

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DAS NUVENS CONVECTIVAS GERADORAS E NÃO GERADORAS DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS NO ESTADO DE ALAGOAS

Edson Matias dos Santos¹

Humberto Alves Barbosa²

Leandro Rodrigo Macedo da Silva³

Luana dos Santos Ferreira⁴

1 Introdução

Os relâmpagos têm sido frequentemente estudados nas últimas décadas devido ao seu grande impacto no meio populacional, tais como perdas materiais e de vida. De acordo com Lang *et al.* (2017), o relâmpago é definido, conforme o glossário da The American Meteorological Society com sugestões do comitê de avaliação do Arquivo de Clima e Extremos Climáticos da OMM (Organização Mundial Meteorológica), como uma série de processos elétricos que ocorrem continuamente no qual as cargas elétricas são transferidas por canais entre centros de cargas de sinais opostos dentro de uma nuvem, entre uma nuvem e o solo, entre duas nuvens ou entre a nuvem e o ar.

As áreas mais atingidas por relâmpagos são as tropicais e subtropicais, já a distribuição de danos causadas à sociedade por este evento, não só varia com a densidade de relâmpagos, mas com a densidade populacional e o risco da exposição, sendo que o número de mortes e feridos por este fenômeno tem diminuído em países desenvolvidos, porém nos menos desenvolvidos não há diminuição devido à grande exposição de pessoas por meio de trabalho ao ar livre na agricultura familiar ou em pequena escala, entre outros fatores socioeconômicos (COOPER; HOLLE, 2019).

No globo terrestre, a cada segundo, ocorrem mais de 50 relâmpagos, em que essas descargas produzem ondas eletromagnéticas de baixa frequência, conhecidas como VLF (Very Low Frequency), que são emitidas para a atmosfera e se propagam através do guia de ondas da Terra-ionosfera (McMAHON *et al.*, 2016). Segundo Lang *et al.* (2017), um dos sistemas mais utilizados para detecção e monitoramento de relâmpagos é o VLF que é utilizado pela World Wide Lightning Location Network (WWLLN), uma rede de detecção de descargas atmosféricas que foi criada pelo professor Robert Holzworth, onde conta com um acervo de dados de 2004 até o presente momento. Os dados são disponibilizados a cada 10 minutos para a central da Universidade de Washington via internet e para as demais estações da rede WWLLN, diariamente.

1 Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS)/Universidade Federal de Alagoas (UFAL). E-mail: edsonmtss@gmail.com.

2 Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS)/Universidade Federal de Alagoas (UFAL). E-mail: barbosa33@gmail.com.

3 Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS)/ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). E-mail: macedo.leandror@gmail.com.

4 Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). E-mail: luaferreira0211@gmail.com.

De acordo com os dados da BrasilDAT (Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas) operada com exclusividade pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, o estado de Alagoas ocupa o vigésimo terceiro lugar, com média de 100.000 relâmpagos anuais, no ranking de incidência anual de relâmpagos por estado, no Brasil. Apesar de Alagoas estar tão abaixo neste ranking, de 2000 a 2009, foram registradas 10 mortes por descargas elétricas atmosféricas segundo o ELAT/INPE, sendo que só entre fevereiro e março de 2008 ocorreram 5 mortes de acordo com Brito *et al.* (2011).

Entretanto, há pouquíssimos estudos sobre relâmpagos no estado de Alagoas, acarretando numa carência de entendimento destes fenômenos nesta área, dificultando o monitoramento e previsão dos mesmos.

O artigo tem por objetivo principal analisar as diferenças entre nuvens convectivas geradoras e não geradoras de relâmpagos no estado de Alagoas através dos dados do satélite Meteosat no ano de 2016.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

O Estado de Alagoas ocupa uma área de 27.848,140 km². Segundo o IBGE (2017), possui uma população de 3 358 963 habitantes e localiza-se no nordeste do Brasil entre as longitudes de 35° 9' 7.2" W a 38° 14' 15.36" W e latitudes de 8° 48' 47.268" S a 10° 30' 4.32" S.

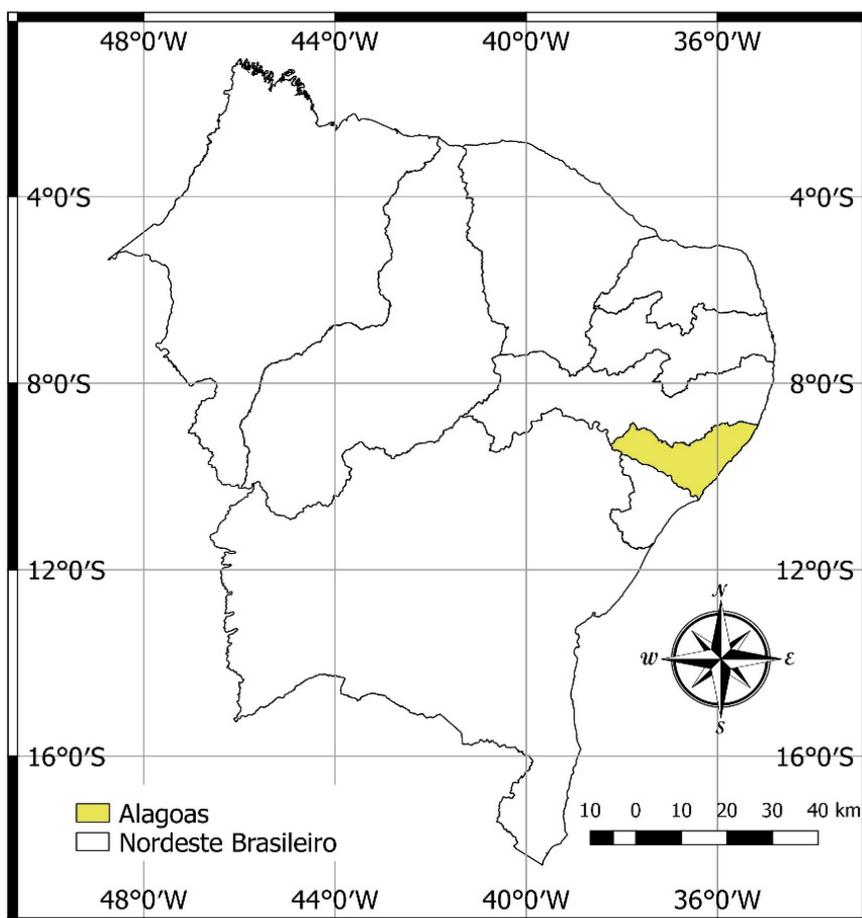


Figura 1. Mapa da Região Nordeste do Brasil (NEB) e em destaque o Estado de Alagoas.

