvemos um modelo conceitual das características de um SC favorável a ocorrência de sprites.

O gráfico na Figura 9.1 mostra esse modelo com as condições que um sistema convectivo precisa ter para gerar sprites. No período entre t_1 e t_2 o sistema está em crescimento, com aumento da FC e decréscimo da T_{med} . O instante t_2 representa o momento em que a T_{med} atinge o mínimo e, conseqüentemente, a FC atinge o máximo. Entre t_2 e t_3 há um aumento da T_{med} e diminuição da FC, com a continuidade do crescimento da área do SC, o que implica em um aumento da região estratiforme. Sugerimos que o horário após t_2 marca o início do período mais propício para a ocorrência dos sprites no SC. O instante t_3 representa o momento em que o SC atinge a sua máxima extensão horizontal. Após t_3 a área do SC passa a diminuir, a FC segue diminuindo, e a T_{med} continua aumentando até o fim do SC, em t_4 .

Com relação ao carregamento elétrico da nuvem, esse modelo conceitual propõe que a máxima eletrificação da nuvem ocorreria em t_2 , com a máxima atividade elétrica. Como geralmente os relâmpagos negativos predominam sobre os positivos nas regiões convectivas, espera-se que a maioria deles seja de NS-. Após t_2 espera-se um aumento da atividade de relâmpagos NS+ e, conseqüentemente, um aumento na geração dos sprites. As partes convectivas, muito eficientes no carregamento elétrico do sistema convectivo,

geram cargas positivas e negativas, e as positivas tendem a se acumular na parte estratiforme da tempestade, até a sua dissipação. Logo, sugere-se que o período no qual o sistema convectivo apresenta sua maior área, com a parte convectiva em dissipação, a região estratiforme seja mais ampla, com maior quantidade de cargas positivas, e portanto com maior capacidade de gerar sprites.

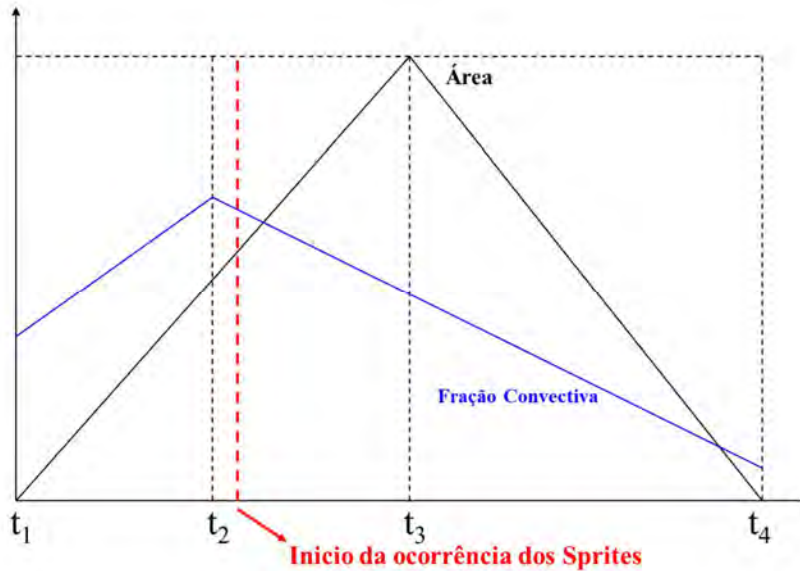


Figura 9.1 – Modelo conceitual das variáveis de um SC favorável a ocorrência dos sprites.

A física que esse modelo conceitual propõe descreve o processo do aumento da região estratiforme do SC a partir da advecção de hidrometeoros das regiões convectivas, conforme proposto por Biggerstaff e Houze et al. [1993], e mostrado na Figura 5.4.

De acordo com o modelo conceitual proposto, a geração de sprites é mais propícia durante o período em que ocorre um aumento da T_{med} combinado com um decréscimo da FC. Ela independe da área total do sistema, que pode estar aumentando ou diminuindo, pois após atingir seu valor máximo a área do sistema diminui gradativamente até o seu término.

