



Ministério da
Ciência e Tecnologia



ANÁLISE DO SOM GERADO POR RAIOS POSITIVOS E NEGATIVOS.

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC / CNPq / INPE)**

Shailine Fonseca Viegas (FATEC / INFO, Bolsista PIBIC / CNPq)

E-mail: s_fviegas@yahoo.com.br

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (CCST / INPE, Orientador)

E-mail: msaba@dge.inpe.br

INPE
São José dos Campos



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



ANÁLISE DO SOM GERADO POR RAIOS POSITIVOS E NEGATIVOS.

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Shailine Fonseca Viegas (FATEC / INFO, Bolsista PIBIC / CNPq)

E-mail: s_fviegas@yahoo.com.br

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (CCST/INPE, Orientador)

E-mail: msaba@dge.inpe.br

Julho de 2012

RESUMO

Neste trabalho realizaremos a análise de sons de relâmpagos positivos e negativos, a fim de destacar suas principais características e efeitos, fornecendo uma visão sobre esse fenômeno e sua importância.

Para a realização desses estudos, combinamos gravações feitas através de câmeras de vídeo VHS e de um microfone supercadióide (Shure BETA 52A Supercadióide), ambas sincronizadas e com horário universal (GPS), para comparar os parâmetros relacionados à ocorrência dos trovões e sua distribuição temporal, assim como encontrar características de mais trovões tornando possível uma análise estatística detalhada deste fenômeno.

Selecionamos 18 casos de relâmpagos ocorridos a uma distância inferior ou igual a 10 km e que foram observados utilizando imagens de vídeo juntamente com arquivos de áudio captados simultaneamente aos vídeos durante as tempestades. Os dados dos raios e trovões analisados foram coletados entre 2011 e 2012 no Brasil.

ANALYSIS OF SOUND GENERATED BY POSITIVE AND NEGATIVE LIGHTNING FLASHES.

ABSTRACT

This work analyzes the sounds of positive and negative lightning flashes, in order to highlight its main characteristics and effects, providing an insight into this phenomenon and its importance.

For this study, recordings made via VHS video cameras and a microphone supercardioid (Shure BETA 52A Supercardioid) were combined, both synchronized with universal time (GPS) to compare the parameters related to the occurrence of thunder and their temporal distribution as well as finding more thunder features, making possible a detailed statistical analysis of this phenomenon.

In order to provide the experiment, 18 cases of lightning flashes that occurred at a distance less than or equal to 10 km and were selected and observed using video images and audio files captured during the storms. The thunder and lightning data analyzed were collected between 2011 and 2012 in Brazil.

LISTA DE FÍGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos	2
FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo	5
FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera 8000S MotionScope com sua placa de interface com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel	10
FIGURA 2.2 – Antena plana utilizada em medidas de campo elétrico	10
FIGURA 2.3 – Microfone Shure BETA 52ª Supercardióideos	11
FIGURA 2.4 – Esquema de montagem do campo elétrico	13
FIGURA 2.5 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana	14
FIGURA 2.6 - Torre de observação do CTA/IAE/AEL	15
FIGURA 2.7 – Esquema detalhado de captura de som	17
FIGURA 3.1 – Planilha de Controle	18
FIGURA 3.2 – Gráfico de dispersão para comparação da diferença entre detecção da distância pelo sistema e pela análise do som	20

Sumário

1.	INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
1.1.1	Histórico.....	1
1.1.2	Definição, Tipos de Relâmpagos e Características	2
1.1.3	Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características.....	3
1.1.4	Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo	7
1.1.5	Definição e Características do Trovão	7
1.1.6	Objetivos do Trabalho.....	8
2.	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	9
2.1.1	Materiais e Equipamentos Utilizados.....	9
2.1.2	Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade.....	9
2.1.3	Sistema de Captação de Áudio.....	11
2.1.4	Sistema de Medição de Campo Elétrico	12
2.1.5	Local de Observação.....	14
2.1.6	Procedimento das Observações.....	15
3.	RESULTADOS	17
3.1.1	Campanha de Coleta de Dados 2011-2012	17
3.1.2	Análise dos Dados.....	17
4.	CONCLUSÃO	21
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1.1 Histórico

A ocorrência de relâmpagos em nosso planeta é bastante comum e mais antiga do que a própria humanidade. O estudo destes fenômenos no Brasil teve início há 33 anos, durante este período foi possível observar algumas características diferentes daquelas relatadas na literatura internacional. Este fato, por si só, justifica a continuidade dos esforços já realizados neste sentido.

O relâmpago está entre os fenômenos naturais que mais causam mortes nos Estados Unidos (Wood, 1988), sendo que no Brasil ele é responsável por 100 a 200 mortes por ano além de causar um prejuízo anual em torno de 500 milhões de dólares (Pinto e Pinto, 2000).

Vários setores de atividades são prejudicados diretamente pelos relâmpagos. Transmissão de energia elétrica e telecomunicações são os maiores afetados, mas eles também constituem uma grande ameaça para indústrias e edifícios (comerciais ou residenciais), além da própria segurança das pessoas. Os sistemas de proteção hoje utilizados são desenvolvidos a partir de observações e dados de raios obtidos em outros países (e fora da região tropical, caso em que o Brasil se encaixa), o que aumenta a importância de se possuir mais dados dos casos ocorridos em nossa região.

Os dados colhidos dos relâmpagos no Brasil são baseados em:

- Parâmetros fornecidos pela BrasilDat, um conjunto de 47 sensores localizados no Brasil que pertence a um consórcio de empresas com participação do INPE (Pinto, 2003).
- Raios artificiais (induzidos), cujas características são apenas equivalentes aos naturais, induzidos por foguetes lançados pelo INPE no CIPRIN (Centro Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais), localizado em Cachoeira Paulista (Saba et al, 2005).

- Imagens de câmeras rápidas e dados de campo elétrico de raios naturais. Ambos sincronizados e com horário universal (GPS) com precisão de milissegundo (Ballarotti et al., 2005; Saba et al., 2006).

1.1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características

Um relâmpago é definido como sendo uma descarga transitória de alta corrente cujo comprimento percorrido tem dimensão de quilômetros (Uman e Krider, 1989). A rigor, uma nuvem não necessita estar envolvida com o fenômeno, mas geralmente ocorre a participação de um tipo específico de nuvem: a nuvem de tempestade, conhecida por *cumulonimbus*. A FIGURA 1.1 mostra uma fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.



FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.

Denominamos os tipos de relâmpagos em função de sua origem e do ponto onde terminam. Eles podem ser classificados em; (1) aqueles que permanecem no céu

(chamado Intranuvem ou IN) e, (2) aqueles que tocam o solo (Nuvem-solo, NS ou Solo-nuvem, SN).