Segundo Brito *et al.* (2011), no nordeste brasileiro os principais sistemas que determinam o tempo são: Zona de Convergência Intertropical (FRANK, 1983 *apud* BRITO *et al.*, 2001; UVO; NOBRE, 1989 *apud* BRITO *et al.*, 2001; XAVIER *et al.*, 2000 *apud* BRITO *et al.*, 2011), Ventos Alísios e Perturbações Ondulatórias no Campo dos Alísios (MOLION; BERNARDO, 2000 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Subtropical, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (KOUSKY; GAN, 1981 *apud* BRITO *et al.*, 2001; RAMIREZ, 1996 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Vórtices Ciclônicos em Médios Níveis (ANJOS, 1995 *apud* BRITO *et al.*, 2001; FEDOROVA *et al.*, 2006 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Zonas Frontais (KOUSKY, 1979 *apud* BRITO *et al.*, 2001; SATYAMURTY *et al.*, 1998 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Ondas de Leste (CHAN, 1990 *apud* BRITO *et al.*, 2001; MOTA; GANDU, 1998 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Alta da Bolívia, Zona de Convergência do Atlântico Sul (QUADRO, 1994 *apud* BRITO *et al.*, 2001; SATYAMURTY *et al.*, 1998 *apud* BRITO *et al.*, 2001), Linhas de Instabilidade (COHEN, 1989 *apud* BRITO *et al.*, 2001) e Complexos Convectivos de Mesoescala (REEDER; SMITH, 1998 *apud* BRITO *et al.*, 2001; VELTISHEV, 1990 *apud* BRITO *et al.*, 2001).

Alagoas possui maior frequência de relâmpagos de janeiro a abril e nos meses de novembro e dezembro, como pode ser visto na Figura 2. A estação do verão é um tanto quanto semelhante ao outono, em relação à frequência de relâmpagos, já o inverno e a primavera apresentaram pouquíssimas descargas elétricas atmosféricas.

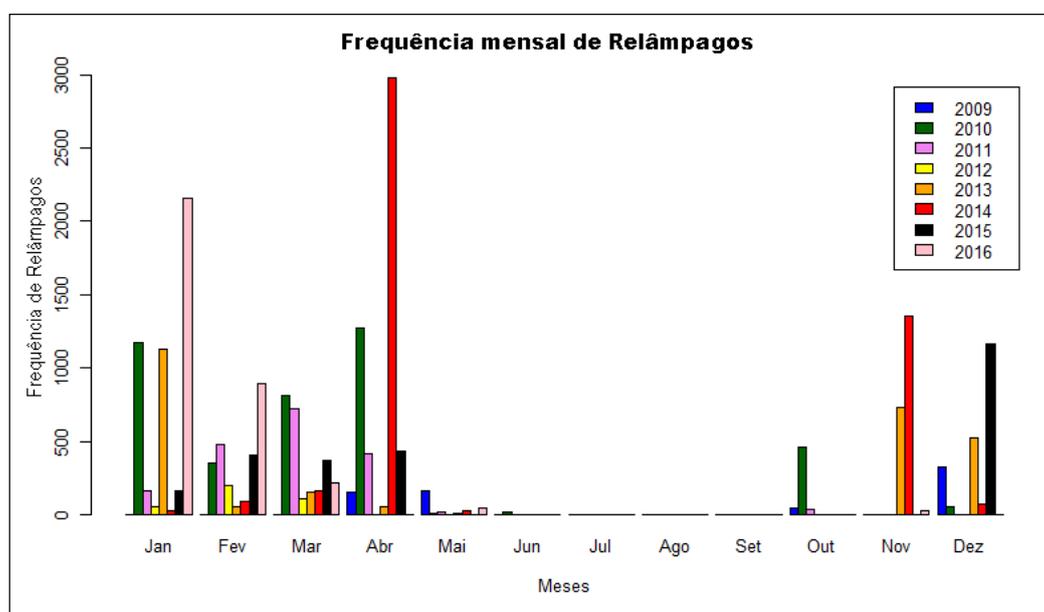
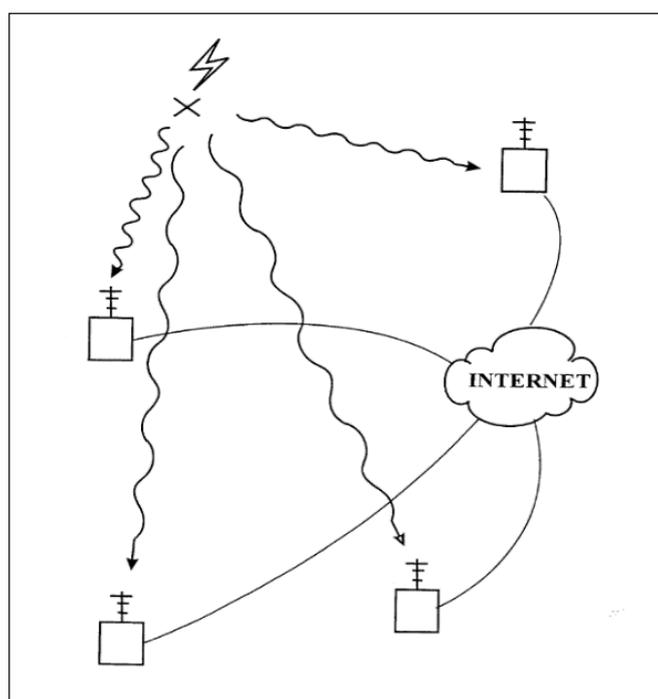


Figura 2. Frequência de descargas elétricas atmosféricas obtida através dos dados da World Wide Lightning Location Network, entre o período de maio de 2009 a dezembro de 2016 para Alagoas.

2.2 Dados de localização de Relâmpagos

As descargas elétricas atmosféricas produzem radiação eletromagnética em várias frequências, parte dessas ondas são produzidas na frequência de rádio conhecida como VLF (Very Low Frequency - que varia de 3 – 30 kHz) e conseguem viajar a longa distância através do guia de onda formado entre a terra e a ionosfera que refletem essas ondas com pouca perda de sinal (McMAHON *et al.*, 2016). Os pulsos de energia de muito baixa frequência produzidos pelas descargas são denominados de sinal rádio atmosférico ou “Sferics” e é através desses pulsos que é possível determinar a localização destas descargas. A WWLLN é uma rede de monitoramento de relâmpagos, onde cada estação mede os sinais (Sferics). Quando o valor deste sinal excede certo limiar, envia este tempo de chegada em cada estação para a central, que utiliza o método TOGA (Lightning Location by Time of Group

Arrival) descrito por Dowden, Brudell e Rodger (2002), que se baseia no método TOA (Time of Arrival), sendo um aprimoramento para redes do tipo VLF utilizando a diferença de tempo dos pulsos eletromagnéticos gerados pelas descargas atmosféricas, ao chegarem nas estações que conseguirem detectar. Porém, levando em conta a velocidade de grupo da onda, agrupando em pares as estações e se 4 ou mais estações receberam o sinal da mesma descarga, é calculada a localização do relâmpago. Esta rede de monitoramento conta com 40 estações operando na faixa de 1 a 24 kHz, sendo compostas por uma Unidade de Serviço (SU), Pré-amplificador (PA), uma antena GPS e um cabo coaxial de 15 metros, uma antena de rádio de baixa frequência, placa de som Audigy e acesso à rede de internet para disponibilização dos dados para a central. A precisão da localização desta rede é de aproximadamente 10 km (RODGER *et al.*, 2009; RUDLOSKY; SHEA, 2013).



Fonte: Dowden e Brudell (2000).

Figura 3. Esquema de recepção dos dados das estações para localização da descarga, em que é simulado o sinal emitido por um relâmpago que acaba sendo detectado pelas estações próximas e enviado através da internet para uma central.