Fazendo um comparativo entre o modelo conceitual sugerido e os resultados encontrados, observamos que não foi possível identificar essas características

em 100% do tempo, exceto 1 dos sistemas convectivos analisados em 2005. As características gerais dos sistemas analisados estão resumidas nas duas tabelas abaixo. A Tabela 9.1 é indica o horário de maturação (máxima extensão), área máxima e atividade elétrica ao longo do tempo de vida dos SCs. Em todos os casos estudados prevaleceu a atividade de relâmpagos NS-. Os sistemas com maior tempo de vida apresentaram uma maior extensão horizontal. O sistema que teve a menor área foi o SC2 em 2005 com 65.150 km² com um tempo de vida de 16,5 horas. O SC que atingiu maior área foi o sistema de Março de 2006, com 485.340 km². Ele teve 30,25 horas de duração. Com exceção do caso analisado em 2007, todos os SCs apresentaram a maturação na primeira metade do tempo de vida.

Tabela 9.1 – Resumo dos resultados quanto à geração de sprites e a atividade de relâmpagos NS.

Parâmetros/SCs	2005SC1	2005SC2	2006Fev	2006Mar	2007
Total de sprites	6	5	380	94	20
Início (UTC)	15:30 h	17:00 h	17:30 h	07:00 h	04:45 h
Fim (UTC)	12:30 h	09:30 h	23:30 h	13:00 h	11:00 h
Tempo de vida	21 h	16,5 h	30 h	30 h	30,25 h
Área máxima/maturação (km²)	214.850	65.150	221.360	427.520	485.340
Horário maturação (UTC)	21:00 h	23:30 h	04:30 h	20:00 h	02:00 h
NS (total)	567	376	822	23.685	21.933
NS- (erro) (%)	68 ± 4	89 ± 5	-	76 ± 1	64 ± 1
NS+ (erro) (%)	32 ± 3	11 ± 2	-	24 ± 0	36 ± 0

A Tabela 9.2 mostra a atividade de relâmpagos NS e ocorrência de sprites em diferentes fases dos SCs, entre início – maturação e maturação – dissipação. Com exceção de 2007, todos os SCs apresentaram uma fase de maturação-dissipação mais longa que sua fase de início-maturação. A maioria dos sprites foi observada após o SC atingir área máxima, ou seja, durante a maturação-

dissipação. Para o SC1 de 2005 e de Março de 2006 houve um aumento na taxa de relâmpagos NS+ após terem atingido a maturação, concordando com modelo proposto, como anteriormente citado.

Tabela 9.2 - Resumo dos resultados quanto geração de sprites e a atividade de relâmpagos NS+ e NS- em relação há diferentes fases dos SCs.

Parâmetros/SCs	2005SC1	2005SC2	2006Fev	2006Mar	2007
Duração do Início-Maturação	5,5 h	6,5 h	11 h	13 h	21,25 h
Sprites	0	0	133	0	20
NS (total)	405	204	384	12.267	19.649
NS- (erro) (%)	78 ± 4	87 ± 7	-	80 ± 1	63 ± 1
NS+ (erro) (%)	22 ± 2	13 ± 2	-	20 ± 0	37 ± 0
Duração da Maturação-Dissipação	15,5 h	10 h	19 h	17 h	9 h
Sprites	6	5	247	94	0
NS (total)	162	172	438	11.418	2.284
NS- (erro) (%)	44 ± 5	90 ± 7	-	72 ± 1	66 ± 2
NS+ (erro) (%)	56 ± 6	10 ± 3	-	28 ± 1	33 ± 1

Dos sistemas convectivos analisados em 25-26/Outubro/2005 e apresentados na seção 8.1, apenas a produção de sprites do SC1 correspondeu ao modelo conceitual descrito. No SC1 os sprites foram observados durante a diminuição da FC e aumento da T_{med} , após atingir área máxima, correspondendo ao período entre t_3 e t_4 na Figura 9.1. A atividade elétrica do sistema também seguiu o proposto no modelo, uma vez que taxa de ocorrência de NS+ passou a ser a maior que NS- após a diminuição da FC combinada com o aumento da T_{med} , que também foi o período de observação dos sprites. Já o SC2, que inicialmente apresentava características semelhantes ao SC1, desenvolveu novas células convectivas imersas na sua área total que geraram um crescimento da FC e diminuição da T_{med} , influenciando nas características do SC de modo que o mesmo não se encaixou no modelo conceitual proposto. As

novas células convectivas identificadas na análise visual realizada com as imagens de satélite não foram analisadas objetivamente, pois isso estava fora do escopo deste trabalho.