Os relâmpagos IN são os mais frequentes (cerca de 80% do número total global de relâmpagos), mas de difícil estudo por ocorrerem em meio à opacidade da nuvem. Sua investigação requer o uso de radares e antenas de rádio frequência. Podem ser considerados como curto-circuito durante o processo de separação de cargas que ocorre durante a tempestade no interior da nuvem (Pinto e Pinto, 2000).

Os relâmpagos que envolvem o solo, nuvem-solo e solo-nuvem, embora não sejam os mais frequentes, são os mais estudados por estarem mais acessíveis à observação visual – por conseguinte, à observação instrumentada também –, e por causa do perigo que apresentam. Os relâmpagos que envolvem o solo são denominados usualmente por raios. Estes, por sua vez, podem ser divididos em dois tipos: os negativos e os positivos, dependendo da polaridade predominante das cargas na região da nuvem onde se originam. Assim, existem quatro subtipos: NS negativo, NS positivo, SN negativo e SN positivo.

Os relâmpagos nuvem-solo negativos “nascem” no centro negativo de cargas próximo à base da nuvem e, em geral, são mais frequentes que os positivos. Os relâmpagos positivos são menos conhecidos, e só foram estudados mais detalhadamente nas últimas décadas. Acredita-se que, na maior parte das vezes, eles se originam no centro positivo de cargas transportando do solo para nuvem uma carga negativa, ou seja, equivalente à transferência de cargas positivas para o solo (Saba, 1997). A polaridade da descarga é determinada, portanto, pela polaridade da carga (resultante) depositada no solo.

Os relâmpagos Solo-Nuvem são raros em comparação com os nuvem-solo, originando-se geralmente de pontos elevados tais como torres, edifícios, montanhas e árvores.

1.1.3 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características

Um relâmpago nuvem-solo negativo segue geralmente seis etapas, nesta ordem, a saber: (a) Pulso de Quebra de Rigidez ou descarga p-N, (b) líder escalonado, (c) descarga conectante, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno

subsequente, sendo que as etapas (e) e (f) podem se repetir várias vezes ou mesmo não ocorrer (Saba, 1997):

a) Os relâmpagos negativos para o solo começam com uma descarga entre o centro positivo menor na base da nuvem e o centro negativo para a liberação dos elétrons ligados às partículas de água ou gelo. Esta descarga é conhecida como Pulso de Quebra de Rigidez;

b) Uma fraca descarga luminosa (geralmente não visível) se propaga em direção ao solo, criando um canal ionizado (caminho condutor). Essa descarga, denominada líder escalonado (*stepped leader*), propaga-se para baixo até aproximadamente 5 a 50 m do solo, com velocidade média da ordem de 10^5 m/s. O líder escalonado geralmente ramifica-se, mas nem todos os seus ramos estendem-se até o solo (FIGURA 1.2b);

c) Uma descarga conectante surge com a intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e o solo. Tal descarga geralmente parte de objetos pontiagudos existentes na superfície, como árvores e edifícios, e desloca-se em direção à parte frontal do líder escalonado;

d) Quando o encontro ocorre, a descarga conectante transforma-se numa descarga forte e de intensa luminosidade, denominada descarga de retorno (*return stroke*). É justamente essa descarga que é vista como um clarão. Ainda que preferencialmente o relâmpago atinja os objetos mais altos, isso nem sempre acontece. Na descarga de retorno, as cargas negativas (elétrons) presentes no canal já ionizado pelo líder escalonado são aceleradas, o que cria uma corrente ascendente (os elétrons fluem da nuvem para o solo) com picos de 30 kA. A velocidade de propagação da frente de onda (ou da luminosidade ao longo do canal) é da ordem de 10^8 m/s (um terço da velocidade da luz). A duração de tal descarga é de aproximadamente 70 microssegundos. Em média, ocorrem três descargas por relâmpago, mas há registros de casos com até 26 descargas (FIGURA 1.2d,e);

e) O líder contínuo (*dart leader*) se dá quando o canal do raio está fracamente ionizado e, assim, este líder deve ionizá-lo novamente. Caracteriza-se como um líder por possuir baixa intensidade de corrente. Possui velocidade característica de $(1-2) \cdot 10^7$ m/s. Esta etapa ocorre somente quando, de alguma forma, existem cargas disponíveis próximas do canal feito anteriormente (FIGURA 1.2f,h);

f) Após o líder contínuo ter ionizado o canal, outra descarga ocorre, sendo esta chamada descarga subsequente (*subsequent stroke*). A diferença essencial entre descargas de retorno e subsequente é que a primeira é precedida de líder escalonado, pois não existe canal algum, enquanto que a segunda é precedida por um líder mais veloz, que apenas refaz um canal previamente existente (FIGURA 1.2g, i);

