

EVENTOS LUMINOSOS TRANSIENTES (ELTs) E A FORMAÇÃO DE *SPRITES* VERMELHOS¹

Roberto Deitos Filho²
Rodrigo Konrath³
Keila Daiane Ferrari Orso⁴

RESUMO

Os Eventos Luminosos Transientes são eventos que ocorrem na alta atmosfera, entre 40 ~ 90 km e são fenômenos descobertos recentemente. São provenientes de precipitações de grandes tempestades, sendo o relâmpago um fator essencial para a formação dos *Sprites*. Tempestades massivas, com grandes aglomerados de nuvens, como as *cumulonimbus*, acumulam grandes centros de cargas elétricas, positivas e negativas. Os relâmpagos são responsáveis pelo deslocamento dessas cargas, ocasionando a Quebra da Rigidez Dielétrica (QRD), formando um campo elétrico, que penetra nas camadas superiores da atmosfera e acaba ionizando as partículas, em grande maioria de nitrogênio, possibilitando a formação de *Sprites*, também conhecidos por *Sprites* Vermelhos pela sua coloração predominantemente avermelhada. *Sprites* são resultados da interação do campo elétrico externo formado por relâmpagos com as partículas ionizadas que se encontram na alta atmosfera, o que causa uma reação de deslocamento em velocidades relativísticas dos elétrons. Os *Sprites* interferem diretamente na química atmosférica, sendo um dos objetivos do trabalho entender os impactos dos *Sprites* na atmosfera. Será abordado no estudo como se formam tempestades “geradoras” de *Sprites*, os tipos de *Sprites* e como são formados, bem como, sua morfologia, tempo de duração e condições para a observação desses eventos. Esse trabalho é uma revisão bibliográfica dos dados coletados pela campanha de observação de 1996, nos Estados Unidos. Foi identificado que os *Sprites* podem ser independentes ou consecutivos, ou seja, podem ser um evento isolado como também vários eventos consecutivos, chamado de “grupo espacial de *Sprites*”. *Sprites* são precedidos de relâmpagos Nuvem Solo (NS) (gerador), que podem ser negativos ou positivos, a grande maioria dos ELTs documentados durante a campanha de 1996, são provenientes de relâmpagos NS+. O estudo agrupou os *Sprites* em três categorias, levando em consideração o tamanho visual e à luminosidade (Pequeno, Médio e Grande).

Palavras-chave: *Sprite* Vermelho; Tempestades; Relâmpagos.

1 INTRODUÇÃO

Eventos Luminosos Transientes (ELTs) são emissões luminosas de curta duração que ocorrem na atmosfera entre 40 e 90 km de altitude, esse fenômeno é uma consequência de atividades elétricas na troposfera (Sentman *et al.*, 1995). Por se tratar de eventos de curta duração e baixa luminosidade dificilmente são observados a olho nu sempre a noite, utilizando-se de câmeras de alta sensibilidade ou fotômetros.

¹ Artigo Científico apresentado com requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail: roberto@engechap.com.br.

³ UCEFF Faculdades. E-mail: konrath@uceff.edu.br.

⁴ UCEFF Faculdades. E-mail: keilaorso@uceff.edu.br.

Há controvérsias sobre o termo “descoberta”, mas até o momento, os *Sprites* foram primeiramente relatados durante observações astronômicas feitas em julho de 1989 no Estado de Minnesota, EUA (Franz *et al.*, 1990). O nome *Sprite* foi dado por D. D. Sentman por se tratar de algo que ainda não era entendido pela comunidade científica. Desde então várias pesquisas vêm sendo realizadas para entender sobre a fenomenologia dos ELT's (Sentman; Wescott, 1993), seus processos físicos e sua origem (Pasko *et al.*, 1997) e seu papel na química atmosférica do planeta (Asano *et al.*, 2008).

Os *Sprites* Vermelhos geralmente têm uma estrutura de brilho vertical e um diâmetro de 5 km ou mais. A parte mais brilhante está geralmente a cerca de 70 km de altitude, (Sentman *et al.*, 1995). São necessárias algumas condições incipientes para que se ocorra esse evento, sendo necessário relâmpago Nuvem Solo Positivo (NS+), onde a temperatura da tempestade somada à descarga elétrica, fazem com que se tenha uma ionização das partículas da camada superior da atmosfera e sua duração se restringe a dezenas de milissegundos. O comprimento do *Sprite* oscila entre algumas centenas de metros (Gerken *et al.* 2000).

Dentro dos *Sprites*, os mesmos podem ser categorizados de acordo com as suas aparências, neste artigo vamos falar sobre os *Sprites* tipo *C-Sprites* e *Carrot Sprites*. Os espectros luminosos ainda são um assunto discutido entre os observadores, pois diversos fatores que podem influenciar em sua categorização. Os *Sprites* podem variar de acordo com os instrumentos utilizados (câmeras, fotômetros, sensores), distância entre o observador e o evento, a interferência na atmosfera durante a observação do fenômeno e a não calibração dos instrumentos.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é analisar as principais características de um *Sprite*, bem como as condições para sua formação e, por meio de pesquisas bibliográficas, identificar as suas contribuições no sistema atmosférico.

As observações via satélite costumam atenuar todos esses fatores por estarem acima da atmosfera e deterem instrumentos propícios e calibrados para tal observação. Para essa a possibilidade de utilizar o *Imager of Sprites and Upper Atmosphere Lightnings* (ISUAL), a bordo do satélite FORMOSAT-2.

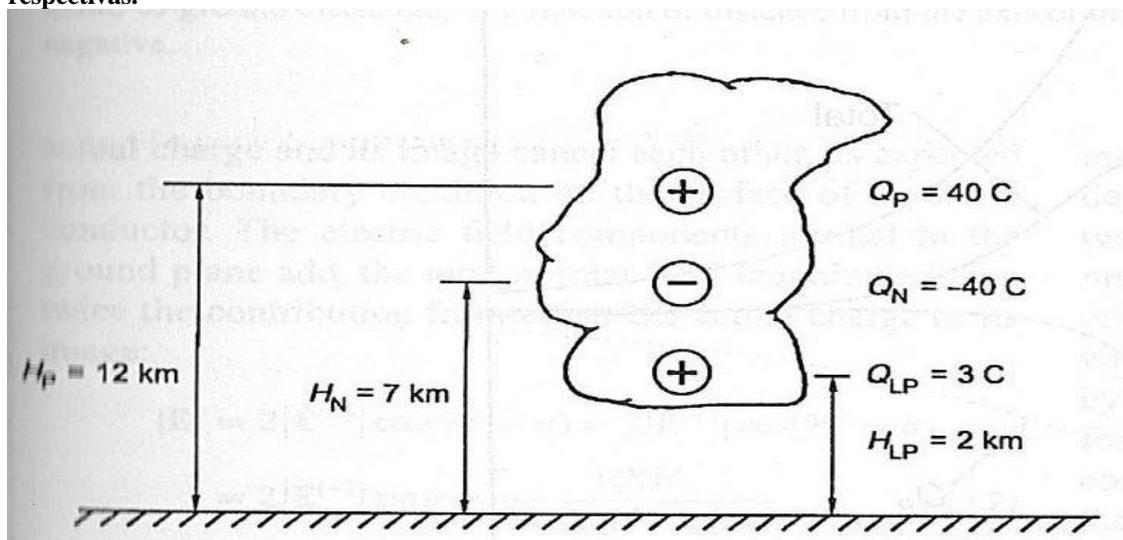
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentadas as principais características dos *Sprites*, assim como as condições para que esse ELT ocorra. A familiarização com este tópico é crucial para a entender como acontece esse evento, bem como suas características e impactos na atmosfera.