Nas observações realizadas em Fevereiro/2006, sprites foram observados em 2 SCs, descritos na seção 8.2. Em ambos os sistemas as características propostas no modelo não puderam ser identificadas. O SC1 foi formado a partir da união de vários sistemas convectivos, implicando em diversas células convectivas alimentando a região estratiforme em diferentes horários. E o SC5 foi formado a partir da separação de outro sistema, apresentando um tempo de vida de 3h até a união ao SC1. Esse sistema segue parcialmente o modelo, uma vez que apresenta as características sugeridas para o período que antecede a geração de sprites.

O SC de 03-04/Março/2006, analisado na seção 8.3, seguiu parcialmente o modelo conceitual, apresentando as características descritas no modelo apenas durante o período de geração dos sprites. Após atingir a máxima extensão, a área do SC se estabilizou e a FC apresentou crescimento em outros momentos. No período em que os sprites foram observados, a FC estava diminuindo e a T_{med} aumentando. A área do sistema inicialmente aumentou mas logo diminuiu. Essa característica corresponde ao período após t_2 na Figura 9.1. A maioria dos sprites desse SC, ~80%, ocorreu no período correspondente ao intervalo de tempo entre t_2 e t_3 do modelo proposto, quando a área ainda estava aumentando. Nesse período a taxa de ocorrência de relâmpagos NS+ excedeu a de NS-. O restante dos sprites, ~20%, foi observado no período correspondente ao intervalo de tempo entre t_3 e t_4 , quando a área estava diminuindo e a taxa de NS- tinha voltado a ser maior. O período em que os sprites foram observados concorda com o modelo conceitual proposto, ou seja, quando área do SC aumenta, FC diminui e T_{med} aumenta, a taxa de ocorrência de relâmpagos NS+ supera a de NS-, aumentando a probabilidade de ocorrência de sprites.

O período de ocorrência de sprites do SC de 09-10/Outubro/2007 está parcialmente de acordo com o proposto entre os horários t_2 e t_3 do modelo

conceitual. Os sprites foram observados antes do SC atingir sua área máxima e após a FC atingir o valor máximo, porém a FC estava aumentando no horário em que os sprites foram observados. Esse resultado, conforme discutido anteriormente, foi devido à presença de novas células imersas no SC, que aumentaram a sua FC.

Sugerimos que a não observação dessas características na maioria dos casos estudados se deve provavelmente a dois fatores principais: (1) as células convectivas imersas na área total do sistema estavam em diferentes momentos de seu ciclo de vida; (2) a união a outros sistemas convectivos. Devido à grande extensão dos SCs analisados há células convectivas nascendo e se dissipando imersas em sua área que alimentam a região estratiforme em diferentes horários. O método de monitoramento adotado não envolve a identificação das células convectivas individuais imersas dentro da área total dos SCs, portanto não foi realizada uma avaliação objetiva do efeito dessas células no ciclo de vida do sistema. A união dos sistemas convectivos estudados com outros sistemas convectivos a sua volta também é um fator que dificulta a caracterização do ciclo de vida desses SCs, uma vez que produzem variações abruptas nas variáveis analisadas, contribuindo para que os sistemas convectivos estudados não se encaixem no modelo proposto para a geração de sprites.

Na análise visual através de imagens de satélite foi possível identificar as características de dissipação da área convectiva, caracterizada por topos mais frios, no momento da ocorrência dos sprites. Em todos os casos estudados os sprites ocorreram em uma área de dissipação da célula convectiva imersa nos SCs ou em torno de uma região convectiva.

A diferença entre as medidas dos canais de vapor d'água (WV / 6.5 - 7.0 μm) e infravermelho (IR / 10.2 - 11.2 μm) do satélite GOES para o topo das nuvens nas localizações estimadas dos sprites e seus círculos de erro (Figura 9.2) é um importante parâmetro que permite avaliar a profundidade da tempestade e inferir o quão penetrativas são as nuvens. Machado et al. (2005) encontrou que valores de WV-IR maiores que -15°C estão associados com nuvens com

potencial para a alta atividade elétrica. Os processos físicos por trás desses resultados indicam que WV-IR são associados com nuvens profundas próximas (do inglês, *overshooting cloud tops*).

Todos os sprites observados ocorreram regiões com WV-IT $\geq -15^{\circ}\text{C}$, indicando que mesmo em dissipação essas áreas tinham uma grande quantidade de gelo e um potencial considerável para a atividade de relâmpagos NS, uma vez que, segundo Machado et al. (2005), essas tempestades estão associadas à tropopausa ou topos de tempestade penetrantes na estratosfera.