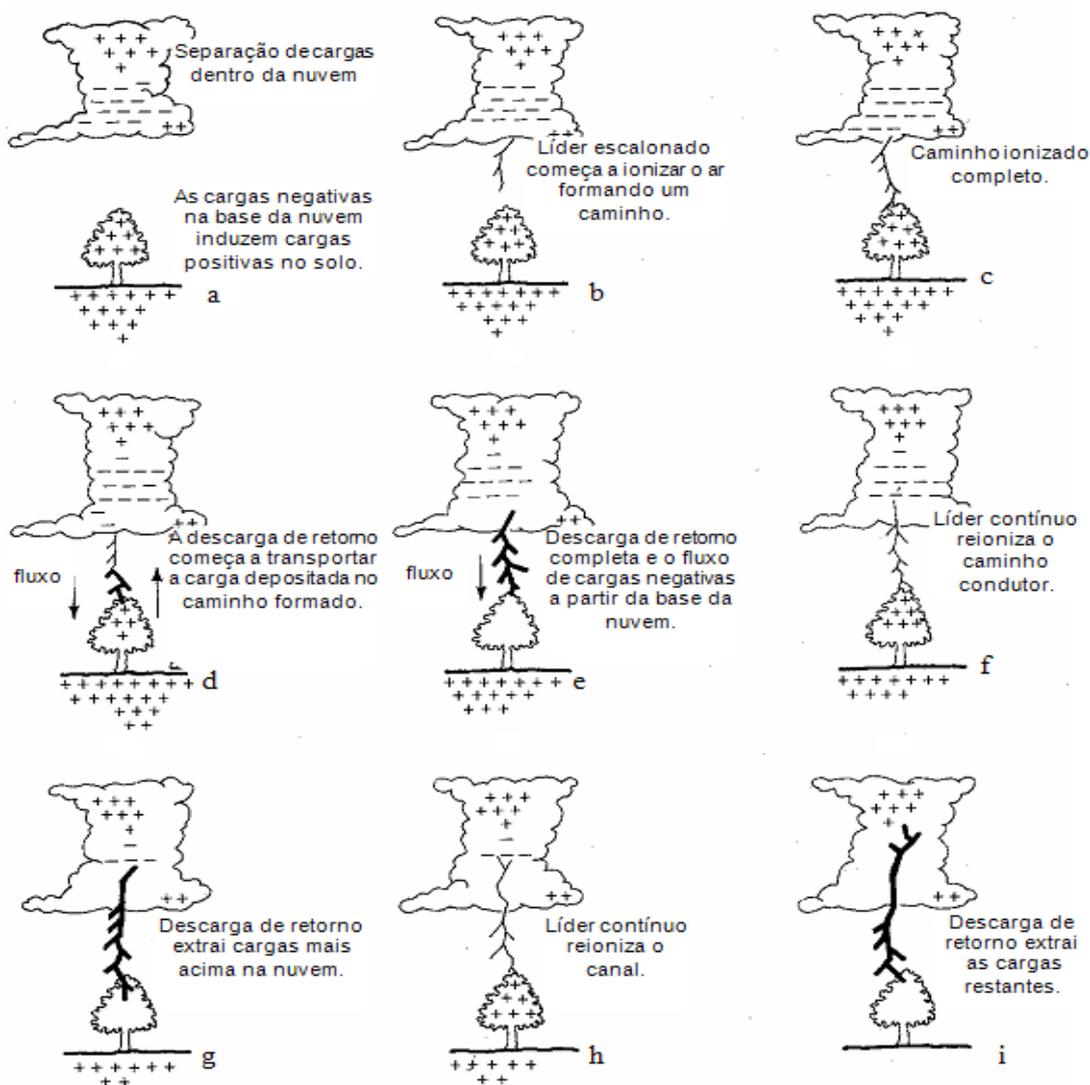


FIGURA 1.1 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

FONTE: modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).

Estas sucessivas descargas subsequentes, em um único relâmpago, podem ser chamadas também de descargas múltiplas. Algumas vezes o olho humano é capaz de perceber essas descargas e ver o canal do relâmpago piscar. À noite, pode-se observar o “efeito estroboscópico” gerado pela luminosidade de tais descargas em objetos em movimento, como o limpador de para-brisa de um automóvel. Em geral as descargas subsequentes são menos ramificadas do que a primeira descarga de retorno. Cerca de 50% dos casos elas não seguem uma trajetória única, formando os chamados raios de canais múltiplos, que atingem mais de um local (Saba et al., 2006).

As descargas de retorno geralmente são seguida por uma corrente contínua (CC), que pode ser entendida como sendo “um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo. Valores típicos de corrente são dezenas ou centenas de ampères, e de duração de até centenas de milissegundos” (Rakov e Uman, 2003). Normalmente denomina-se corrente contínua curta quando ela dura entre 10 e 40 ms e longa aquelas que ultrapassam 40 ms. Ballarotti (2005) observou uma grande ocorrência de correntes contínuas com duração inferior a 10 ms, até então inexistentes na literatura consultada em seu trabalho, e as denominou minicorrentes contínuas. Entre o pico de corrente (dezenas de kA) da descarga de retorno e o nível quase-estacionário (centenas de ampères) da CC, pode existir uma etapa de transição, chamada de corrente intermediária, da ordem de 1 ms de duração com corrente da ordem de 1 kA (Uman, 1987). Cerca de 70% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de corrente contínua (Saba et al, 2006).

Relâmpagos que contém corrente contínua podem ser chamados “relâmpagos híbridos” e os que não a possuem, “relâmpagos discretos”. Os híbridos são capazes de iniciar incêndios enquanto que os discretos não. Apesar de terem a mesma temperatura, a diferença está em que ela é mantida por mais tempo nos relâmpagos híbridos (décimos de segundos nos híbridos e milésimos de segundos nos discretos). No entanto, também os relâmpagos discretos podem ser muito destrutivos já que o aumento essencialmente instantâneo da corrente dentro de um material com alta resistência à corrente elétrica causa um aquecimento súbito e uma consequente vaporização da parte interna do material. Como resultado, uma pressão muito alta é rapidamente gerada dentro do material, podendo levá-lo a explosão (Saba, 1997).

1.1.4 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo

Os relâmpagos nuvem-solo positivos seguem de um modo geral as mesmas etapas descritas para os negativos, porém com algumas diferenças. Em geral, iniciam-se a partir de um líder com uma luminosidade mais fraca se comparada ao líder escalonado de um NS negativo; tal líder propaga-se a partir de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, não apresentando etapas e sim uma luminosidade contínua, porém com variações periódicas de intensidade. Outra característica importante é o número de descargas de retorno: somente uma na maioria das vezes. Costumam também apresentar corrente contínua mais longa (transferem maior quantidade de carga elétrica para o solo) do que os NS negativos, tornando-se mais destrutivos e sendo responsáveis pela maioria dos incêndios.

1.1.5 Definição e Características do Trovão

Várias teorias têm sido discutidas sobre as causas e a criação de um trovão. No século III aC, acreditava-se que o trovão era causado devido a colisão das nuvens. No entanto, a teoria mais aceita foi concebida no século 20. Segundo esta teoria, os raios causam o som do trovão. Os raios de luz que consistem de fluxos de elétrons são muito quente, muito mais quente que a superfície do sol. Estima-se que o raio tenha uma temperatura de 30.000 a 50.000 ° F (ou seja, 28.000 ° C).

Quando o raio de alta temperatura atinge o ar circundante, um aumento súbito da temperatura ocorre. Ele traz consigo uma expansão instantânea de ar aquecido. Depois disso, a pressão elevada é óbvia devido à compressão do ar aquecido. A rápida expansão do ar comprimido, em seguida, envia ondas de choque ou vibração, o que ouvimos como um som de explosão. Em suma, o trovão é causado devido a aquecimento rápido e arrefecimento (esfriamento) do ar, perto do relâmpago. A intensidade do som do trovão varia, dependendo da natureza do raio e da distância do ouvinte a partir da origem do som. (SABA, 2001).

O estrondo produzido pelas descargas de eletricidade atmosférica, popularmente conhecida como trovão, é a onda sonora que apresenta uma energia máxima em frequência por volta de 100 Hz. Grande parte da energia do relâmpago, em torno de 75%, é convertida em energia acústica e térmica. O trovão tem uma intensidade que depende da variação da corrente elétrica ao longo do canal, e o som ocorre mais próximo ao solo, por ser onde a corrente elétrica tem uma maior variação com o tempo. Mesmo não sendo muito comum podem acontecer relâmpagos que não vêm acompanhados por trovões, quando isto ocorre, acredita-se que seja devido à corrente elétrica do relâmpago não ser tão intensa e estar variando lentamente, de modo que a onda sonora, não chega a ser formada. (SILVA, 2007).