2. 1 TEMPESTADES

Uma das condições para a formação dos ELTs são grandes tempestades, com relâmpagos Nuvem-Solo (NS). Dentro das tempestades encontramos uma ou mais nuvens *cumulonimbus*⁵, que podem ser provenientes de um acúmulo de tempestades adjacentes. Essas nuvens podem ter altitudes que chegam à tropopausa (~18km de altitude) e extensões de mais de 50km, conforme Rakov e Uman (2003) representaram na Figura 1. As *Cumulonimbus* são nuvens de tempestades produtoras de relâmpagos as maiores em convecção em toda a atmosfera (Williams, 2003).

Figura 1 - Representação simplificada dos centros de carga (e suas quantidades de carga) e suas altitudes respectivas.



Fonte: Rakov e Uman (2003), p. 69.

Há diferenças na natureza entre as tempestades e suas contribuições para os *Sprites*. Variáveis como a forma das nuvens, seus centros de cargas, sua distribuição na atmosfera, os vapores de água e a instabilidade das precipitações (Williams, 2003) são alguns exemplos.

Mesmo assim os ELTs são associados a diversos tipos de tempestades e intensidades, exemplo disso são pequenos sistemas convectivos que podem gerar relâmpagos (ADACHI *et al.*, 2005), até grandes tempestades (Pinto Jr. *et al.*, 2004; São Sabbas *et al.*, 2010), denominadas Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Os SCM têm como característica grande extensão horizontal. Chegando centenas de km de diâmetro. Estudos apontam que os SCM são os maiores produtores de *Sprites* (Lyons *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2008; Lang *et al.*, 2010; São Sabbas *et al.*, 2010), esses mesmos estudos mostram a associação direta de intensos relâmpagos Nuvem-

⁵ Grande nuvem de tempestade responsável pela formação de granizo, ventos e relâmpagos.

Solo Positivo (NS+) e a formação de *Sprites* na mesosfera.

2.2 SPRITES

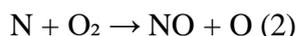
Os *Sprites* vermelhos são Eventos Luminosos Transientes de curta duração, cerca de 50 ms. As principais características que os cientistas retratam (SENTMAN *et al.* 1995) são:

- (A) Parte superior, chamada de cabelo, chegando até 90 km de altitude, onde se encontra a ionosfera;
- (B) Mais abaixo, aproximadamente na faixa de 75 km de altitude, chamado de cabeça é onde se encontram a maior parte das atividades luminosas;
- (C) Onde se encontram os *streamers*, que é plasma, são parte do *Sprite*. A coloração do *Sprite* é predominantemente avermelhada, podendo na sua parte inferior se aproximar do azul.

O principal efeito do *Sprite* é a alteração química da atmosfera. Sentman *et al.* (2008) estudou o efeito de um *streamer*, analisando espécies químicas e suas reações, a que mais se destaca, se encontra entre 60 e 70 km de altitude e é a ionização de Nitrogênio (N₂) por conta dos impactos de elétrons, como podemos ver na Equação 1:



Na Equação 2 tem-se a oxidação do nitrogênio:



Como resultado obtém-se o óxido nítrico (NO) (Sentman *et al.*, 2008). Em seguida, o óxido nítrico é totalmente convertido em dióxido de nitrogênio (NO₂) que fica pairando pela atmosfera durante minutos ou horas, pelas reações com o ozônio (O₃), oxigênio (O) e hidroperoxila (HO₂), dependendo da intensidade e quantidade produzida. Os *Sprites* têm papel ativo na mudança da química na mesosfera, sendo que o NO_x e HO_x contribuem para a destruição do O₃ na estratosfera.

Tanto os ELTs como os relâmpagos são Descargas Elétricas (DE) naturais. Na Figura 2, é possível observar a coloração do *Sprite* bem como sua altitude de abrangência e seu espectro de banda.

Figura 2 - Imagem de um *Sprite*, suas características morfológicas em diferentes altitudes.



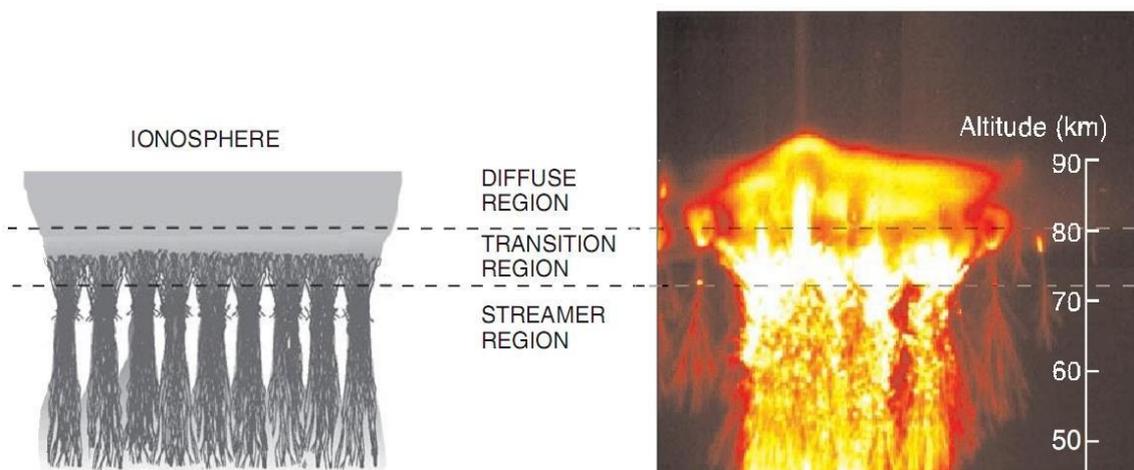
Fonte: Sentman *et al.* (1995).

Pasko *et al.* (1998) relatam a divisão de três regiões dos *Sprites*, sendo elas:

- (i) região difusa, onde se encontra no cabelo (parte superior do *Sprite* que se encontra na base da ionosfera);
- (ii) região de transição (parte intermediária onde se encontra a cabeça);
- (iii) região dos *streamers*.

Na Figura 3, à esquerda é possível visualizar as emissões das bandas moleculares do nitrogênio. Cada emissão é responsável por uma coloração específica, ou seja, é possível identificar as três regiões citadas anteriormente, com relação a altitude onde elas ocorrem, como é possível ver na imagem a direita.

Figura 3 - A morfologia do *Sprite* proposto por Pasko *et al.* (1998), onde descreve cada uma das três regiões.