Os dados que serão utilizados são do ano de 2016, isto porque foi o ano mais recente que possuímos os dados para cada dia sem nenhuma falha. Estes dados contêm informações das descargas detectadas a partir do sistema de rede de monitoramento WWLLN. Tais dados são padronizados conforme estrutura descrita a seguir:

- Os arquivos possuem a extensão (.loc) e são armazenados como arquivo de texto ASCII, separados por vírgula;
- A nomenclatura do arquivo segue o padrão, (A*****.loc). Os asteriscos indicam a data na qual foi realizada a obtenção do arquivo (ex: A20100905.loc);
- O arquivo é estruturado por meio de seis colunas de dados, as quais são separadas pela vírgula;
- Na primeira coluna encontramos a data no formato: Ano/Mês/Dia. Na segunda coluna encontramos o instante em que ocorreu a descarga atmosférica no formato: Hora:Minuto:Segundo;

- A terceira e a quarta coluna contém a localização geográfica e indicam a latitude e a longitude do relâmpago detectado;
- Na quinta coluna está o erro de ajuste residual em microssegundos (sempre menor que 30 microssegundos) calculado pelo sistema TOGA para determinar da localização do relâmpago detectado;
- Na última coluna se tem a quantidade de estações que detectaram a descarga atmosférica (sempre maior que 5).

Tabela 1. Um exemplo do arquivo de localização de relâmpagos. O registro obtido em 03 de janeiro de 2016 apresenta descargas que foram observadas simultaneamente por diferentes estações. As colunas mostram a data, horário, localização geográfica, erro residual e o número de estações que detectaram a descarga atmosférica.

03/01/2016	00:00:00.039216	28.9039	-137.258	12.3	7
03/01/2016	00:00:00.052136	28.9097	-137.243	11.2	8
03/01/2016	00:00:00.585477	6.632	-73.2042	12	10
03/01/2016	00:00:00.585562	6.9105	-73.1572	1.9	5
03/01/2016	00:00:00.683626	6.6719	-73.2298	7.5	8
...

2.3 Dados do MSG

Os dados de satélites que foram usados neste trabalho são do MSG (Meteosat Second Generation) que possui o sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) com 3 canais solares, 8 canais térmicos infravermelhos e um canal visível de banda larga com alta resolução, como descritos na Tabela 2. Os canais de banda estreita possuem uma resolução de 3 km, já o de banda larga possui resolução de 1 km. (TARAVAT *et al.*, 2015; SCHMETZ *et al.*, 2002).

Tabela 2. Características do canal espectral de SEVIRI, com os comprimentos de onda central, mínimo e máximo dos canais e se o canal é um canal de absorção ou de janela atmosférica. Fonte: SCHMETZ *et al.* (2002).

Número do Canal		Características da Banda Espectral (μm)			Principal Absorvedor gasoso ou Janela Atmosférica
		λ cen	λ min	λ max	
1	VIS0.6	0.635	0.56	0.71	Janela Atmosférica
2	VIS0.8	0.81	0.74	0.88	Janela Atmosférica
3	NIRI.6	1.64	1.50	1.78	Janela Atmosférica
4	IR3.9	3.90	3.48	4.36	Janela Atmosférica
5	WV6.2	6.25	5.35	7.15	Vapor d'água
6	WV7.3	7.35	6.85	7.85	Vapor d'água
7	IR8.7	8.70	8.30	9.10	Janela Atmosférica
8	IR9.7	9.66	9.38	9.94	Ozônio
9	IR 10.8	10.80	9.80	11.80	Janela Atmosférica
10	IR 12.0	12.00	11.00	13.00	Janela Atmosférica
11	IRI3.4	13.40	12.40	14.40	Dióxido de Carbono
12	HRV	Banda Larga(cerca de 0.4 - 1.1)			Janela Atmosférica / Vapor d'água

De acordo com Schmetz *et al.* (2002), através desses canais é possível observar algumas características das nuvens como:

- VIS0.6 e VIS0.8: Detecção e identificação de nuvens, aerossol e monitoramento da superfície e vegetação;
- NIR1.6: Diferenciar nuvens de neve, gelo e água, fornecendo informações também sobre os aerossóis;
- IR3.9: Identificação de nuvens baixas e de neblina. Além de também dar suporte na estimativa da temperatura da terra e mar;
- WV6.2 e WV7.3: Observação do vapor de água e do vento;
- IR8.7: Fornece informações sobre nuvens cirrus e dá suporte na diferenciação das nuvens de água e gelo;
- IR9.7: Auxilia no monitoramento do Ozônio;
- IR10.8 e IR12.0: Ótimo para medidas da temperatura da superfície do mar e da terra, além da temperatura de topo de nuvem. Auxilia ainda na detecção de nuvens cirrus e nuvens de cinzas vulcânicas;
- IR13.4: Auxilia na estimativa da temperatura em baixa troposfera em áreas de céu limpo;

Estes dados foram obtidos através do Earth Observation Portal (<https://eoportal.eumetsat.int/userMgmt/login.faces>) e possuem resolução temporal de 15 min e se encontram no formato HRIT (High Rate Information Transmission).

2.4 Softwares, bibliotecas e linguagens de programação utilizadas

Python é uma linguagem de programação de alto nível, orientada a objetos e de código aberto. Segundo Magnum (2014) esta linguagem foi lançada em 1991 por seu criador Guido Van Rasmus, atualmente é gerenciada pela Python Software Foundation, uma organização sem fins lucrativos. O nome Python se originou de um programa de comédia britânica chamada Monty Python. Esta linguagem tem uma biblioteca interna vasta, isto a torna bem relevante no tratamento de dados e por este motivo é bastante usada no meio científico, além de possuir seu desenvolvimento comunitário, o que possibilita a criação de várias bibliotecas criadas por diferentes desenvolvedores, tornando ainda mais fácil o seu uso. Por essa imensidão de utilidades, esta linguagem é bastante utilizada em ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), dispondo de uma gama de bibliotecas para análise, uso e edição de dados georreferenciados.

GDAL é uma biblioteca que possui um conjunto de ferramentas para tratamento de dados SIG, é executado através de linhas de comandos, sendo muito utilizado em softwares de geoprocessamento pelos seus recursos avançados. Nesta sua biblioteca também é encontrada a OGR, outra biblioteca, open source, escrita em C++ que oferece ferramentas para tratamento de dados vetoriais.

Software "R" (A Language and Environment for Statistical Computing) é uma linguagem de programação voltada para estatística e geração de gráficos desenvolvido nos Laboratórios Bell (anteriormente AT&T, agora Lucent Technologies) (R CORE TEAM, 2018).

QGIS é um software SIG, open source, que disponibiliza ferramentas para criação, edição e análise de dados georreferenciados. Possui suporte para integração de plugins desenvolvidos em C++ ou Python, tornando ainda mais vasta a sua biblioteca de ferramentas.

2.5 Seleção dos dias para análise

- Dias convectivos com relâmpagos:

A seleção foi feita através da frequência de relâmpagos diária para Alagoas. Esta frequência foi obtida através de um algoritmo na linguagem Python. Em primeiro

momento é feita a leitura do dado bruto e para diminuição do uso de recurso computacional, otimizando o fluxo de dados durante o processo, é feita uma filtragem horária e também por extensão através de um retângulo envolvente da área de estudo, compreendido entre as latitudes 8° 48' 0" S e 10° 32' 24" S e entre as longitudes 35° 6' 36" W e 38° 16' 12" W, eliminando qualquer dado fora desta área. Após a filtragem, os dados são salvos em tabela no formato CSV (Comma-separated values), em que posteriormente serão convertidos através da biblioteca OSGEO para o formato ESRI Shapefile. A partir destes arquivos, é feito um corte utilizando um Shapefile da área de estudo por meio da biblioteca Ogr2ogr, obtendo assim os dados unicamente dentro da área estudada, fazendo a contagem de relâmpagos detectados naquele dia processado e salvando em uma tabela no formato CSV contendo o dia, mês, ano e a frequência de relâmpagos para o dia processado. Escolheu-se apenas os dias em que houve incidência de relâmpagos em Alagoas. Ao total foram escolhidos 35 casos.