1.1.6 Objetivos do Trabalho

A corrente de alta intensidade que percorre o canal do raio produz um meio pouco condutor (o ar), uma temperatura intensa que é responsável pela expansão do ar e geração do som conhecido como trovão.

Neste trabalho, pretendemos:

- Analisar vídeos obtidos em campanhas anteriores paralelamente a um estudo dirigido da literatura.
- Auxiliar em uma nova campanha de coleta de dados em São José dos Campos, e, em paralelo, trabalhar na redução e análise dos mesmos.
- Observar através de registros sonoros quais as características marcantes do trovão de raios negativos e positivos.
- Observar se é possível perceber a ocorrência de múltiplas descargas em um relâmpago no registro do som.
- Determinar quais condições de observações atmosféricas alteram o trovão.

- Analisar os novos dados obtidos e, eventualmente, editar e publicar os resultados obtidos em periódicos especializados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

2.1.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

- Câmera rápida MotionScope 8000S PCI, fabricada pela Red Lake;
- Microcomputador com a interface PCI da câmera rápida e os softwares MiDAS 2.0 e Origin 7.0;
- Antena plana para medições de campo elétrico;
- Módulo de aquisição PCI BNC-6110 da National Instruments, com 12 bits e 8 entradas analógicas;
- TV e Videocassete;
- Microcomputador com gravador de áudio;
- Microfone Shure BETA 52^a Supercardióide para instrumentos;
- Rádio Gravador;
- Antena GPS para sincronismo dos equipamentos.

2.1.2 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade

Utilizamos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (ou câmera rápida, forma abreviada utilizada neste trabalho, ou ainda *High Speed Digital Imaging System*, nomenclatura usada pelo fabricante) “*MotionScope PCI*” do fabricante *Red Lake*, modelo *8000S*. Este sistema está baseado num sensor CCD (*Charge Couple Device*) para a captura das imagens. Este adquire e grava uma sequência de imagens digitais de um evento a uma taxa ajustável de 60 a 8.000 quadros por segundo, sendo que os

arquivos de saída, com extensão *avi*, podem ser visualizados em um PC. Possui sincronização de tempo via GPS (*Global Positioning System*), possibilitando comparação com outros instrumentos em análises de um mesmo evento. A FIGURA 2.1 mostra duas fotografias: uma do sistema, que é composto essencialmente de uma câmera e de seu *hardware* de *interface* com o PC, e outra do sistema instalado num módulo móvel para facilitar o posicionamento da câmera durante as aquisições de imagens.

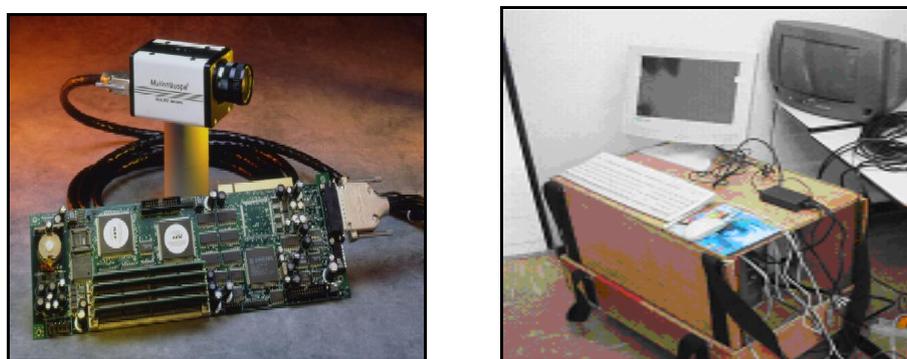


FIGURA 2.2 – Fotografias (a) da câmera 8000S MotionScope com sua placa de *interface* com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.

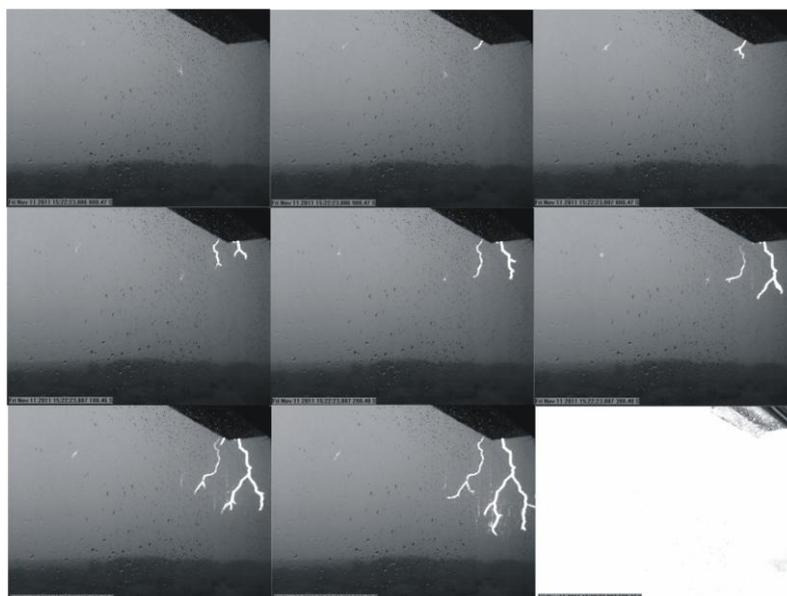


FIGURA 2.2 – Sequência de imagens obtidas com câmera rápida

FONTE: Schumann (2012, p. 31)

2.1.3 Sistema de Captação de Áudio

Para capturar o áudio analisados usamos um microfone Shure BETA 52A Supercardióide (FIGURA 2.3), um videocassete, uma TV e um sistema de GPS para sincronismo dos equipamentos.

O Shure Beta 52A é um microfone dinâmico supercardióide para instrumento concebido para a captura de bateria, baixo acústico, amplificadores de baixo e outros instrumentos com resposta de frequência similar ao Sonic. O BETA 52A possui uma resposta de frequência contornada, personalizado para capturar sinal registrando baixas frequências.

O microfone capta com precisão os ataques que contribuem para o "punch" do sinal. O padrão polar supercardióide garante o maior ganho possível, antes de feedback, minimizando ruídos nas seções fora do eixo do microfone. O adaptador built-in de suporte de travamento com entrada XLR simplifica a instalação, ao colocar dentro de um bumbo e a grade de malha de aço protege o elemento de danos.