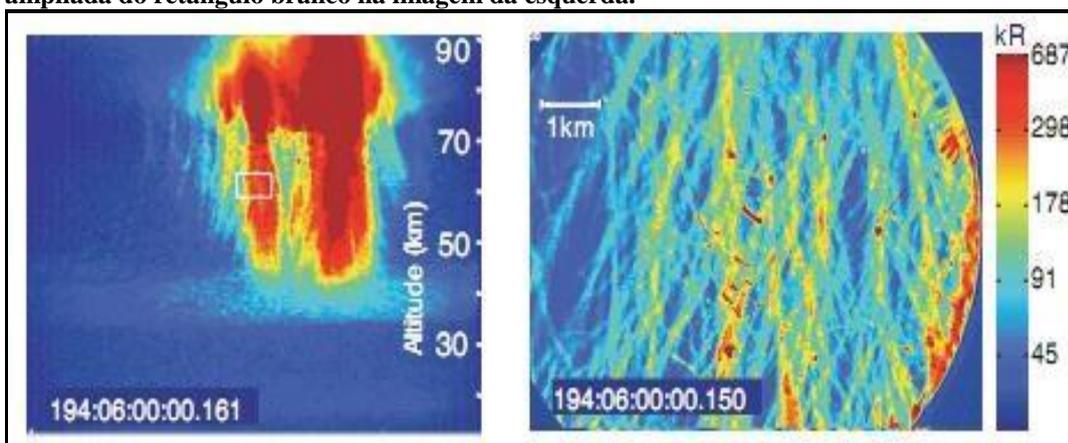


Fonte: Pasko e Stenbaek-Nielsen (2000).

Streamers, são plasma, que é gás ionizado a partir de um campo elétrico. Após análises laboratoriais, para criar plasma artificialmente, com isso compreender as descargas elétricas

(Raizer, 1997) constitui-se a teoria sobre os *streamers*, que são os filamentos dos *Sprites* que se encontram abaixo da cabeça (entre 50~70 km de altitudes aproximadamente). Os *Sprites* podem chegar a uma extensão lateral entre 50 e 60 km, porém os *streamers* tem apenas algumas centenas de metros de diâmetro (Stenbaek-Nielsen *et al.*, 2000; Gerken *et al.*, 2000). A Figura 4 mostra imagens feitas por Gerken *et al.* (2000) através de um telescópio, sendo possível a observação clara dos *Streamers*, sua composição térmica, diâmetro e a altitude em que se encontram.

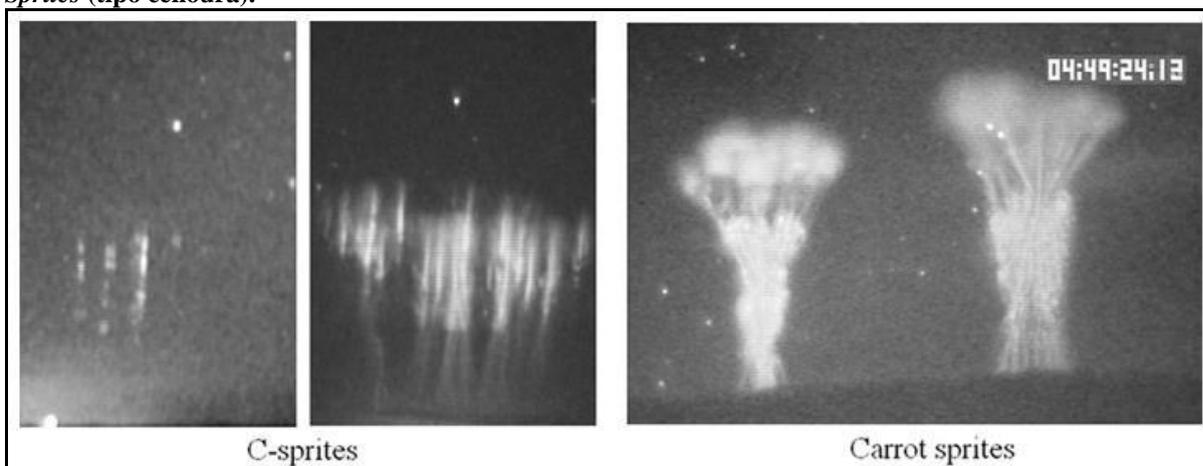
Figura 4 - Estrutura do *Streamer* visualizada a partir de um telescópio. A direita encontra-se a imagem ampliada do retângulo branco na imagem da esquerda.



Fonte: Gerken *et al.* (2000).

Há duas formas predominantes de *Sprites*, os *C-Sprites* e *Carrot Sprites* (nesse último a imagem se assemelha a uma cenoura). Também existe diferenças com relação aos *streamers* e os tipos de *Sprites*, na Figura 5 é possível visualizar os diferentes tipos.

Figura 5 - Imagem dos dois tipos de *Sprites* mais comuns. Na esquerda os *C-Sprites* e na direita os *Carrot Sprites* (tipo cenoura).



Fonte: Stenbaek-Nielsen e McHarg (2008).

No tipo *C-Sprites* é observado *streamers* se propagando diretamente para baixo. Já no tipo *Carrot Sprite*, inicialmente formam-se *streamers* para baixo, porém depois do momento

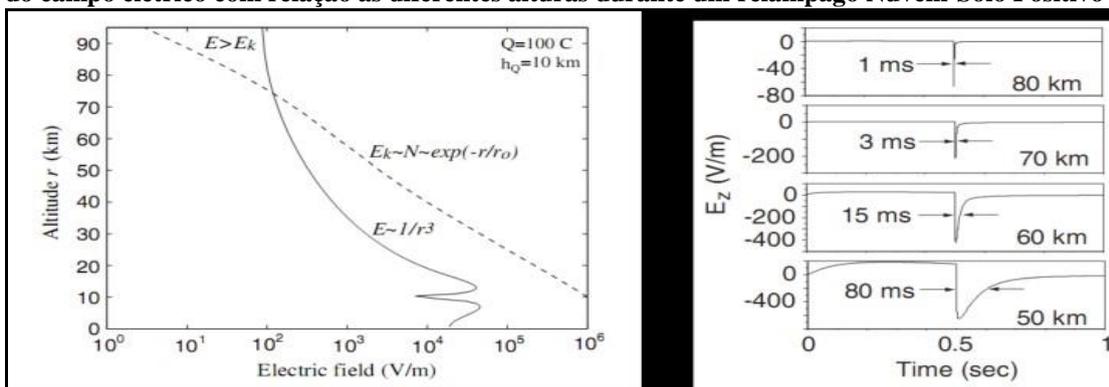
inicial é possível perceber formação de *streamers* na parte superior do sprite (Stenbaek-Nielsen e McHarg (2008)).

Pode-se dizer que os *Sprites* iniciam a partir dos *streamers* que se propagam para baixo, a partir da cabeça do sprite, o que ocorre entre 66 e 89 km de altitude. É na cabeça dos *streamers* onde se tem a maior parte da atividade luminosa, movendo-se em uma velocidade próxima a 10% da velocidade da luz, resultando em borrões luminosos como são observados na Figura 5.