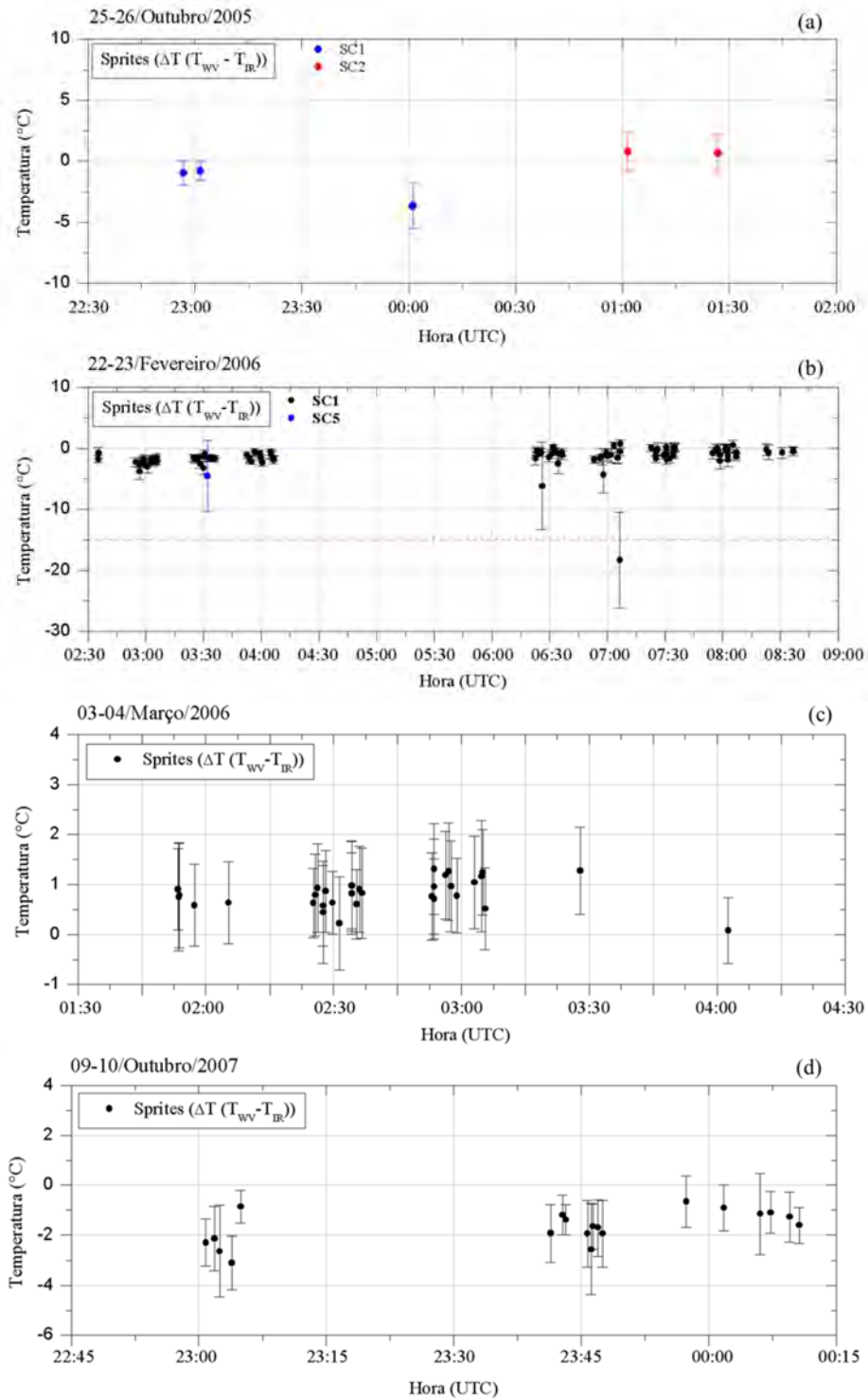


Figura 9.2 – Diferença da temperatura média dos canais WV e IR ($\Delta T = T_{WV} - T_{IR}$) no círculo de erro de localização dos Sprites: (a) 25-26/Octubre/2005; (b) 22-23/Febrero/2006; (c) 03-04/Março/2006; (d) 09-10/Octubre/2007.