FIGURA 2.3 - Microfone Shure BETA 52^a Supercardióideos

Características:

- Resposta de Frequência Otimizada;

A baixa resposta de frequência o torna mais do que adequado para captação de bumbo e baixo acústico e elétrico.

- Padrão Polar Supercardióide;

O padrão polar supercardiíde oferece o mais alto possível sinal de realimentação, minimizando ruídos nas seções fora do eixo do microfone.

- Magneto de Neodímio;

O magneto de neodímio oferece níveis de ganho mais altos do que os dos magnetos de elemento padrão.

Especificações:

- Transdutor: Dinâmico (Bobina Móvel);
- Padrão Polar: Supercardiíde;
- Resposta de Frequência: 20Hz a 10kHz;
- Requisitos de Alimentação: Microfone dinâmico, não necessita de alimentação;
- Impedância de Saída: A Impedância Estimada é de 150 Ohms (45 Ohms reais) para a conexão com entradas de microfone classificadas para baixa impedância;
- Conectores de Saída: XLR macho de 3 pinos;
- Nível Máximo de Pressão Sonora (SPL): 174 dB a 1000Hz (calculado);
- Dimensões: 3,750 x 6,406 x 3,750 polegadas (95,25 x 162,72 x 95,25mm) CxAxL;
- Peso: 605g.

2.1.4 Sistema de Medição de Campo Elétrico

Uma antena plana com largura de banda de 306 Hz a 1,5 MHz serviu para efetuar medições de campo elétrico. Para aquisição de seus dados utilizamos o módulo BNC-6110 da National Instruments, que possui 8 entradas analógicas de 12 bits e sincronização com GPS, configurado para uma resolução de 5 MS/s (*mega-samples* por

segundo, ou seja, 5 milhões de aquisições em 1 segundo). As medições são salvas por um software do tipo *data logger* em arquivos *.bin*, possibilitando a gravação, visualização e análise. Seus dados podem ser facilmente confrontados com os vídeos registrados pela câmera rápida graças à sincronização com tempo GPS que as duas possuem, tornando os dois instrumentos praticamente complementares. A FIGURA 2.4 é uma ilustração do esquema de montagem do campo elétrico e a FIGURA 2.5 mostra um exemplo de gráfico do campo elétrico de um relâmpago *versus* tempo obtido com seu auxílio.

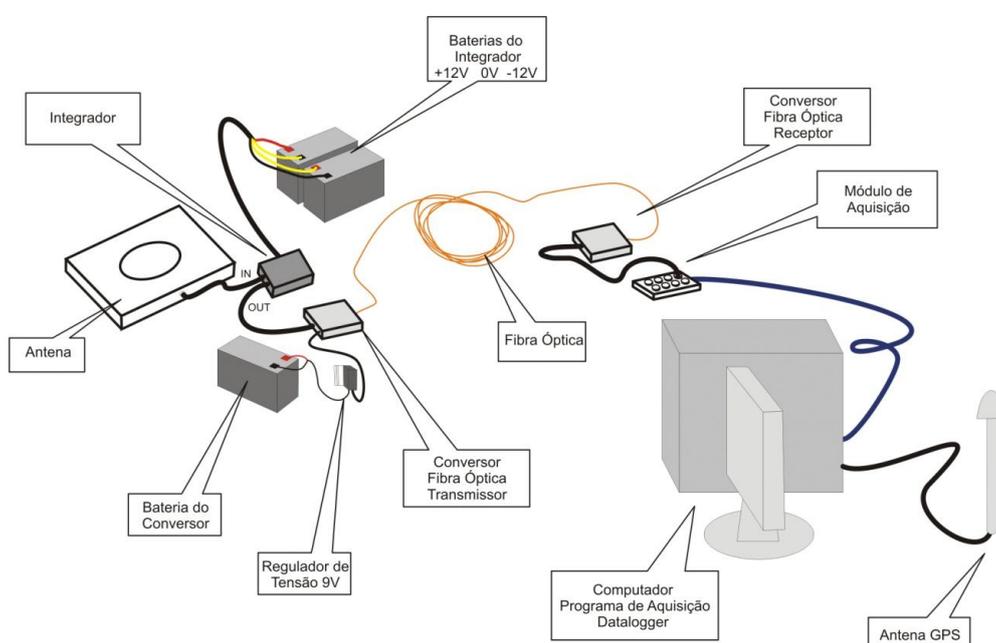


FIGURA 2.4 – Esquema de montagem do campo elétrico.
FONTE: Schumann (2012, p. 37)

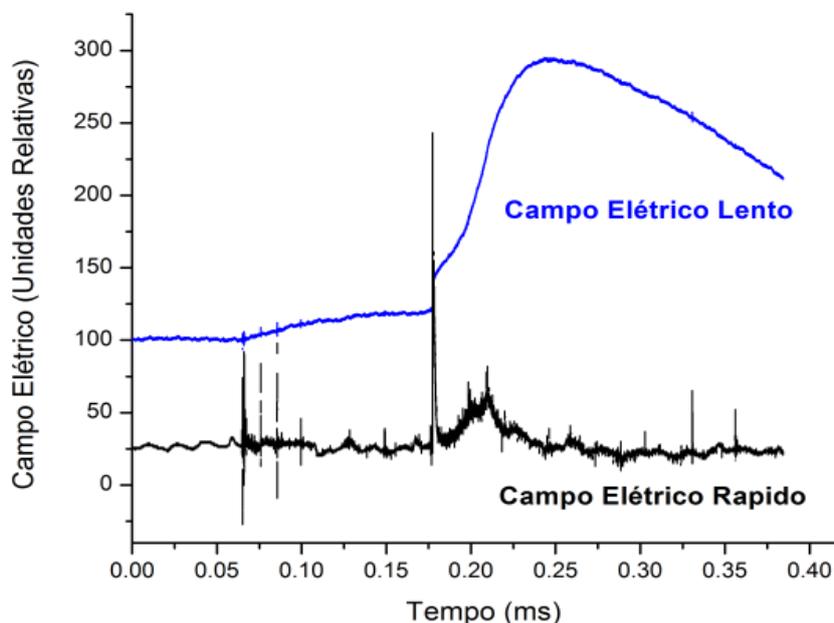


FIGURA 2.5 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana. A imagem mostra o instante de ocorrência de uma descarga de retorno (pico maior positivo) juntamente com os pulsos de quebra de rigidez (pequenos pulsos bipolares de pequena amplitude).