2.2.1 Como se iniciam os *Sprites*

O principal modelo utilizado atualmente para conseguir descrever a iniciação de *Sprites* na mesosfera é baseado na Quebra da Rigidez Dielétrica (QRD) via campos quase-eletróstáticos (QE) que ocorrem durante as tempestades tendo os relâmpagos como fonte de geração para os *Sprites* (Velinov; Tonev, 1994; Pasko *et al.*, 1995; Pasko *et al.*, 1996b; Pasko *et al.*, 1997; São Sabbas, 1999; Hiraki; Fukunishi, 2006). O campo eletromagnético, gerado por relâmpagos, após o deslocamento das cargas elétricas das nuvens, juntamente com campos quase-eletróstáticos, são os responsáveis pela formação dos *Sprites* (Fernsler; Rowland, 1996; Valdivia *et al.*, 1997; Cho; Rycroft, 1998; Veronis *et al.*, 1999; Barrington-Leigh *et al.*, 2001; Asano *et al.*, 2008; Asano *et al.*, 2009a; Asano *et al.*, 2009b). Na Figura 6 é possível visualizar a QRD, em relação a sua altitude e a variação do campo elétrico durante um relâmpago NS+.

Figura 6 - Esquerda a demonstração da QRD em altitudes entre 10~75km. Direita se encontra a variação do campo elétrico com relação as diferentes alturas durante um relâmpago Nuvem-Solo Positivo (NS+).



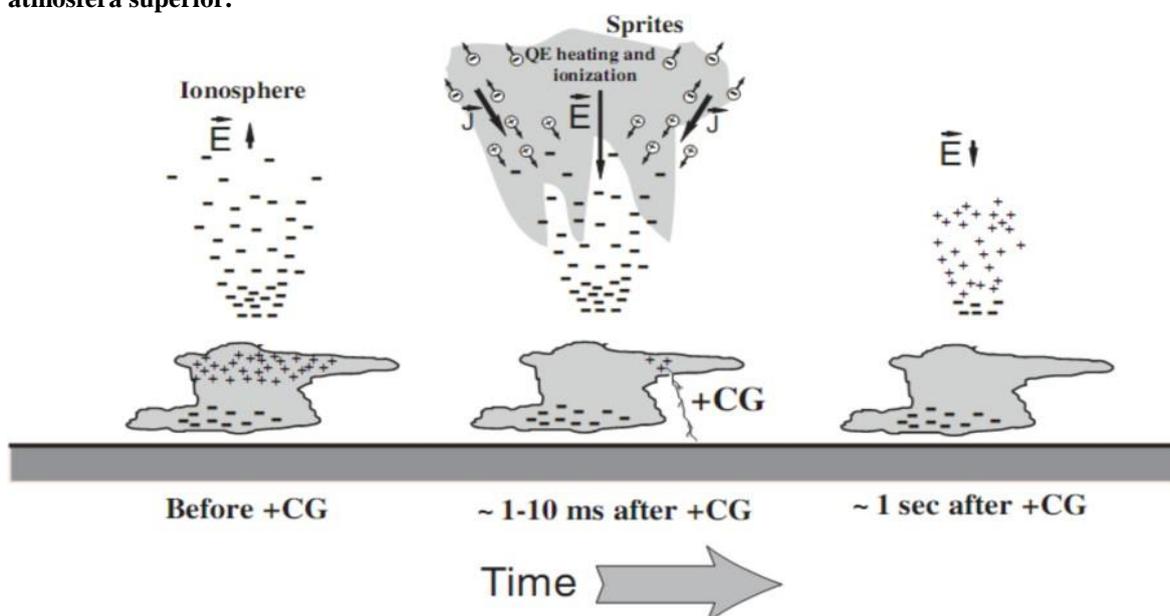
Fonte: Esquerda Pasko (2002). Direita Pasko *et al.* (1997).

2.2.2 Mecanismo para iniciação de *sprites*

A nuvem de tempestade se encontra neutra, ou seja, ela tem cargas positivas e negativas na mesma proporção que se mantem o sistema fechado. Após a quebra da rigidez dielétrica por

conta do relâmpago, tem-se uma eliminação de cargas elétricas da nuvem instantaneamente, seja ela positiva ou negativa. Com isso cria-se um campo elétrico entre o topo da nuvem e a base da ionosfera. Entre essa camada de atmosfera, encontram-se elétrons livres que começam a se movimentar por conta do campo elétrico formado, esses elétrons acabam colidindo com átomos e arrancando mais elétrons. Dado momento esses elétrons agrupados causam a quebra da rigidez dielétrica, mas agora na mesosfera, criando os *streamers*, que são plasmas, nesse instante forma-se os sprites (Pasko et al., 1995, 1996, 1997). Na Figura 7 ilustra-se um modelo de tempestade geradora de Sprite.

Figura 7 - Imagem que exemplifica a penetração do campo elétrico originado por nuvens e relâmpagos na atmosfera superior.



Fonte: Pasko (2006). Arte original de Pasko *et al.* (1997).

O campo elétrico permanece na atmosfera por um tempo superior aos ELTs, por isso pode ser definido como quase estático, já que a duração dos *Sprites* em função do tempo, é menor. Na Figura 7 é possível observar a evolução da tempestade e a relação do campo elétrico com relação ao tempo, podendo ser observado que na presença do relâmpago Nuvem-Solo Positivo (NS+) remove-se 200 C de carga elétrica, em 10 km de altitude em 1 ms. Exemplificando quantitativamente o modelo de Pasko *et al.* (1997).

Em seguida na Equação 3 Pasko também descreve a penetração do campo elétrico na atmosfera superior, propondo o acoplamento com a equação de conservação de carga elétrica (Pasko 1995, 1996, 1997):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{e_{xt}} + \rho_{atm}) + \vec{\nabla} \cdot (J \rightarrow_{e_{xt}} + J \rightarrow_{atm}) = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \equiv \frac{\rho_{\text{ext}} + \rho_{\text{atm}}}{\epsilon_0}$$

Pasko *et al.* (1997) analisam também que toda a carga retirada da nuvem de tempestade, após um relâmpago NS, pode ser interpretado como uma carga idêntica, porém de sinal oposto, fazendo com que surja um campo elétrico idêntico ao da remoção da carga original.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nas pesquisas feitas nos referenciais citados, neste trabalho, é possível entender as condições incipientes para a formação dos *Sprites*, e seus impactos químicos e físicos na atmosfera.

3.1 INSTRUMENTAÇÃO

As primeiras coletas de imagens dos ELTs foram feitas com equipamentos comuns, câmeras que coletavam 30 quadros por segundo (qps), resultando nas primeiras informações visuais sobre os *Sprites* (Franz *et al.*, 1990; Sentman *et al.*, 1995). Com a progressão dos estudos, passou-se a empregar fotômetros, espectrômetros e sensores de radiação eletromagnética frequência muito baixa (VLF) e frequência extremamente baixa (ELF). Posteriormente foram incorporadas as câmeras *Charge Coupled Device* (CCD) com uma taxa superior a 1000 quadros por segundo, um grande avanço para os estudos dos *Sprites*, por serem eventos de curtíssima duração. Atualmente se utiliza intensificadores acoplados as câmeras que realizam as capturas, para aumentar a quantidade de fótons que chegam até as CCDs, já que os *Sprites* são fenômenos de baixa intensidade luminosa.