10 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta à caracterização de sistemas convectivos (SCs) na América do Sul sobre os quais foram observados sprites de sítios de observação na região Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil. A análise é baseada na atividade elétrica dos relâmpagos produzidos por esses sistemas e registrados pelas redes de detecção utilizadas, e de e suas propriedades físicas, extraídas de dados de satélite. Foram estudados seis SCs sobre os quais foram observados 506 sprites durante três campanhas de observação de Eventos Luminosos Transientes (ELTs).

A caracterização dos sistemas foi realizada utilizando o horário de ocorrência dos sprites e sua localização estimada, considerando o erro na localização; dados dos satélites meteorológicos GOES 10 e 12 nos canais infravermelho (IR) e vapor d'água (WV); e dados de relâmpagos das redes de detecção RINDAT e WWLLN.

Com o objetivo de determinar as propriedades físicas dos sistemas convectivos produtores de sprites, seu ciclo de vida foi estudado com base nas seguintes grandezas área total, área convectiva, fração convectiva, temperatura média, diferença entre temperatura no infravermelho e vapor d'água, taxa de ocorrência de relâmpagos e de sprites. As áreas total e convectiva do SC foram definidas com sendo a cobertura de nuvens cumulusnimbus com $T_{\leq} -38^{\circ}\text{C}$, e $T_{\leq} -63^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Foram selecionados os relâmpagos NS dentro da área total do SC, permitindo um acompanhamento da taxa total de ocorrência de relâmpagos, e de NS- e NS+ quando a polaridade estava disponível, ao longo da vida do sistema. O acompanhamento da evolução do SC, determinação das propriedades físicas e taxa de ocorrência de relâmpagos NS permitiram melhorar o entendimento das características de um sistema produtor de sprites.

Relâmpagos que ocorreram até 100 ms antes dos sprites e até 200 km de distância deles foram selecionados como os seus possíveis geradores. Devido a baixa eficiência de detecção da rede, só foi possível identificar relâmpagos

NS geradores de sprites para ~12% dos sprites observados. Com exceção de 3 eventos os relâmpagos eram de polaridade positiva, e ocorreram preferencialmente na região de precipitação estratiforme dos SCs. Essa região favorável à geração de sprites se forma a partir da dissipação das células convectivas imersas nos SCs que alimentam a região estratiforme em área e conteúdo de água e gelo.

Quatro dos SCs analisados possuíam dados de relâmpagos com polaridade. Durante o tempo de vida desses SCs a ocorrência predominante foi de relâmpagos com polaridade negativa (NS-). Em três desses casos a ocorrência de sprites esteve associada a uma reversão entre a taxa de ocorrência de NS- e NS+.

Todos os sprites foram observados sobre regiões estratiformes. Os resultados que mostram que os sprites ocorreram sobre essas regiões podem ser identificados em um ou mais dos resultados encontrados no trabalho que são discutidos a seguir:

- A seleção de relâmpagos NS que ocorreram até 500 ms antes dos sprites e 200 km de distância indicam como é a atividade elétrica em torno do horário e da localização dos eventos. Em todos os casos estudados em que havia dados de polaridade de relâmpagos NS foi observada uma maior atividade de relâmpagos NS+ em torno do horário e da localização dos sprites. Isso sugere a presença de uma quantidade significativa de cargas positivas nessas regiões do sistema, o que é indicativo de uma região estratiforme;
- As propriedades físicas determinadas que evidenciam a característica de área de precipitação estratiforme no período de ocorrência dos sprites são: a estabilização da área do SC após ter atingido valores máximos, o decréscimo da FC e aumento da T_{med} . Essas características, aliadas a uma alta taxa de relâmpagos NS durante valores máximos de FC e reversão entre a taxa de ocorrência de NS- e NS+ no horário de ocorrência dos sprites, indicam que o SC foi fortemente eletrificado na

extensa área estratiforme gerada com a dissipação da região convectiva imersa no sistema;

- A dissipação da região convectiva e ocorrência dos sprites podem ser visualizadas através da análise das imagens de satélite no canal IR. Em todos os casos estudados os sprites ocorreram em uma área de dissipação da célula convectiva imersa nos SCs ou nos arredores (periferia) de uma região convectiva (topo mais frio).