FONTE: Schumann (2012, p. 67)

2.1.5 Local de Observação

Para as observações realizadas utilizou-se a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, locada no município de São José dos Campos - de São Paulo, gentilmente cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Trata-se de um ponto elevado em comparação com o relevo local, possibilitando boa visibilidade em praticamente 360° ao redor. A FIGURA 2.6 exhibe uma foto do local.

O município de São José dos Campos está localizado no Vale do Paraíba, entre as serras do Mar e da Mantiqueira, ocupando uma área terrestre de 1118km² e se limita, ao Norte, com Camanducaia (MG); a Leste, com Monteiro Lobato e Caçapava; ao Sul, com Jambuí e Jacareí; ao Oeste, com Igaratá, Joanópolis e Piracaia.



FIGURA 2.6 – Torre de observação do CTA/IAE/AEL.

2.1.6 Procedimento das Observações

A obtenção dos dados foi realizada com um operador, que, basicamente, realizava as seguintes funções com a câmera rápida: (1) a câmera é direcionada para a tempestade em observação. (2) A luminosidade é ajustada para que se tenha um contraste luminoso adequado do cenário. (3) Ao visualizar um raio, o operador pressiona um botão de *trigger* (acionamento) do sistema; aqui, é utilizado um recurso computacional chamado Fila Circular, que consiste em gravar dados continuamente em uma determinada região de memória e, quando o ponteiro (que indica a posição de memória a ser utilizada) chega à sua última posição, o programa aponta para a primeira posição da memória.

Assim, ao se acionar o pulso de *trigger*, as imagens serão gravadas, consistindo de imagens passadas e futuras em relação ao momento do *trigger*. Ou seja, ao configurar o

trigger em 50%, a gravação do filme registrará 1,0 segundo de imagens anteriores e 1,0 segundo de imagens posteriores ao momento do *trigger*. Como o tempo de resposta típico dos operadores (intervalo de tempo este entre os momentos do evento e o do acionamento manual) está em torno de 400 ms, geralmente registramos 0,6 s antes da ocorrência da 1ª descarga de retorno e 1,4 s após esta ocorrência. Dado que a duração máxima de um raio está em torno de 1,0 s, tal ajuste de 50% mostrou-se o mais eficaz na captura de todas as fases do raio.

A operação da antena de campo elétrico se dá de forma semelhante, com esta locada sobre a torre de observação na parte exterior desta. O operador pressiona também um botão *trigger* simultaneamente com o da câmera, que faz com que o computador grave os dados obtidos módulo de aquisição BNC-6110 utilizando o mesmo recurso computacional de fila circular (explicado acima). No caso do campo elétrico a aquisição se dá em um período mais longo, normalmente de 2 a 3 segundos antes mais 2 a 3 segundos depois do acionamento do *trigger*, garantindo que todo o intervalo de tempo coberto pela câmera seja também registrado pelo campo elétrico.

A operação do microfone é ainda mais simples. O microfone fica locado na parte exterior da torre de observação. Uma vez iniciada a gravação do som, esta é contínua, sem a necessidade de um operador para operá-lo simultaneamente com a câmera. O microfone é ligado a um amplificador, que, por sua vez, é ligado ao vídeo cassete já equipado com o GPS para fazer a sincronização do tempo entre o vídeo, o áudio e os campos elétricos (rápido e lento) (FIGURA 3.1).

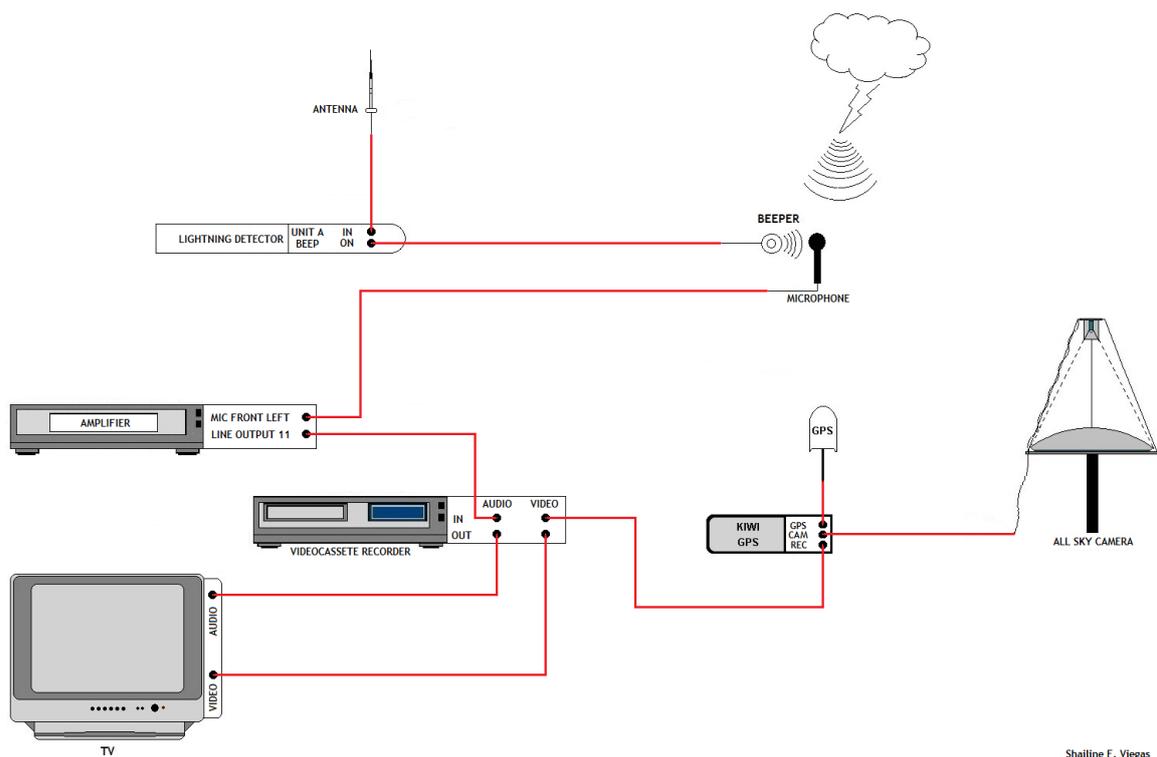


FIGURA 2.7 – Esquema detalhado de captura de som.

3. RESULTADOS

3.1.1 Campanha de Coleta de Dados 2011-2012

A Campanha de aquisição de novos dados de tempestades teve início em novembro de 2011 e encerrou em abril de 2012. Durante esse tempo foram filmados 168 raios.

3.1.2 Análise dos Dados

Em paralelo à obtenção dos dados realizamos a sua redução, possibilitando a seleção dos casos julgados úteis para uma análise mais detalhada dentro do escopo deste estudo. Com os dados obtidos pela campanha 2011-2012 foi criada uma planilha para controle e análise dos dados, conforme figura 3.1.