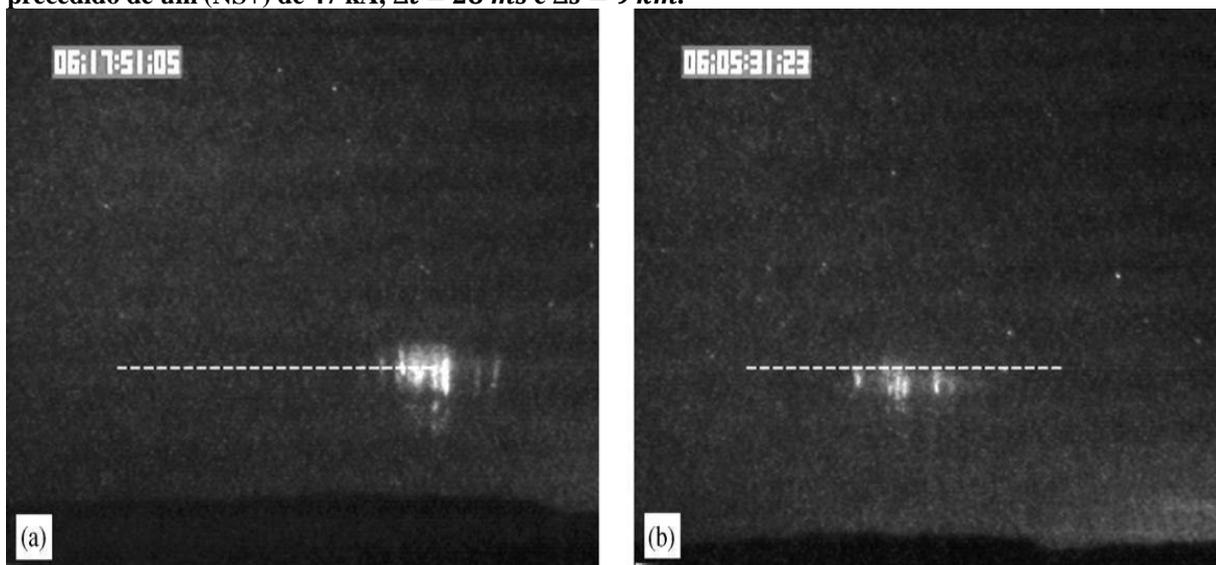
Com esses equipamentos devidamente alinhados é possível observar com clareza os ELTs mesmo estando a 500 km da tempestade. Câmeras do modelo Watec, não tem a necessidade dos intensificadores, porém são limitadas, portanto utilizadas apenas em estudos específicos dependendo do objetivo. Existem também câmeras do modelo *Electron Multiplying Charge Couple Devices* (EMCCD) que não utilizam intensificadores por obterem uma estrutura interna que multiplica as cargas de cada pixel do sensor.

Os dados apresentados nesse trabalho foram coletados em campanha realizada nos Estados Unidos nos anos de 1996, por dois grupos de pesquisadores da Universidade de Alaska (UAF) e da Universidade do Estado de Utah (USU).

3.1.1 Campanha de 1996

podem ser definidos como “grupos espaciais de *Sprites*” ou então como unidades únicas (Sentman *et al.*, 1995). Conforme pode ser visto na Figura 9, é possível uma descarga elétrica, gerar um grupo de *Sprites* de forma consecutiva.

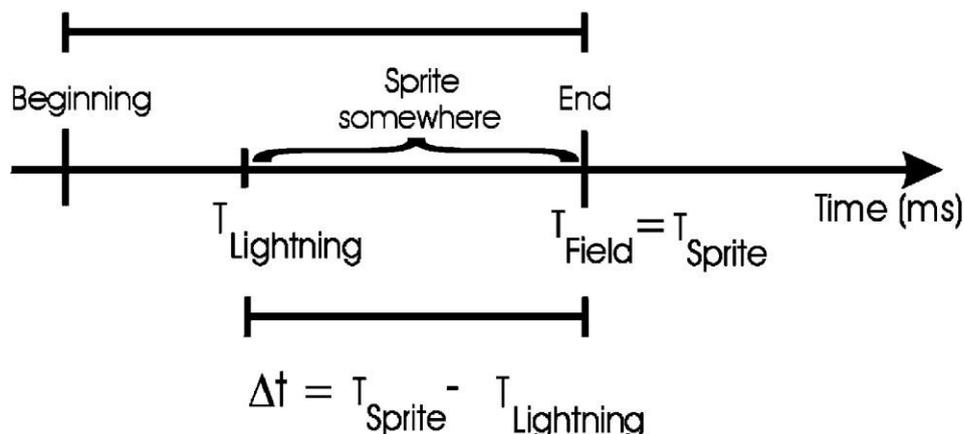
Figura 9 - Na imagem (a) é possível ver um *sprite* precedido de um (NS-) de 22 kA, gravado pelos sistemas NLDN e VLF, $\Delta t = 146 \text{ ms}$ e $\Delta s = 201 \text{ ms}$. A imagem (b) é semelhante a imagem (a) porém o *Sprite* é precedido de um (NS+) de 47 kA, $\Delta t = 28 \text{ ms}$ e $\Delta s = 9 \text{ km}$.



Fonte: UAF (1996).

Desse modo foi realizada análise estatística dos dados, levando em consideração o intervalo de tempo entre um *sprite* e seu precedente Descarga (NS+), com a triangulação, de acordo com São Sabbas (1999). Foi definida uma região de 400 km² de lado, filtrando os (NS+) que se relacionasse com o do *Sprite*, em uma janela de 1 segundo do evento. Descargas em direção ao solo registradas pelo *National Lightning Detection Network* (NLDN) foram selecionadas como (NS+) (gerador). Para o cálculo de tempo de intervalo entre os *Sprites* e os (NS+) (gerador) foi utilizado ($\Delta t = t_{\text{sprite}} - t_{\text{raio}}$), o GPS (t_{campo}) e o (t_{sprite}) foi utilizado como o primeiro *Sprite* avistado, conforme mostra na Figura 10. Já na Figura 10 ilustra-se a cronologia dos eventos.

Figura 10 - Diferença de tempo entre o sprite, o relâmpago e o *preset* do GPS.
 1 video field = ~16,7 ms



Fonte: São Sabbas (1999).

Cada duração nos campos de vídeo tem aproximadamente 16,7 ms, logo o início da imagem está em $t\text{-campo} - 16,7$ ms, e o final em $t\text{-campo}$ (= $t\text{-sprite}$ quando um sprite está presente). Onde o intervalo de tempo para o sprite pode ser interpretado por $t\text{-campo} - 16,7$ ms a $t\text{-sprite}$, onde os 16,7 ms é a máxima incerteza do acontecimento do *Sprite*. Já quando o CG (gerador) ocorre dentro do intervalo do campo do vídeo que tenha *Sprite*, pode se dizer que Δt pode ser inferior a 16,7 ms.

Conforme Bell *et al.* (1998) sugere, através de suas observações, os *Sprites* pequenos geram os maiores atrasos, com descargas intra-nuvens horizontais, removendo a carga necessária para a geração dos *Sprites*. Com isso São Sabbas (1999) associa os eventos maiores para Δt entre 0 e 15 ms, já para os eventos menores essa variação é na casa dos 100 ms. Para isso o estudo agrupou em três categorias, levando em consideração o tamanho visual e à luminosidade (Pequeno, Médio e Grande). Não é identificada variação visual entre os *Sprites* com Δt curto ou longo, apenas no aspecto luminoso é possível relacionar distinções. Foi sugerido que o atraso de tempo entre os relâmpagos e *Sprites* tem relação com a escala de grandeza do evento, já que o campo elétrico transitório, responsável pela QRD, ocorre na mesosfera, esse estudo é reforçado nas teses dos *streamers* (PASKO *et al.*, 1998; RAIZER *et al.*, 1998).