- Dias convectivos sem relâmpagos:

Para a seleção dos dias convectivos sem relâmpagos foram utilizados os dados do canal Infravermelho 10.8 do Meteosat através do acervo de imagens do CPTEC/INPE (<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/meteosat.formulario.logic?i=br>). A identificação desses dias convectivos foi feita através da metodologia de caracterização das nuvens descrita por Fedorova (2008) observando o brilho e textura das nuvens, onde as nuvens convectivas possuem brilho cinza claro ou branco e textura granulosa e filamentosa. Foram analisados dia a dia do ano de 2016, excluindo da análise os dias em que foram caracterizados com relâmpagos. Sendo assim, foram identificados 31 casos.

2.6 Parâmetros para análise

Para análise foram considerados dois fatores físicos das nuvens analisadas, a profundidade da convecção que nos indica o desenvolvimento vertical da nuvem e a formação de gelo no topo da nuvem, fator físico importante para eletrização das mesmas. Para análise de tais fatores foram considerados os seguintes indicativos:

- Profundidade da convecção:

Machado *et al.* (2007) em seu estudo teve como objetivo testar a hipótese de que a diferença entre o canal de vapor d'água e o infravermelho, como indicador de nuvens convectivas, está relacionado a ocorrência de relâmpagos nuvem-solo no estado de São Paulo. Para tal, fez-se uso do estudo de Schmetz *et al.* (1997), que sugeriu que a diferença entre os canais de vapor d'água e Infravermelho é comumente negativa devido à baixa absorção do Infravermelho (Janela Atmosférica) e a grande absorção do canal do Vapor d'água, exceto quando as nuvens ultrapassam a tropopausa umedecendo a estratosfera e dessa forma teremos diferenças positivas entre esses dois canais. Como resultado, Machado *et al.* (2007), sugere que a diferença desses canais acima de -15K está associada a nuvens com convecção profunda próximas a tropopausas ou a topo de nuvens que penetraram a estratosfera.

Então, para análise da profundidade de convecção das nuvens neste estudo, considerou-se as diferenças entre o canal de Vapor d'água (6.2 μm) e o infravermelho (10.8 μm) do Meteosat, levando-se em conta o indicador de -15K sugerido por Machado *et al.* (2007).

- **Formação de Gelo no topo da nuvem:**

Um dos fatores importantes para a eletrização das nuvens é a presença de gelo formada em seu topo. Da Silva Neto, Barbosa e Beneti (2016) considerou, em seu estudo para determinar nuvens com topos formados apenas com cristais de gelo valores abaixo de um limiar de 233K da temperatura de brilho do canal 10.8 do Meteosat, considerando este valor seguro para tal. Matthee e Mecikalski (2013) fez um estudo para determinação de limiares dos valores dos canais do MSG e da diferença entre alguns deles para nuvens com relâmpagos nuvem-solo e para nuvens que não produziram relâmpagos. Um dos parâmetros analisados foi a diferença entre os canais infravermelho do 8.7 μm e 10.8 μm que indicam formação de gelo no topo da nuvem para valores, da diferença destes canais, maiores que 0 K.

Para analisar a formação de gelo no topo da nuvem, foram então adotados esses dois limiares: temperaturas de brilho abaixo de 233K e valores positivos da diferença entre o canal infravermelho 8.7 μm e 10.8 μm .

2.7 Processamento dos dados

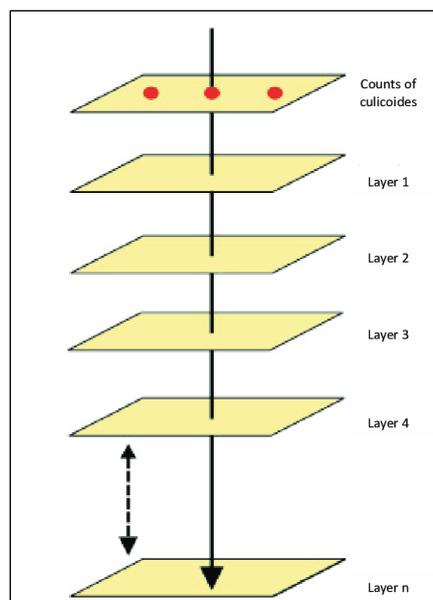
Para leitura e processamento dos dados do MSG é necessária a conversão do formato HRIT para um conhecido, lido de maneira fácil por linguagens de programação e softwares SIG (Sistema de informação geográfica). Desse modo, foram convertidos para o formato GeoTiff através da biblioteca GDAL todos os dados dos dias convectivos selecionados com e sem relâmpagos, posteriormente foi feito o recorte para área de interesse, utilizando um Shapefile do estado de Alagoas, através da biblioteca Ogr2ogr. Os dados aqui mencionados são dos canais do Infravermelho 8.7 μm e 10.8 μm e do vapor d'água 6.2 μm . Então foi calculada, utilizando o GDAL, a diferença entre os canais (8.7 μm - 10.8 μm e 6.2 μm - 10.8 μm), gerando assim um novo arquivo GeoTiff contendo o valor resultante dessas diferenças para cada dado processado. Quanto aos dados de localização de relâmpagos foi feita a conversão do formato de texto ASCII para o formato de Shapefile de pontos, sendo assim, os dados foram gerados para uma frequência de 15 em 15 minutos no intuito de haver alinhamento com a resolução temporal dos dados do MSG. Cada dado deste possui a localização dos relâmpagos que ocorreram nos últimos 15 minutos até a hora e minuto que o dado representa.

Através da linguagem de programação Python, os dados do MSG para os dias sem relâmpagos foram filtrados para cada horário da seguinte forma:

- IR 8.7 μm – IR 10.8 μm : Valores maiores que 0 K;
- WV 6.2 μm - IR 10.8 μm : Valores maiores que -15 K;
- IR 10.8 μm : Valores menores que 233 K;

Posteriormente, os dados filtrados foram armazenados em arquivos no formato CSV contendo a data e todos os dados filtrados dos horários para aquele dia.

Para os dias com relâmpagos, os dados obtidos tanto do canal IR 10.8 μm quanto das diferenças se deram através da extração dos valores do pixel por meio dos Shapefile de pontos da localização de relâmpagos, utilizando a linguagem Python, como ilustrado na Figura 4. Desta forma, foram geradas tabelas no formato CSV com a data e os valores dos dados aqui analisados que fazem intersecção com a localização do relâmpago para o mesmo dia e horário.



Fonte: Eksteen e Breetzke (2011).

Figura 4. Exemplo de como funciona a extração dos valores das camadas (Em amarelo) de um arquivo raster através de pontos georreferenciados (Em vermelho).