MATRIZ	Local	Vídeo	Câmera	Ano	Mês	Dia	Hora	Min	Seg	ms	Frame	Visibilidade	Tipo
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,509000	509	-1868	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,522000	522	-1815	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,527000	527	-1794	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,595000	595	-1523	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,619000	619	-1428	d	ic
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,331000	331	-2579	v	rl
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,357250	357	-2475	v	cg
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,375000	375	-2403	v	m
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,223	223	-3010	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,27525	275	-2803	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,29	290	-2744	v	rl
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,365	365	-2444	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,43975	439	-2145	v	rl
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,4655	465	-2042	v	rl
9	SJC	17	HS2	2010	10	26	1	9	41,176	176	-2520	v	cg
9	SJC	17	HS2	2010	10	26	1	9	41,177	177	-2516	v	m
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,03625	36	-3958	v	spider
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,05775	57	-3872	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,17575	175	-3400	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,22125	221	-3218	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,2405	240	-3141	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,26575	263	-3040	v	ic
9	SJC	19	HS2	2010	11	22	18	24	12,9015	901	-3734	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,511750	511	-3879	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,609750	609	-3487	v	ic
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,660500	660	-3284	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,661750	661	-3279	v	m
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,797500	797	-2736	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,798500	798	-2732	v	m
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,417250	417	-2326	v	cg
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,446250	446	-2210	v	cg
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,531250	531	-1870	v	cg

FIGURA 3.1 – Planilha de Controle

Paralelamente à revisão da literatura, selecionamos, 18 casos de relâmpagos negativos ocorridos a uma distância inferior ou igual a 10 km e que foram observados utilizando imagens de vídeo juntamente com arquivos de áudio captados simultaneamente aos vídeos durante as tempestades; conjunto de dados obtido e estudado. Dentre os casos estudados, não foi possível a análise do som dos trovões de raios positivos, pois estes não foram captados pelo sistema.

O clarão de um relâmpago, seguido depois de alguns segundos por um estrondo de trovão é, para muitas pessoas, a primeira ilustração do fato de que o som viaja muito mais lento do que luz. Usando essa diferença, pode-se estimar de quão longe o raio é, pelo tempo do intervalo entre a visualização do flash e ouvir o trovão.

A velocidade do som no ar seco é de aproximadamente 343 metros por segundo (à 20°C ou 68°F). A velocidade da luz é alta o suficiente para que ele possa ser tomado como

infinito neste cálculo devido à distância relativamente pequena dos relâmpagos estudados. O trovão é raramente ouvido em distâncias superiores a 20 km.

Na TABELA 1, fazemos a comparação entre os dados de distância do relâmpago detectada pelo sistema e os dados de distância do relâmpago detectada pela análise de som. Chegamos à distância detectada pela análise do som (Km) pela divisão, por três, do tempo entre a visualização do flash até a percepção do som do trovão.

Distância do Raio Detectada pelo Sistema (Km)	Tempo entre o Flash e o Som (s)	Distância do Raio Detectada pela Análise do Som (Km)
10,3	24	8,0
10,0	28	9,3
9,4	27	9,0
10,0	24	8,0
7,5	16	5,3
5,4	22	7,3
6,7	19	6,3
7,3	20	6,7
8,9	26	8,7
8,3	19	6,3
7,2	20	6,7
4,8	14	4,7
5,8	17	5,7
9,1	38	12,7
6,8	20	6,7
9,6	33	11,0
7,8	32	10,7
9,7	27	9,7

Tabela 1 – Diferença entre as distâncias dos raios detectas pelo sistema e pela análise do som

Abaixo, na figura 3.2, exibimos um gráfico de dispersão com os dados da tabela 1, onde podemos perceber que os resultados obtidos pela análise do som não são exatos.

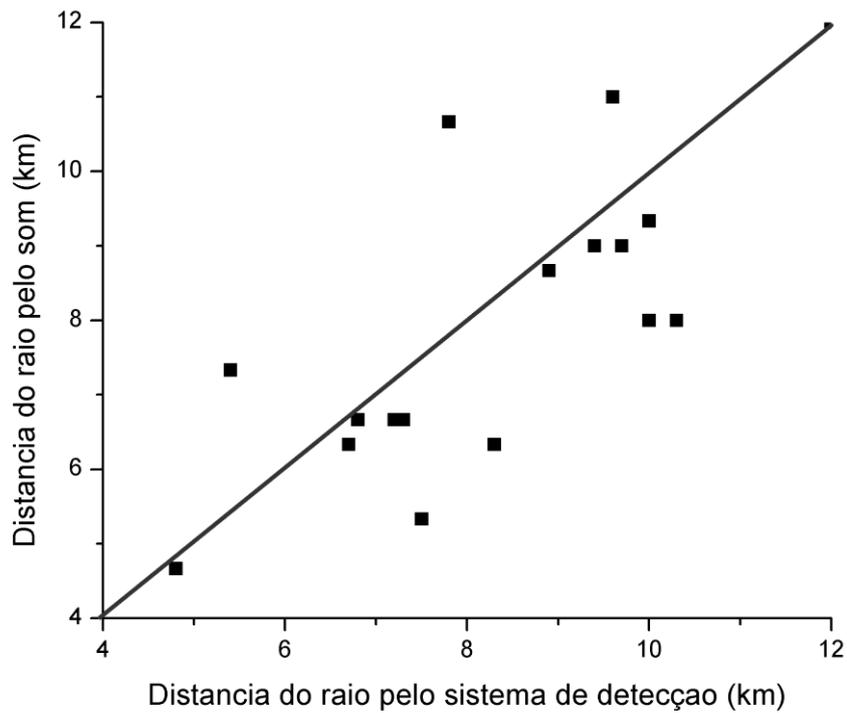


FIGURA 3.2 – Gráfico de dispersão para comparação da diferença entre detecção da distância do raio pelo sistema e pela análise do som

4. CONCLUSÃO

Desde o início do período atual de bolsa PIBIC foi possível realizar um estudo da literatura disponível sobre trovões e suas características, fornecendo uma visão geral inicial sobre o que já é conhecido sobre o fenômeno e sua importância. Tivemos, também, a oportunidade de consultar diversos trabalhos não relacionados diretamente aos trovões, mas sim aos seus efeitos, possibilitando um conhecimento mais amplo sobre as aplicações científicas de nosso trabalho.