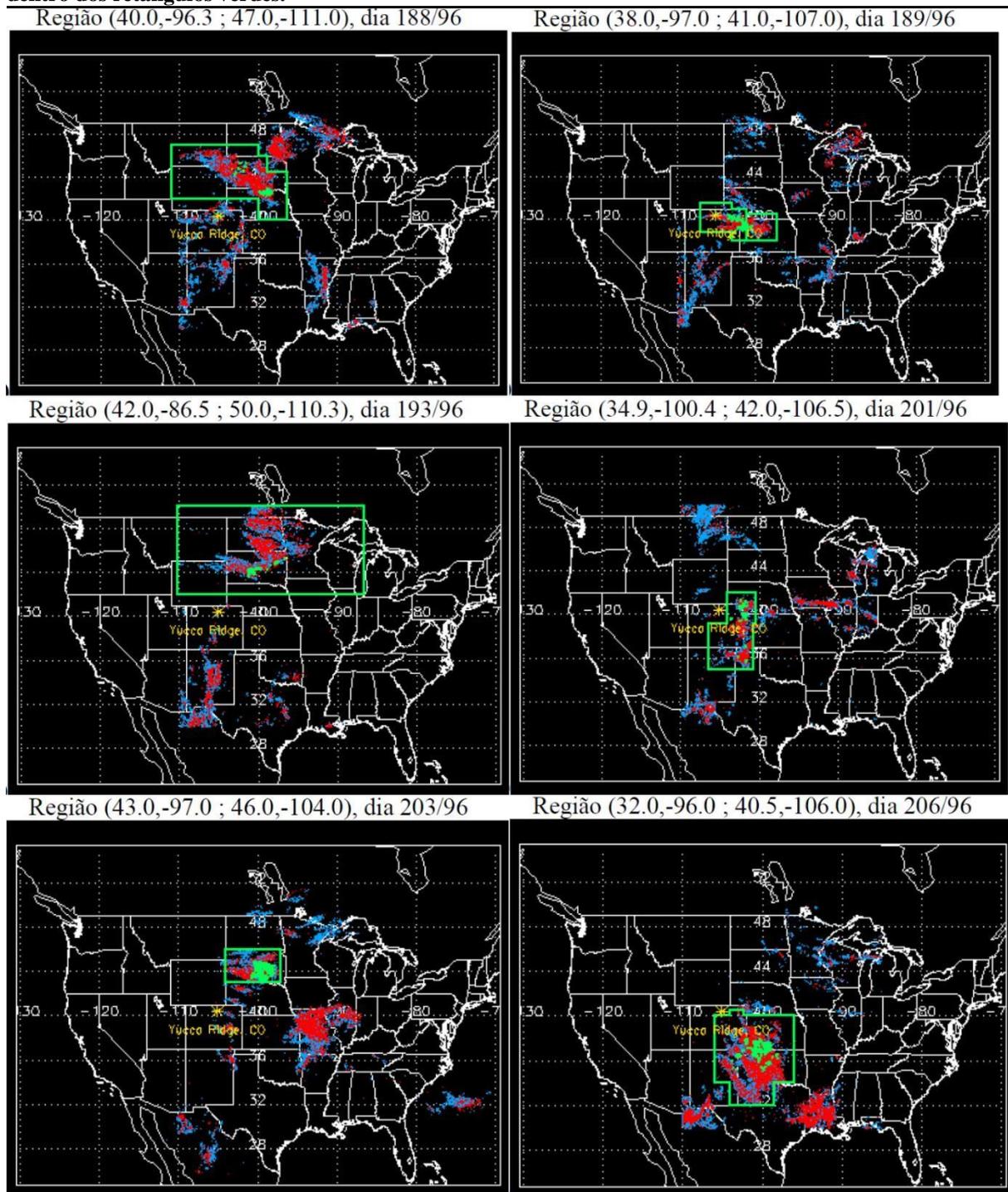
A maior parte dos *Sprites* associados a (NS+) foi registrada com um Δt de 40 ms após o (NS+), isso sugere 40 ms como um limitador entre o atraso do (NS+) e os *Sprites* que foram observados. Com isso se tem um intervalo de aproximadamente 16,7 ms entre os *Sprites* consecutivos e um tempo máximo de 40 ms entre os (NS+) (gerador), o que foi chamado de “tempo de *Sprite*”. Com isso São Sabbas (1999) levantaram a hipótese de que os elétrons

provenientes do mesmo (NS+), pode levar até 40 ms para a formação dos *streamers*, em diferentes locais.

4.2 COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE TEMPESTADES GERADORAS DE *SPRITES*

Conforme dados coletados na campanha de 1996, São Sabbas (1999) analisou os *Sprites* provenientes de tempestades nos dias 6 (188), 7 (189), 11 (193), 19 (201), 21 (203), 22 (204) e 24 (206), como mostra a Figura 11, no sítio de YRFS, dados fornecidos pela NLDN, durante o período de 0 a 14 h (TU), nas coordenadas retangulares de 30° a 50° N de latitude e 110° a 85° O de longitude.

Figura 11 - Relâmpagos Positivos (pontos vermelhos) associados a *Sprites* (asterísticos verdes), Relâmpagos Negativos (pontos azuis), na região de *Yucca Ridge*, Colorado USA, as tempestades analisadas dentro dos retângulos verdes.



Fonte: São Sabbas (1999).

Durante o estudo, que foi dividido em dois grupos, sendo o critério de seleção, dentro da intensidade nas atividades de *Sprites*, sendo eles, número total de eventos, máximo número de *Sprites* ocorridos no intervalo de 5 minutos e o terceiro critério, relacionado com o aspecto visual dos *Sprites* que foram gravados, como pode ser visto na Tabela 1. No Grupo I é possível

identificar uma grande atividade de eventos, já o Grupo II é considerado de baixa atividade de eventos, como pode-se ver na quantidade de *Sprites* registrados.

Tabela 1 - Análise das observações dos Grupos I e II das atividades dos *Sprites* na Campanha de 1996.