No presente trabalho também foi feito um estudo de caso voltado para uma análise espacial de um horário em um dia convectivo com relâmpagos. A escolha do caso se deu usado o seguinte critério: O horário com maior frequência de relâmpago no dia com mais ocorrência de descargas no período aqui analisados. Desta forma buscando ser um melhor caso representativo para análise de nebulosidade geradora de relâmpagos.

Para esta análise foi utilizado também a densidade de relâmpagos, obtida como mostrado no fluxograma da Figura 5 e descrito a seguir: Através do software QGIS foi feito a criação de um arquivo no formato ESRI Shapefile do tipo grade regular, com cada quadrado medindo 1 x 1 km (isto define a resolução do arquivo final, sendo o tamanho do pixel do raster). Posteriormente as coordenadas geográficas do arquivo shapefile construído, foram extraídas e armazenadas em um arquivo de texto contendo as latitudes e longitudes, máximas e mínimas, que descrevem cada quadrado da grade regular gerada. Criou-se então um algoritmo, na linguagem Python, pelo qual fez-se acesso aos dados brutos da localização de relâmpagos e se realizou uma filtragem por latitude e longitude na área de interesse delimitada pelas coordenadas geográficas (6°00' a 37°00'S e 33°00' a 75°00'O). Esta etapa teve a finalidade de otimizar o processamento ao diminuir a quantidade de dados manejados, no término, um novo arquivo de dados menor e com formato ajustado é produzido. A partir das coordenadas geográficas de cada quadrado da grade regular gerada pelo QGIS, calculou-se a quantidade total de relâmpagos por quadrado da grade. Para isso foi realizada uma filtragem a partir das coordenadas das descargas atmosféricas detectadas no arquivo de dados ajustado na etapa anterior. Assim um novo arquivo matricial, no formato ASCII Gridded XYZ é produzido. Ele contém as coordenadas do centro do quadrado na grade regular e a quantidade de relâmpagos em seu interior, obtendo-se, desta maneira, a densidade de relâmpagos.

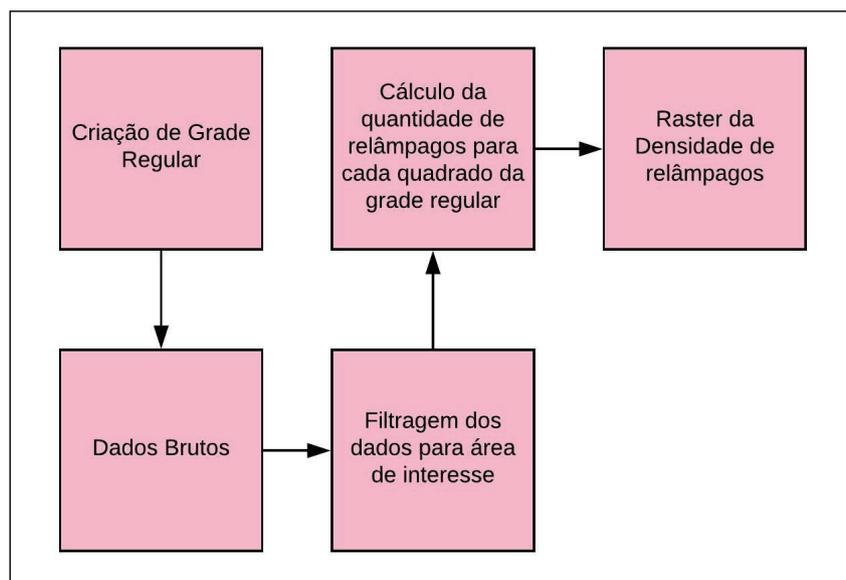


Figura 5. Fluxograma de resumo da metodologia para geração da densidade de relâmpagos.

Para plotagem dos gráficos foi utilizado a biblioteca ggplot2 do software R, sendo usado como dados as tabelas geradas anteriormente e para a criação dos gráficos foi utilizado o software QGIS.

3 Resultados e discussões

Na Figura 6 é observada a quantidade diária de relâmpagos detectados pela rede WWLLN no ano de 2016 no estado de Alagoas. Pode-se destacar para o dia 29 de janeiro de 2016, que apresenta maior quantidade diária de relâmpagos para o ano em análise. Com 1193 relâmpagos detectados pela rede, este dia tem grande discrepância em relação aos demais, principalmente por haver dias em que foram detectados apenas 1 relâmpago, como é o caso dos dias 21 de janeiro, 10 de fevereiro e 22 de março.

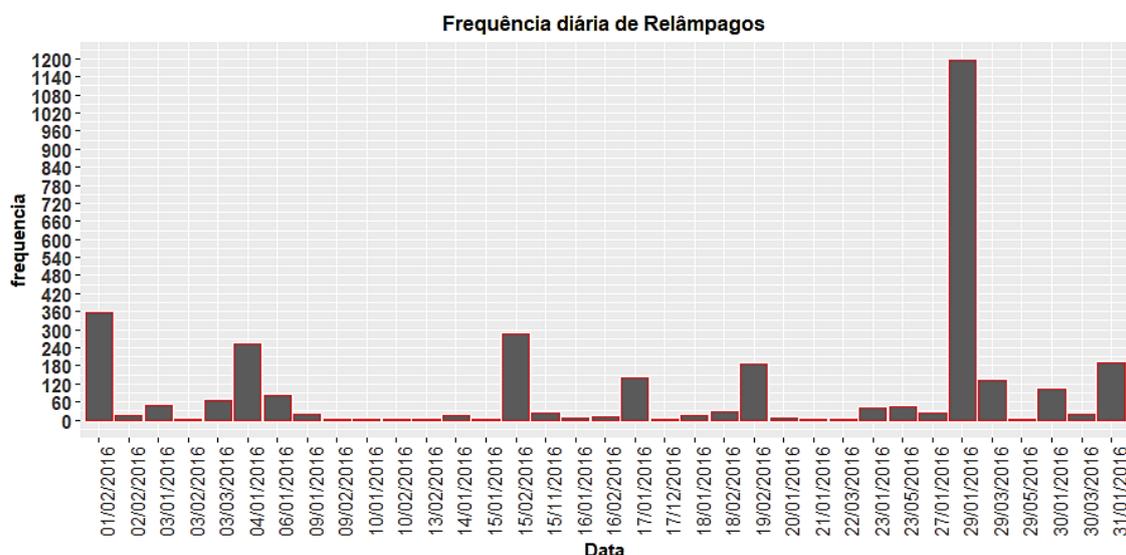


Figura 6. Gráfico da frequência diária de relâmpagos em Alagoas para os casos selecionados no ano

de 2016.

Na Figura 7 é observada a distribuição, em relação às estações do ano, dos casos de dias com nuvens convectivas selecionados neste estudo. Nota-se que tanto os dias com incidência de relâmpagos, quanto os dias que não houveram, ocorreram em sua maioria no verão e outono, principalmente os dias sem relâmpagos que mostram semelhança na distribuição entre essas duas estações, diferentemente dos dias com relâmpagos que em sua maioria ocorreram no verão. Fenômenos como VCAN (Vórtice Ciclônico de Altos Níveis), ZCIT e Cavados béricos são comuns nestas estações do ano no NEB (CORDEIRO, 2014). Esses sistemas sinóticos favorecem a formação de nuvens convectivas na região. O VCAN na região do NEB possui uma estrutura dinâmica onde em seu centro temos movimentos subsidentes e, na sua extremidade, movimentos ascendentes que favorecem a formação de nuvens cumulonimbus (KOUSKY; GAN, 1981). A Zona de Convergência Intertropical é uma banda de nebulosidade convectiva na zona equatorial formada pela confluência dos alísios. Parte dessa nebulosidade pode se desprender e atingir o estado de Alagoas (SILVA *et al.*, 2011). Cavados béricos se trata de uma área de baixa pressão, estando associado a sistemas adversos. Estes cavados são observados durante todo o ano, e quando associados ao VCAN podem modificar a estrutura desse, intensificando as correntes ascendentes, aumentando o fluxo de umidade e favorecendo assim a formação de nuvens convectivas (RODRIGUES; FEDOROVA; LEVIT, 2006b; RODRIGUES; FEDOROVA; LEVIT, 2006a).