Concluimos então, que a uma distância de 5 a 10 quilômetros do local onde se deu o relâmpago, o trovão pode ser escutado, contudo, deve-se levar em consideração que alguns fatores como a temperatura do ar, o relevo do solo e os ventos podem influenciar. A diminuição da temperatura do ar com relação à altura contribui para que a trajetória do trovão siga uma curva voltada para cima, o que dificulta que ele seja escutado a grandes distâncias. Essa curvatura tende a definir-se em direção oposta a do vento.

Com os resultados deste estudo, podemos concluir que a análise do som do relâmpago para encontrar a distância onde ele ocorreu não pode ser considerada exata, sendo possível apenas estimar de quão longe o raio é, pelo tempo do intervalo entre a visualização do flash e a percepção do trovão.

Todos os relâmpagos analisados são negativos. Não foi possível a análise do som dos trovões de raios positivos, pois estes não foram captados pelo sistema de detecção utilizado. Análises do som gerado pelas descargas de relâmpagos foram realizadas pela primeira vez no Brasil.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballarotti, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida.** 2005-02-21. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Ballarotti, M. G.; Saba, M. M. F.; Pinto Jr, O. **High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale.** Geophysical Research Letters, Vol. 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889, 2005.

CAMPOS, L. Z. S. **Características dos pulsos de quebra de rigidez de relâmpagos.** In: SICINPE – 2006. São José dos Campos. 2006. (INPE-14021-PRE/9196).

Chandima Gomes, Vernon Cooray, **Radiation field pulses associated with the initiation of positive cloud to ground lightning flashes,** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 66 (2004) 1047 – 1055, 2004.

Cooray, V. **A novel method to identify the radiation fields produced by positive return strokes and their submicrosecond structure.** Journal of Geophysical Research 91(D7): doi: 10.1029/OJGREAO0000910000D7007907000001. issn: 0148-0227, 1986.

Cooray V., Montano R. e Rakov V. **“A model to represent negative and Positive lightnings first strokes with connectins leaders”** Journal of Electrostatics 60 (2004) 97-109 doi:20.1016/j.elstat.2004.01.016

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. **Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges.** Journal of Geophysical Research: Vol.67, p. 637-647, 1962.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. The Atmosphere. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Feb. 1982, 528 p.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The Atmosphere**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Feb. 1982, 528 p.

Nag A., Rakov, V. A., Tsalikis D. and Cramer, J. A., **Characterization of positive cloud-to-ground lightning discharges**, 30th International Conference on Lightning Protection ICLP– Caligari – Italy, 2010

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

Pinto Jr., O. The Brazilian lightning detection network: a historical background and future perspectives. In: VII SIPDA, 2003, Curitiba. Proceedings, 2003.

Qie ,X. Yu, Y., Wang, D., Wang, H. and Chu, R., **Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning in Chinese Inland Plateau**, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol 80, No.4, pp745-754, 2002.

Rakov, V. A.; Uman, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge, 2003.

Robson, D. *Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago intranuvem*. [S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.wvlightning.com/types.shtml>.

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

Saba, M. M. F.; Pinto Jr., O.; Solórzano, N. N.; Eybert-Berard, A. **Lightning current observation of an altitude-triggered flash**. Atmospheric Research, v. 76, n. 1-4, p. 402-411, 2005.

Saba, M. M. F.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr, O. **Cloud-to-ground lightning properties in Brazil from high-speed video observations**. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006.

Saba, M. M. F., Ballarotti M. G., e Pinto Jr. O., **Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations**, J. Geophys. Res., 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006a.

Saraiva, A. C. V., Saba M. M. F., Pinto Jr. O., Cummins K. L., Krider E. P., e Campos L. Z. S., **A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations**, Journal of Geophysical Research, 115, D11102, doi:10.1029/2009JD012604, 2010.

Schulz, W., e Saba M. M. F., **First results of correlated lightning video images and electric field measurements in Austria**, paper presented at X Int. Symposium on Lightning Protection, Inst. of Electrotech. and Energy, Curitiba, Brasil, 2009.

Schumann C., **Caracterização Dos Raios Positivos Através De Câmeras De Alta Velocidade E Sensores De Campo Elétrico**. 2012. Tese (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Tomo-o Ushio, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, and Daohong Wang, **Electric fields of initial breakdown in positive ground flash**, Journal of Geophysical Research, VOL.103, NO. D12, PAGES 14, 135 – 14, 139. 1998.

Uman, M. A. **The lightning discharge**. Academic Press, 1987.

Uman, M. A.; Krider, E. P. **Natural and artificially initiated lightning**. Science: p.457-464, Vol. 246, Oct 1989.

Warner, T. A., e Orville R. E., **High-speed observations of faint positive lightning leaders and lightning spectra**, Eos Transactions AGU, 90(52), Fall Meeting Supplement, Abstract AE41A-02, 2009.

Weidman, C. D. and E. P. Krider, 1979: **The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge processes**. J. Geophys. Res., Vol. 84, No. C6, pp. 3159-3164, paper number 9C0316.

Wood, R.A. **When lightning strikes!** Weatherwise, Vol. 41, n. 4, p. 206-210, 1988.

Saba, M. M. F. **A Física das Tempestades e dos Raios**. Física na Escola, São Paulo, volume 2, nº1,2001.

Pinto Jr., O; Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos**. Ed. Brasiliense, 1996.

Silva, E. S. **A Física dos Relâmpagos e dos Raios**. UCB, Brasília, 2007.

Rakov, Vladimir A.; Uman, Martin A. (2007). **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge, England: Cambridge University Press. p. 378. ISBN 0-521-03541-4.

Cooray, Vernon (2003). **The lightning flash**. London: Institution of Electrical Engineers. pp. 163–164. ISBN 0-85296-780-2.

"**Thunder**". Encyclopædia Britannica. Retrieved 2008-09-12.

P Graneau (1989). "**The cause of thunder**". J. Phys. D: Appl. Phys. 22 (8): 1083–1094. DOI:10.1088/0022-3727/22/8/012.

Fish, Raymond M (2004). "**Thermal and mechanical shock wave injury**". In Nabours, Robert E. Electrical injuries: engineering, medical, and legal aspects. Tucson, AZ: Lawyers & Judges Publishing. p. 220. ISBN 1-930056-71-0.

Dean A. Pollet and Micheal M. Kordich, **User's guide for the Sound Intensity Prediction System (SIPS) as installed at the Naval Explosive Ordnance Disposal Technology Division (Naveodtechdiv)**. Systems Department February 2000. dtic.mil

"**Thunder**". Oxford English Dictionary (2 ed.). Oxford, England: Oxford University Press. 1989.

Handbook of Chemistry and Physics, 72nd edition, special student edition. Boca Raton: The Chemical Rubber Co.. 1991. p. 14.36. ISBN 0-8493-0486-5.