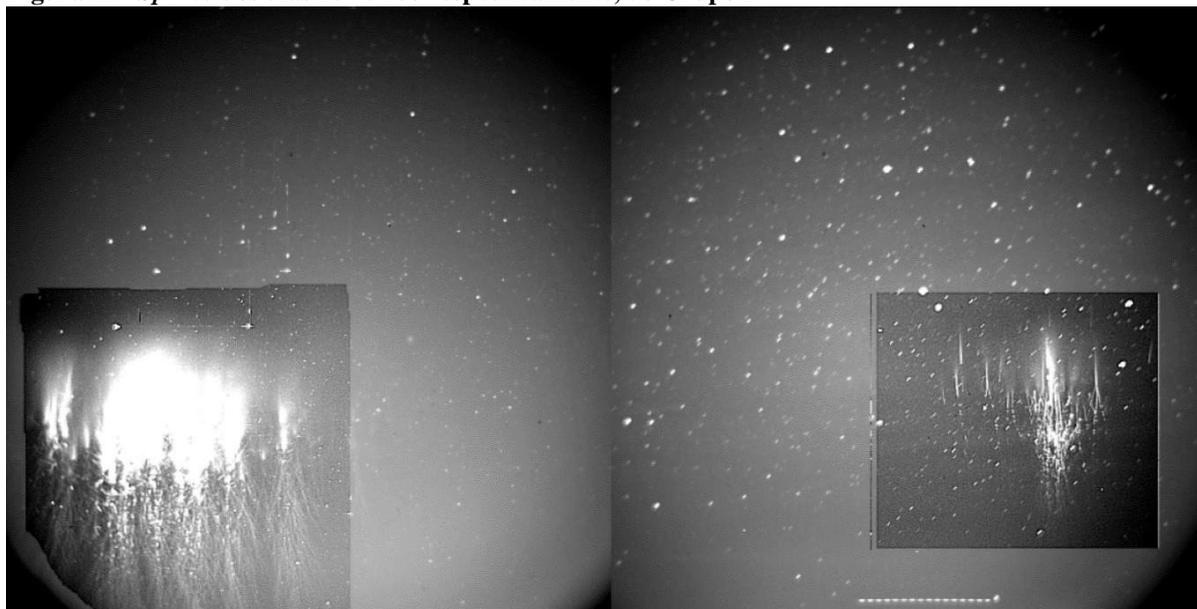
Grupo I					
Dia	Período de Observação (TU)	Duração	Período de registro de <i>Sprites</i> (TU)	Duração	Nº total de <i>Sprites</i>
189	03:49 – 08:35 ?	4 h e 46 min ?	03:57 - 08:35	4 h e 22 min	88
201	03:30 – 08:28	4 h e 58 min	04:12 – 07:17	3 h e 5 min	83
203	03:34 – 10:10	6 h e 44 min	06:40 – 10:07	3 h e 27 min	212
204	03:23 – 08:41	5 h e 4 min	04:22 – 08:29	4 h e 7 min	84
206	03:32 – 08:56	5 h e 24 min	03:36 – 08:56	5 h e 20 min	205

Grupo II					
Dia	Período de Observação (TU)	Duração	Período de registro de <i>Sprites</i> (TU)	Duração	Nº total de <i>Sprites</i>
188	04:54 – 08:20	3 h e 26 min	05:03 – 07:37	2 h e 34 min	36
193	3:55 – 08:50	4 h e 55 min	06:59 – 08:31	1 h e 32 min	38

Fonte: São Sabbas (1999).

Na Figura 12 São Sabbas (1999) ilustra alguns *Sprites* capturados pelas câmeras na campanha de 1996, foram utilizadas câmeras CCD, aplicado filtros e ajustes de níveis para melhor visualização dos *Sprites*.

Figura 12 - *Sprites* dos dias 204 e 206 respectivamente, do Grupo I.



Fonte: São Sabbas (1999).

Foi identificado que possivelmente ocorreram eventos antes e depois dos registros, sendo que o término das observações se deve ao fato do horário e o ofuscamento da visualização dos *Sprites* por conta da luminosidade do amanhecer do dia.

4.3 DISCUSSÕES

Levando em consideração os resultados alcançados pelos estudos referenciados nesse trabalho, é possível identificar a relação direta entre as tempestades, relâmpagos e ELTs. As questões físicas da dinâmica eletromagnética na atmosfera e como esses eventos têm sido estudados, beneficiando pesquisas futuras.

As condições incipientes dos *Sprites* ficam claras que têm relação direta com a física da atmosfera, se relacionando diretamente com a formação de grandes tempestades nos trópicos. A utilização da triangulação para identificar *Sprites* é uma abordagem robusta, permitindo a localização precisa desses eventos na atmosfera. A definição do "tempo de sprite" como o intervalo entre *Sprites* consecutivos e o limite de 40 ms entre *Sprites* e seus +CG (gerador) é crucial para entender a dinâmica temporal dessas ocorrências, a análise das diferenças de tempo entre *Sprites*, relâmpagos e sinais de GPS fornece informações úteis sobre a relação temporal entre esses eventos.

O estudo dos aspectos elétricos envolvendo a atmosfera, é fundamental para melhorar a compreensão sobre as interferências que podem ocorrer. Durante esses eventos, que envolvem grandes tempestades e muita geração de cargas elétricas, que são geradoras de *Sprites*, ocorrem os acoplamentos eletrodinâmicos das camadas superiores da atmosfera. Com todos esses fatores, expostos em tempos relativísticos, mas consecutivos, faz com que se tenha uma “zona” de perigo, de certa forma, para alguns sistemas elétricos, como por exemplos os sistemas elétricos dos aviões, ou linhas de transmissões. Já na alta atmosfera esses eventos geram campos eletromagnéticos que podem interferir em sinais de satélites, porém como o tempo dos eventos é na casa dos ms, não apresentam grandes problemas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi abordado, quais são as principais condições para a iniciação dos ELTs, como as tempestades geradoras de *Sprites* descritas por Rakov e Uman (2003). A física atmosférica que propicia grandes convecções e relâmpagos, que são responsáveis pela QRD e a formação de campos elétricos, que possibilitam a ionização de partículas e geração de

streamers.

O trabalho elucidou algumas questões que envolvem a eletricidade proveniente de descargas atmosféricas e suas reações com partículas encontradas em cada camada, onde que DEs são responsáveis pelos acoplamentos eletrodinâmicos das camadas superiores, como mesosfera, troposfera e ionosfera. O principal impacto dos *Sprites* é a alteração da química atmosférica.

O Brasil é um dos países com maior incidência de relâmpagos, aproximadamente 100 milhões por ano, e ainda engatinha nos estudos de ELTs, mesmo possuindo condições favoráveis para as observações, como a região sul do país, fazendo-se necessário maiores pesquisas levando em consideração as características de cada região, que são pouquíssimas estudadas.

Outro assunto que foi levantado no trabalho, mas que seria tema para aprofundar em um estudo futuro, seria as mudanças ocasionadas por *Sprites* na química atmosférica local, quais os impactos, benefícios e as mudanças meteorológicas podem causar algum distúrbio nesses eventos. Com isso, uma aplicação seria estudar se há conexão com anomalias na ionosfera, que causam atrasos ou refração em sinais de satélites.

REFERÊNCIAS

ADACHI, T.; FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; SATO, M.; OHKUBO, A.; YAMAMOTO, K. **Characteristics of thunderstorm systems producing winter *Sprites* in Japan**. J. Geophys. Res., v. 110, n. D11203, 2005.

ASANO, T.; HAYAKAWA, M.; CHO, M.; SUZUKI, T. **Computer simulations on the initiation and morphological difference of japan winter and summer *Sprites***. J. Geophys. Res., v. 113, n. A02308, 2008.

ASANO, T.; SUZUKI, T.; HAYAKAWA, M.; CHO, M. **Three-dimensional EM computer simulation on sprite initiation above a horizontal lightning discharge**. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., v. 71, 2009.