A técnica usada no monitoramento dos SCs se mostrou coerente quanto à relação entre a FC e a atividade de relâmpagos. Em todos os casos estudados foi possível ver o aumento da taxa de relâmpagos NS com a FC. Todos os sprites foram observados após o SC atingir picos de FC. Essa condição implica que as partículas de gelo em regiões convectivas mais altas da nuvem estão se precipitando e se deslocando para a região estratiforme.

Foi proposto um modelo conceitual baseado na revisão bibliográfica que identifica o período favorável à geração de sprites no ciclo de vida de um SC. Três casos estudados através da técnica de monitoramento dos SCs se mostraram coerentes com o modelo proposto. As características comuns desse SC na geração do sprites são baixa variação da área do SC, decaimento da FC e aumento da T_{med} .

Os sistemas convectivos analisados em que os resultados do monitoramento dos SCs não coincidem com a teoria devem-se a dois fatores:

- A união de SCs, que implica em variações abruptas das propriedades físicas determinadas. O fato de um SC se unir a outro ou ser formado pela união de diversos SCs impede uma caracterização detalhada do SC, pois cada sistema tem suas próprias características no seu ciclo de vida que, quando unidos, dificultam grandemente a análise das propriedades físicas no tempo de vida;
- Não fazia parte do escopo do trabalho identificar individualmente as células convectivas dos SCs. Cada célula convectiva imersa no SC tem

o seu ciclo de vida, de modo que a dissipação da região convectiva e a advecção dos hidrometeoros carregados remanescentes torna-se um componente da parte estratiforme em diferentes horários no tempo de vida do SC.

Embora todos os sprites tenham ocorrido sobre uma região de dissipação de área convectiva, os eventos ocorreram em uma região com $\Delta T \geq -15^\circ\text{C}$ ($\Delta T = T_{\text{WV}} - T_{\text{IR}}$). Esse resultado indica que os sprites ocorreram sobre uma região de nuvens penetrativas. Região caracterizada por ter uma grande quantidade de gelo e potencial para alta atividade de relâmpagos NS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANABOR, V.; STENSRUD, D. J.; MORAES, O.L.L. Simulation of a Serial Upstream-propagating Mesoscale Convective System Event over Southeastern South America using Composite Initial Conditions. **Monthly Weather Review**, v. 137, p. 2144-2163, 2008.

ARNONE, E.; KERO, A.; M.DINELLI, B.; ENELL, C.-F.; ARNOLD, N. F.; PAPANDREA, E.; RODGER, C. J.; CARLOTTI, M.; RIDOLFI, M.; E.TURUNEN. Seeking sprite-induced signatures in remotely sensed middle atmosphere NO₂. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, n. L05807, 2008.

BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S.; STANLEY, M. A.; CUMMER, S. A. Sprites triggered by negative lightning discharges. **Geophys. Res. Lett.**, v. 26, n. 24, p. 3605-3608, 1999.

BERING, E. A.; WESCOTT, E. M.; LYONS, W. A. Observations of transient luminous events (TLEs) associated with negative cloud to ground (-CG) lightning strokes. **Geophys. Res. Lett.**, v. 31, L05104, 2004.

BIGGERSTAFF, M. J.; HOUZE JR, R.; Kinematics and Microphysics of the Transition Zone of the 10-11 June 1985 Squall Line. **J. Atmos. Sci.**, 50, 3091-3110. 1993.

BRIELS, T. M. P.; KOS, J.; WINANDS, G. J. J.; VAN VELDHUIZEN, E. M.; EBERT, U. Positive and negative streamers in ambient air measuring diameter, velocity and dissipated energy. **J. Phys. D Appl. Phys.**, v. 41, n. 234004, 2008.

CHEN, A. B.; KUO, C. L.; LEE, Y. J.; SU, H. T.; HSU, R. R.; CHERN, J. L.; FREY, H. U.; MENDE, S. B.; TAKAHASHI, Y.; FUKUNISHI, H.; CHANG, Y. S.; LIU, T. Y.; LEE, L. C. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. **J. Geophys. Res.**, v. 113, n. A08306, 2008.

COORAY, V. Mechanism of electrical discharges. In COORAY, V. (Ed.). **The lightning flash**. London The Institution of Electrical Engineers, p. 45-126, 2003.

FERREIRA, A. G. F. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

FIOLLEAU, T. **Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans les régions tropicales préparation a la mission megha-tropiques**. These, Institut Pierre Simon Laplace - CNES/CNRS. 2010.

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. 448-51, 1990.