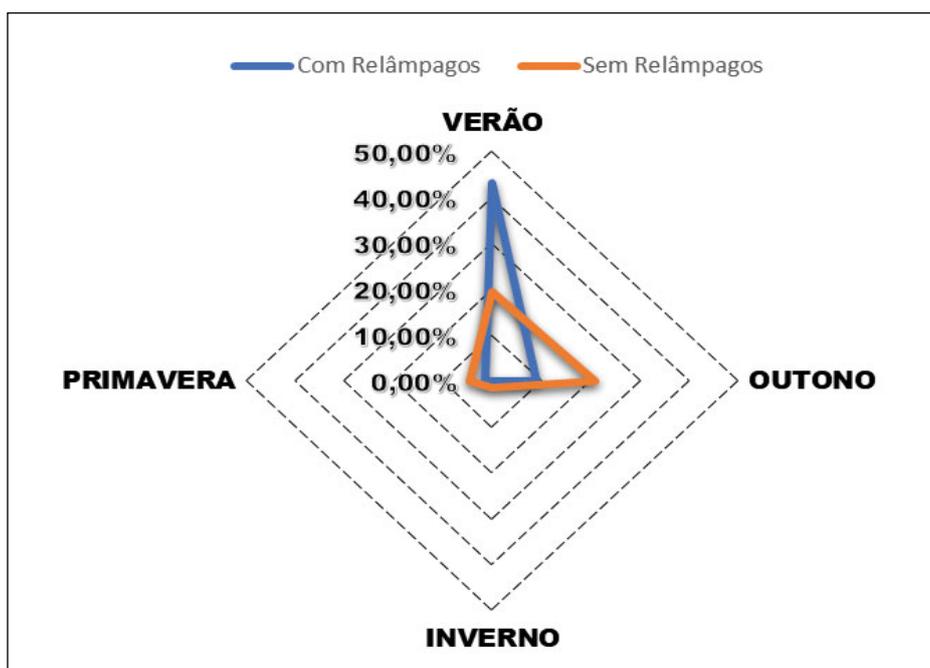


Figura 7. Distribuição dos dias selecionados com convecção no ano de 2016 em Alagoas, que apresentam ou não a incidência de relâmpagos, distribuídos nas estações: Verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), Outono (Março, Abril e Maio), Inverno (Junho, Julho e Agosto) e Primavera (Setembro, Outubro e Novembro).

3.1 Dias com relâmpagos

3.1.1 Análise da profundidade de convecção

Observa-se na Figura 8 que houveram, nos dias analisados, casos com valores menores que -15 K da diferença entre os canais 6.2 e 10.8 do Meteosat, como por exemplo os dias 15, 16 e 21 de janeiro e o dia 10 de fevereiro que apresentaram apenas valores

abaixo do limiar, apesar de que apenas 1-5 descargas foram detectadas nestes dias. O valor máximo obtido nos resultados ocorreu no dia 4 de janeiro com a diferença de 6,5 K, já o mínimo, de -59,9 K, ocorreu no dia 3 de janeiro. A maioria dos dias analisados tem a maior parte de seus dados distribuídos acima de -15 K, mostrando grande convecção nestes dias com possível entrada do topo da nuvem próximo ou acima da tropopausa.

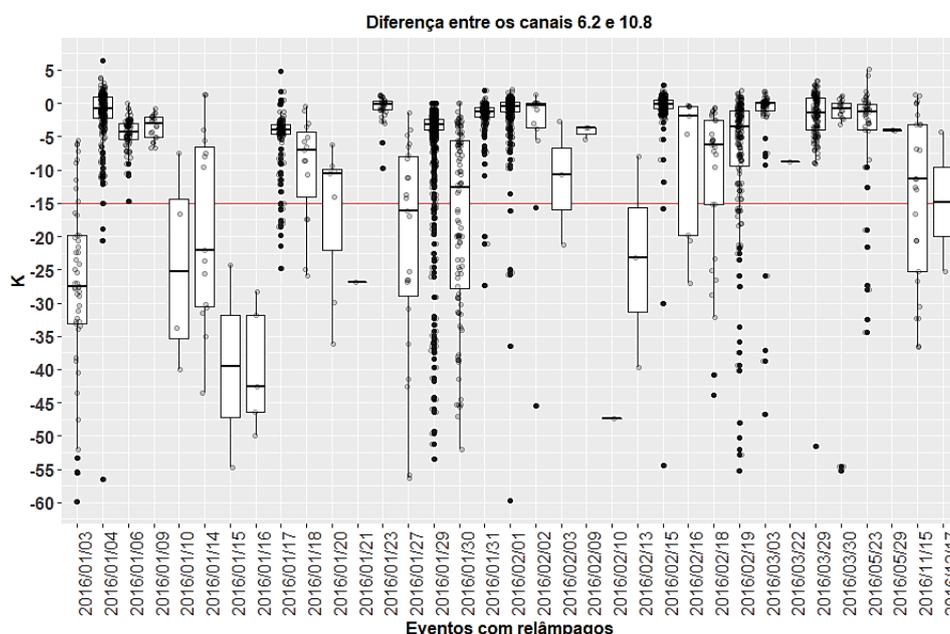


Figura 8. Gráfico da distribuição dos dados da diferença entre o canal 6.2 e 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos com relâmpagos no ano de 2016. Pontos pretos – todos os dados extraídos para cada dia que foi selecionado (eixo das abscissas). Linha vermelha – Limiar de -15 K (MACHADO *et al.*, 2007).

A Figura 9 corrobora com os resultados de Machado *et al.* (2007), pois a maior parte dos relâmpagos ocorreu quando as nuvens apresentaram diferença da temperatura de brilho (6.2 – 10.8) maiores que -15 K, sendo que podemos refinar mais ainda neste caso, para um intervalo entre -5K e 1,5K. Dessa forma quanto mais profunda a nuvem, ou seja, quanto maior o seu desenvolvimento vertical, maior é a chance de ocorrer o relâmpago.