ASANO, T.; SUZUKI, T.; HIRAKI, Y.; MAREEV, E.; CHO, M.; HAYAKAWA, M. **Computer simulations on sprite initiation for realistic lightning models with higher-frequency surges**. J. Geophys. Res., v. 114, n. A02310, 2009.

BARRINGTON-LEIGH, C. P. **Fast photometric imaging of high altitude optical flashes above thunderstorms**. Tese (Doutorado) | Stanford Univ., Stanford, Calif., 2000.

BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S.; STANLEY, M. A. **Identification of *Sprites* and elves with intensified video and broadband array photometry**. J. Geophys. Res., v. 106, n. A2, p. 1741, 2001.

BELL, T.F., REISING, S.C., INAN, U.S. **Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with red *Sprites***, 1998.

CHO, M.; RYCROFT, M. J. **Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud-top to the ionosphere**. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, v. 60, n. 7-9, p. 888, 1998.

FERNSLER, R.; ROWLAND, H. **Models of lightning-produced *Sprites* and elves**. *J. Geophys. Res.*, v. 101, n. D23, p. 29653, 1996.

FRANZ, R. C.; NEMZEK, R. J.; WINCKLER, J. R. **Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system**. *Science*, v. 249, n. 4964, 1990.
F.T. SÃO SABBAS *et al.* **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 65 525 – 535 (2003).

GERKEN, E. A.; INAN, U. S.; BARRINGTON-LEIGH, C. P. **Telescopic imaging of *Sprites***. *Geophys. Res. Lett.*, v. 27, n. 17, p. 2637, 2000.

HIRAKI, Y.; FUKUNISHI, H. **Theoretical criterion of charge moment change by lightning for initiation of *Sprites***. *J. Geophys. Res.*, v. 111, n. A11305, 2006.

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, n. A00E22, 2010.

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**. *Mon. Wea. Rev.*, v. 131, n. 10, p. 2417{2427, 2003.

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, 2003.

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; TARANENKO, Y. N.; BELL, T. F. **Heating, ionization and upward discharges in the mesosphere due to intense quasi-electrostatic thundercloud elds**. *Geophys. Res. Lett.*, v. 22, n. 4, p.365, 1995.

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F. **Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields**. *Geophys. Res. Lett.*, v. 23, n. 3, p. 301,1996.

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; TARANENKO, Y. N. ***Sprites* produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere**. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. A3, 1997.

PASKO, V.P., INAN, U.S., BELL, T.F. **Spatial structure of *Sprites***. 199

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. 154, 2002.

PINTO Jr., O.; SABA, M. M. F.; PINTO, I. R. C. A.; SÃO SABBAS, F. T.; NACCARATO, K. P.; SOLORZANO, N. N.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P. D.; HOLZWORTH, R. H.

Thunderstorm and lightning characteristics associated with *Sprites* in Brazil. *Geophys. Res. Lett.*, v. 31, n. L13103, 2004.

RAIZER, Y. P. **Gas discharge physics.** 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1997.

RAIZER, Yu.P., MILIKH, G.M., SHNEIDER, M.N., NOVAKOVSKI, S.V., **Long streamers in the upper atmosphere above a thundercloud,** 1998.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects.** Cambridge University Press: Springer, 2003.

RYCROFT, M. J.; CHO, M. **Modelling electric and magnetic fields due to thunderclouds and lightning from cloud-top to the ionosphere.** *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, v. 60, n. 1998.

SÃO SABBAS, F.T. **Estudo da relação entre *Sprites* e os relâmpagos das tempestades associadas.** Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil, março de 1999.

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 prolific transient luminous event production above a mesoscale convective system in Argentina during the Sprite2006 campaign in Brazil. *J. Geophys. Res.*, v. 115, n. A00E58, 2010.

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M. **Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft.** *Geophys. Res. Lett.*, v. 20, n. 24, 1993.

SENTMAN, D.D., WESCOTT, E.M., OSBORNE, D.L., HAMPTON, D.L., HEAVNER, M.J. **Preliminary results from the *Sprites94* aircraft campaign:** 1. *Red Sprites.* 1995.

SENTMAN, D. D.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MCHARG, M. G.; MORRILL, J. S. **Plasma chemistry of sprite streamers.** *J. Geophys. Res.*, v. 113, n. D11112, 2008.

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MOUDRY, D.; WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D.; SÃO SABBAS, F. T. ***Sprites* and possible mesospheric effects.** *Geophys. Res. Lett.*, v. 27, n. 23, p. 3829, 2000.

STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MCHARG, M. G. **High time-resolution sprite imaging: observations and implications.** *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 41, n. 234009, 2008.

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.

VALDIVIA, J. A.; MILIKH, G.; PAPADOPOULOS, K. **Red Sprites: Lightning as a fractal antenna.** Geophys. Res. Lett., v. 24, n. 24, 1997.

VELINOV, P. I.; TONEV, P. T. **Modelling the penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere.** J. Atmos. Solar-Terr. Phys., v. 57, n. 6, 1994.

VERONIS, G.; PASKO, V. P.; INAN, U. S. **Characteristics of mesospheric optical emissions produced by lightning discharges,** 1999.

WILLIAMS, E. R. **Charge structure and geographical variation of thunderclouds.** In: COORAY, V. (Ed.). *The lightning flash.* London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade da vida, ter acesso a tantos conhecimentos no andar dessa existência, faz com que tudo valha a pena.

Sou eternamente grato a meus pais, que sempre priorizaram meus estudos e deram todas as condições para que possa estar elaborando esse estudo hoje, muitas vezes renunciando a seu próprio conforto para possibilitar um ensino de qualidade, hoje dedico esse trabalho a vocês que seguem me acompanhando. A minha irmã que hoje me força naturalmente a ser exemplo para poder auxiliá-la em sua jornada, o que é um prazer de minha parte.

Agradeço a minha noiva por sua paciência e por estar ao meu lado nos momentos mais desafiadores até o presente momento. Minha vida faz mais sentido na sua companhia. A minha sogra e sogro que acompanharam e incentivaram de variadas formas todas as etapas do meu estudo.

Impossível não agradecer aos meus amigos “cerejas” que desde sempre acompanharam e incentivaram que esse momento chegasse em minha vida. Parafraseando William Shakespeare “– E que bons amigos são a família que nos permitiram escolher.” Gostaria de mencionar também a todos que fizeram parte deste trabalho, diretamente ou indiretamente, amigos que a faculdade me deu, colegas, sócios, professores, amigo Berna que deu-me boas orientações no TCC, meu orientador que desde o início aceitou o desafio deste trabalho e prontamente foi solícito em todas as etapas, ao meu coordenador que auxiliou na participação da Miniescola de Física Espacial, onde foi crucial para colher material para a elaboração deste trabalho.

Para meu pai que me acompanha em todos os passos dessa caminhada e sempre foi minha inspiração nos momentos desafiadores desse trabalho. Mesmo depois da sua passagem física, continua me ensinando e estando presente. Por acreditar no que sempre me disse, que poderia ser e fazer o que quisesse, bastava querer de verdade e merecer, que aqui estou hoje. Gratidão e até o eterno retorno.

“O conhecimento amplia a vida. Conhecer é viver uma realidade que a ignorância impede desfrutar.” - RAUMSOL, Exegese Logosófica, pg. 28