FREY, H. U. Halos generated by negative cloud-to-ground lightning. **Geophys. Res. Lett.**, 34, L18801, 2007.

HEAVNER, M. J.; D. D. SENTMAN, D. D.; MOUDRY, D. R.; WESCOTT, E. M. Sprites, blue jets, and elves Optical evidence of energy transport across the stratopause, in Atmospheric Science Across the Stratopause . **Geophys. Monogr. Ser.**, v. 123, p. 69 – 82, AGU Washington D.C., 2000.

HOUZE, R. Jr. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. **J. Meteorol. Soc. Jpn.**, v. 60, p. 396–410. 1982.

HOUZE, R. Jr. Mesoscale convective systems. **Rev. Geophys.**, v. 42, 2004.

INAN, U. S.; SAMPSON, W. A.; TARANENKO, Y. N. Space-time structure of optical ashes and ionization changes produced by lightning-EMP. **Geophys. Res. Lett.**, v. 23, n. 2, p. 133-136, 1996.

JAYARATNE, R. Thunderstorm electrification mechanisms. In: COORAY, V. (Ed.). **The lightning Flash**. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003. p. 17-40.

KASEMIR, H. W. Qualitative ubersicht uber potential-, feld- und ladungsverhaltnisse bei einer blitzentladung in der gewitterwolke (qualitative survey of the potential, field and charge conditions during a lightning discharge in the thunderstorm cloud). In: Israel, H. (Ed.). **Das Gewitter**, Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft, 1950.

KREHBIEL, P. R.; RIOUSSET, J. A.; PASKO, V. P.; THOMAS, R. J.; RISON, W.; STANLEY, M. A.; EDENS, H. E. Upward electrical discharges from thunderstorms. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 233-237, 2008.

LANG, T. J.; LYONS, W. A.; RUTLEDGE, S. A.; MEYER, J. D.; MACGORMAN, D. R.; CUMMER, S. A. Transient luminous events above two mesoscale convective systems Storm structure and evolution. **J. Geophys. Res.**, v. 115, 2010.

LES RENARDIÈRES GROUP Negative discharges in long air gaps at Les Renardières – 1978 results. **Electra**, v.74, p.67-216, 1981.

LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; WILLIAMS, E. R.; CUMMER, S. A.; STANLEY, M. A. Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective systems. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 10, p. 2417-2427, 2003.

LYONS, W. A. The meteorology of transient luminous events – An introduction and overview. In FÜLLEKRUG, M. et al. (Ed.). **Sprites, elves and intense lightning discharges**. 1. ed. Dordrecht :Springer. v.1, cap.1, p.19-56, 2006.

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

- MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Mon. Wea. Rev.**, 126, 1630–1654. 1998.
- MACHADO, L. A. T.; LIMA, W. F. A.; PINTO Jr, O.; MORALES, C. A. Relationship between cloud-ground discharge and penetrative clouds a multichannel satellite application. **Atmos. Res.** 93, 304–309. 2009.
- MACKENZIE, T; TOYNBEE, H. Meteorological phenomena. **Nature**, 3326. 1886.
- MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 61, 1374–1387. 1980
- MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. T. Cloud-to-ground lightning and Mesoscale Convective Systems. **Atmospheric Research**. v. 99, p. 377-390, 2011.
- MAZUR, V. A physical model of lightning initiation on aircraft in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**. v. 94, pp. 3326-3340, 1989.
- MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. **Journal of Geophysical Research**. v. 103, D18, p. 23299-23308, 1998.
- MISHIN, E. V.; GENNADY, M. M. Blue Jets Upward Lightning. **Space Sci. Ver.** v.137, p. 473–488, 2008.
- MOUDRY, D. R.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M. Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1 ms time resolution. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 65, n. 5, p. 509-518, 2003.
- NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: 22 mai. 2012.
- PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; TARANENKO, Y. N. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. A3, p. 4529-4561, 1997.
- PASKO, V. P.; STANLEY, M. A.; MATHEWS, J. D.; INAN, U. S.; WOOD, T. G. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. **Nature**, v. 416, n. 6877, p. 152-154, 2002.
- PASKO, V. P.; STENBAEK-NIELSEN, H. C. Difuse and streamer regions of sprites. **Geophys. Res. Lett.**, v. 29, n. 10, 2002.
- PINTO Jr. O.; PINTO, I. R. C. A. **Relâmpagos**. 2..ed. São Paulo: Brasiliense, 2008.