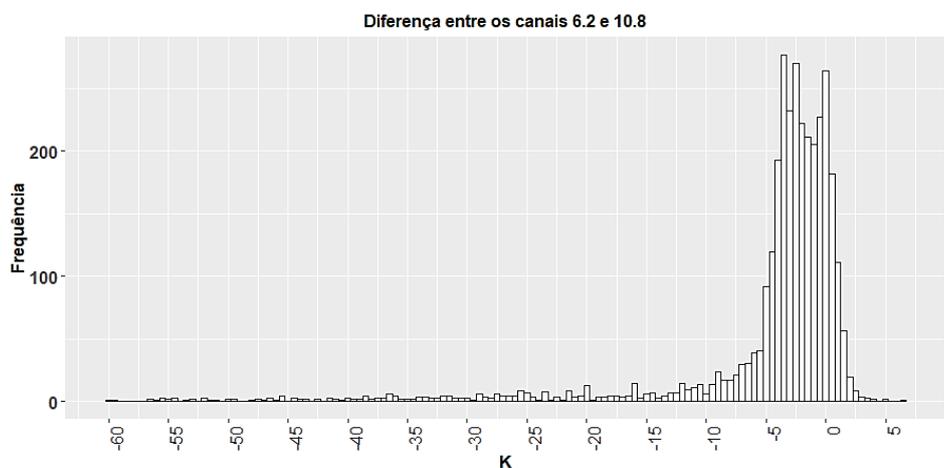


Figura 9. Histograma da distribuição da frequência da diferença de temperatura de brilho entre os

canais 6.2 e 10.8 do Meteosat para os eventos dos dias que ocorreram relâmpagos.

3.1.2 Análise da formação de gelo no topo da nuvem

Na Figura 10, observa-se que houve eventos de relâmpagos com temperaturas de brilho do canal IR 10.8 acima dos limiares 233K, como no dia 03 de janeiro, no qual maior parte dos dados se localizam acima do limiar estabelecido por Da Silva Neto, Barbosa, Beneti (2016). Já no dia 29 de janeiro, em que ocorreu a maior frequência de relâmpagos em 2016, houve casos tanto acima quanto abaixo do limiar de 233k. O maior valor encontrado é no dia 29 de janeiro, com 296 K, e o menor valor no dia 04 de janeiro, com 192 K.

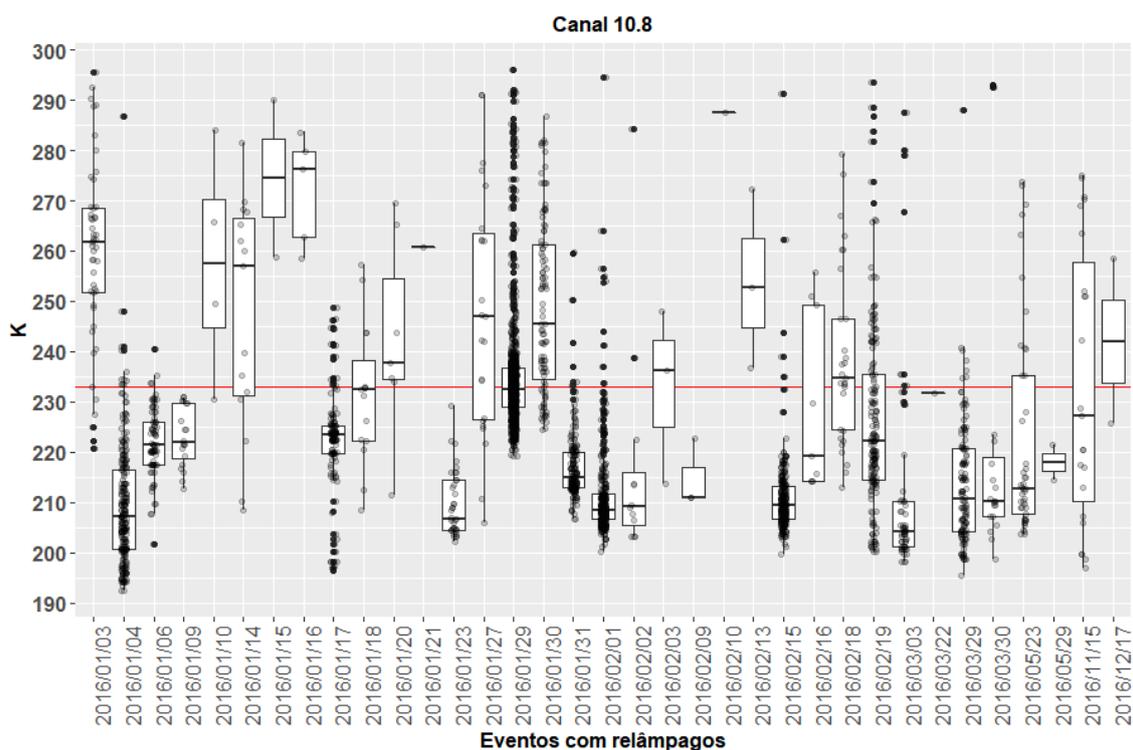


Figura 10. Gráfico da distribuição dos dados do canal 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos com relâmpagos no ano de 2016. Pontos pretos – todos os dados extraídos para cada dia que foi selecionado (eixo das abscissas). Linha vermelha – Limiar de 233K (DA SILVA NETO; BARBOSA; BENETI, 2016).

Analisando a distribuição de frequência desses dados no histograma da Figura 11, nota-se que a maior parte dos eventos ocorreu com temperatura de brilho do topo da nuvem entre 200 K e 240 K, tendo dois picos de frequência, um com eventos próximos de 215,5 K e outro com eventos próximos a 231 K. Segundo Da Silva Neto, Barbosa, Beneti (2016), gotas super-resfriadas são encontradas em nuvens com temperatura de brilho abaixo de 240 K, isso significa que a maior parte dos relâmpagos neste estudo ocorreu em nuvens não só com topos formadas por cristais de gelos como também por gotas super-resfriadas. A presença

de água super-resfriada é muito importante para a transferência de cargas dentro da nuvem, visto que sem ela há uma diminuição dessa eletrização (ZHANG; ZHANG; ZHOU, 2014).

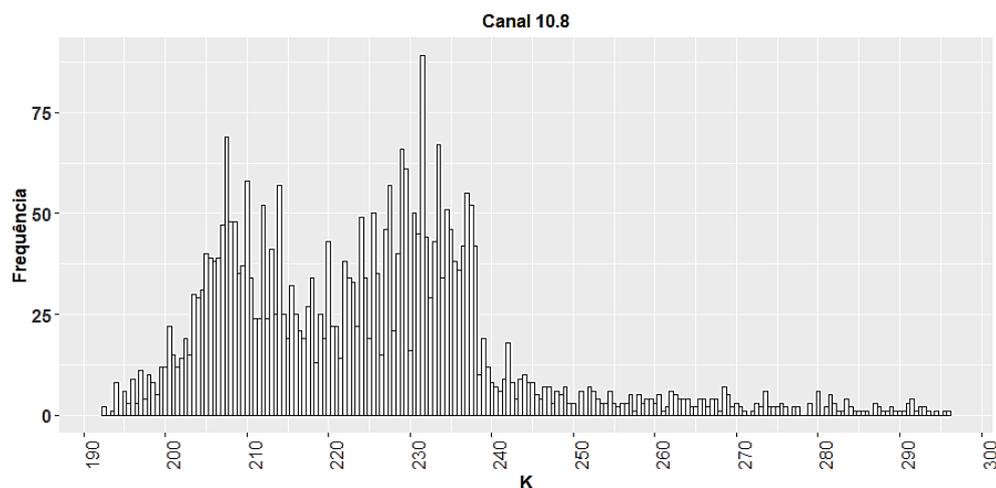


Figura 11. Histograma da distribuição da frequência da temperatura de brilho do canal infravermelho 10.8 do Meteosat para os eventos dos dias que ocorreram relâmpagos.