- RAIZER, Y. P. **Gas discharge physics**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1997.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. Cambridge: University Press Springer, 2003.
- RODGER, C. J.; BRUNDELL, J. B.; DOWDEN, R. L. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network Postalgorithm upgrade, **Ann. Geophys.**, v. 23, p. 277–290. 2005.
- SABA, M. M. F.; CUMMINS, K. L.; WARNER, T. A.; KRIDER, E. P.; CAMPOS, L. Z. S.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO Jr, O.; FLEENOR, S. A. Positive leader characteristics from high-speed video observations. **Geophysical Research Letters** v. 35, p. L07802, 2008.
- SÃO SABBAS, F. T.; SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; PINTO Jr., O.; MENDES Jr., O.; TAYLOR, M. J. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 65, n. 5, p. 525-535, 2003.
- SÃO SABBAS, F. T.; TAYLOR, M. J.; PAULET, P. D.; BAILEY, M.; CUMMER, S.; AZAMBUJA, R. R.; SANTIAGO, J. P. C.; THOMAS, J. N.; PINTO Jr., O.; SOLORZANO, N. N.; SCHUCH, N. J.; FREITAS, S. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. Observations of proliferic transient luminous event production above a mesoscale convective system in Argentina during the Sprite2006 campaign in Brazil. **J. Geophys. Res.**, v. 115, n. A00E58, p. 20, 2010.
- 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. Lett.**, v. 22, n. 10, p. 1205-1208, 1995.
- SIMPSON, G. C. On the eletricity of rain and its origins in thunderstorms, **Philos. Trans. A**, v. 209, p. 379-413, 1909.
- SIMPSON, G. C.; SCRASE, F. J. The distribution of electricity in thunderclouds, **Proc. R. Soc. London**, Ser A, p. 309-352, 1937.
- SU, H. T.; HSU, R. R.; CHEN, A. B.; WANG, Y. C.; HSIAO, W. S.; LAI, W. C.; LEE, L. C.; SATO, M.; FUKUNISHI, H. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. **Nature**, v. 423, n. 6943, 2003.
- TAVARES, M. e SANTIAGO, M. A. M. Eletricidade Atmosférica e Fenômenos Correlatos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 4, dez., 2002.
- TAYLOR, M. J.; BAILEY, M. A.; PAUTET, P. D.; CUMMER, S. A.; JAUGEY, N.; THOMAS, J. N.; SOLORZANO, N. N.; SÃO SABBAS, F. T.; HOLZWORTH, R. H.; PINTO Jr., O.; SCHUCH, N. J. Rare measurements of a sprite with halo event driven by a negative lightning discharge over argentina. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, n. L14812, 2008.

- VILA, D; MACHADO, L.A.T.; LAURENT, H.; VELASCO, I. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, p. 233-245, 2008.
- VONNEGUT, B. Some facts and speculations concerning the origin and role of thunderstorm electricity. **Meteorol. Monogr**, p. 224-241, 1963.
- WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign 2. Blue jets. **Geophys. Res. Lett.**, v. 22, n. 10, p. 1209-1212, 1995.
- WESCOTT, E. M.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; MOUDRY, D. R.; SÃO SABBAS, F. T. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors. **J. Geophys. Res.**, v. 106, n. A6, p. 467-477, 2001.
- WILLIAMS, E. R. The electrification of thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 88-99, 1988.
- WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.D11, p.13151-13167, 1989.
- WILLIAMS, E. Charge structure and geographical variation of thunderclouds In COORAY, V. (Ed.). **The Lightning Flash. London :The Institution of Electrical Engineers**, 2003. p. 1-12.
- WILLIAMS, E.; DOWNES, E.; BOLDI, R.; LYONS, W.; HECKMAN, S. Polarity asymmetry of sprite-producing lightning A paradox?. **Radio Sci.**, 42 RS2S17, 2007.
- WILSON, C. T. R. Investigations on lightning discharges and the electric field on thunderstorms. **Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.**, v. 221(A), p.73-115. 1920.
- WILSON, C. T. R. The electric field of a thunderstorm and some of its effects. **Proc.Phys. Soc. Lond.**, v. 37, p. 32D-37D, 1925.
- ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; LIU, C; NESBITT, S. W; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on Earth?, **Bull. Am. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 1057–1071, 2006.

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.