Na Figura 12, são apresentados os dados da diferença entre os canais 8.7 e 10.8 do MSG para os dias selecionados. A maioria desses dias apresenta, em sua maior parte, valores acima de 0 K, com máximo chegando a 5,8 k no dia 14 de janeiro e mínimo de -3,2 K no dia 23 de maio. Já no dia 29 de janeiro, a maioria dos relâmpagos ocorreu com diferenças de temperatura de brilho menores que 0 K. É interessante observar que alguns dias, como 04, 17, 23 e 31 de janeiro, 01 e 15 de fevereiro e 29 de março apresentam de modo predominante, valores abaixo de 233k de TB no Canal 10.8 e possuem diferenças positivas (IR 8.7 – IR 10.8) na maior parte dos dados, o que corrobora mais ainda com a ideia da presença de cristais de gelo nas nuvens dos eventos analisados. Apenas os dias 21 de janeiro e 10 de fevereiro não apresentaram diferenças positivas, porém só foi observado uma descarga em cada dia.

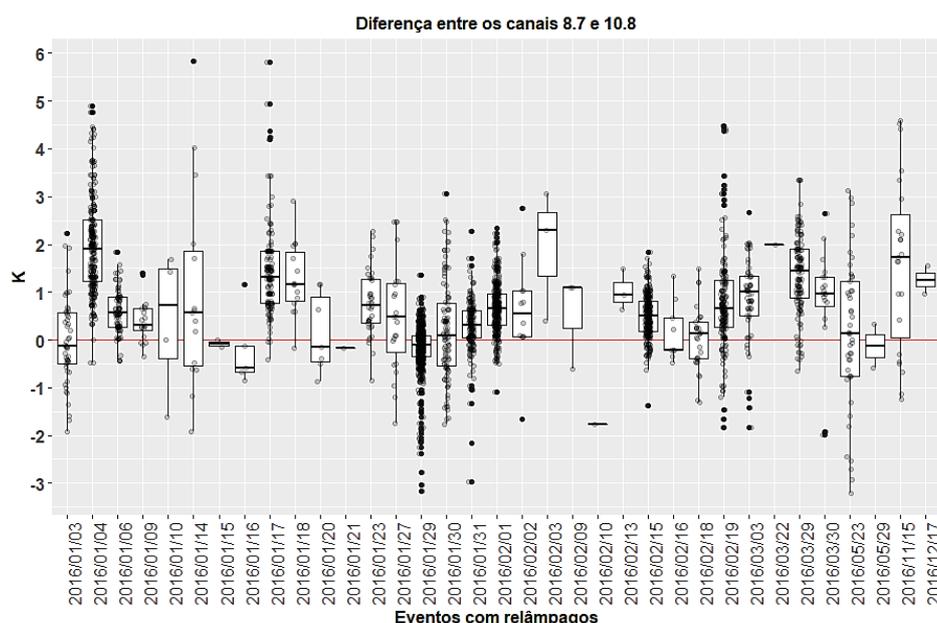


Figura 12. Gráfico da distribuição dos dados da diferença entre o canal 8.7 e 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos com relâmpagos no ano de 2016. Pontos pretos – todos os dados extraídos para cada dia que foi selecionado (eixo das abscissas). Linha

vermelha – Limiar de 0 K (MATTHEE; MECIKALSKI, 2013).

A maior parte dos relâmpagos aqui analisados ocorreram quando valores da diferença entre os canais 8.7 e 10.8 do Meteosat estavam próximos ou maior que 0 K (Figura 13). Destaca-se a diminuição da ocorrência de relâmpagos quando os valores dessa diferença tendem a se distanciar positivamente do 0. Ou seja, quanto maior a quantidade de gelo no topo da nuvem em relação à água líquida, menor é a possibilidade de descarga, mostrando o quanto é importante a presença de água líquida para a eletrização da nuvem.

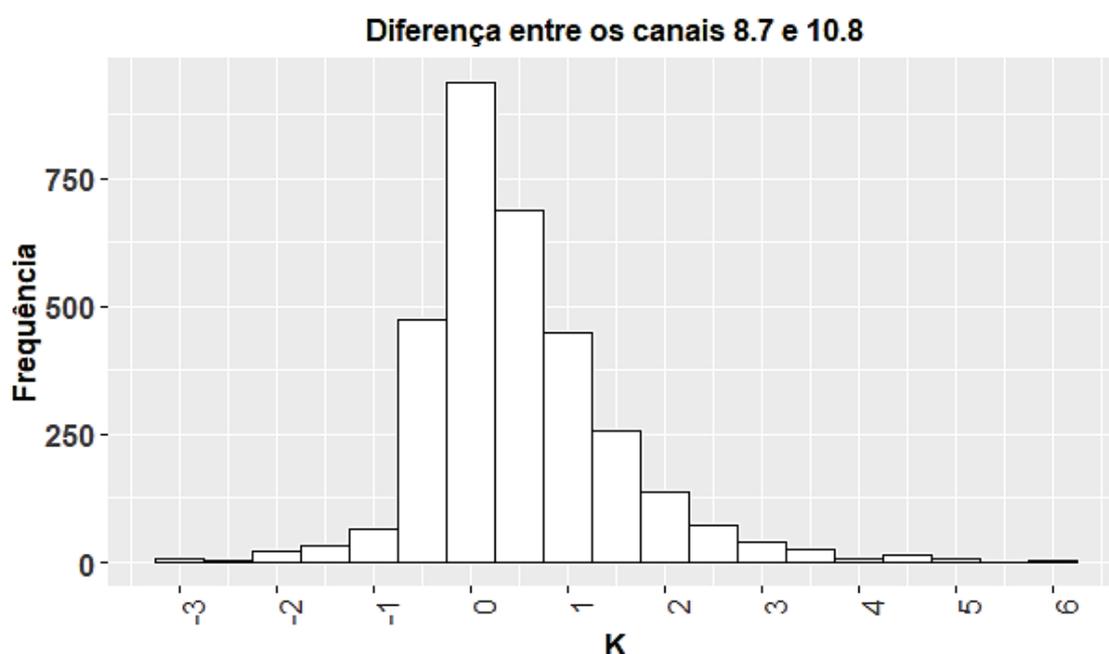


Figura 13. Histograma da distribuição da frequência da diferença de temperatura de brilho entre os canais 8.7 e 10.8 do Meteosat para os eventos dos dias em que ocorreram relâmpagos.

3.2 Dias sem relâmpagos – Comparação

3.2.1 Análise da profundidade de convecção

Para os dias sem relâmpagos, é observado que há valores da diferença do canal 6.2 e 10.8 maiores que -15 K (Figura 14), no entanto, como foi visto anteriormente, a maior parte das ocorrências de descargas elétricas se deram a partir de valores entre -5K e 1,5 K. Apesar de notarmos valores entre essa faixa, como por exemplo o pixel com maior diferença positiva de 4,8 K do dia 01 de maio de 2016, a maior quantidade de dados observadas em todos os dias ainda continua com valores inferiores a este limiar, diminuindo a probabilidade da ocorrência de relâmpagos em tais condições. Em outras palavras, apesar de as nuvens convectivas nestes dias apresentarem um bom desenvolvimento vertical, ainda não é o suficiente para criar condições favoráveis

ao ponto de ocorrer uma descarga elétrica atmosférica.

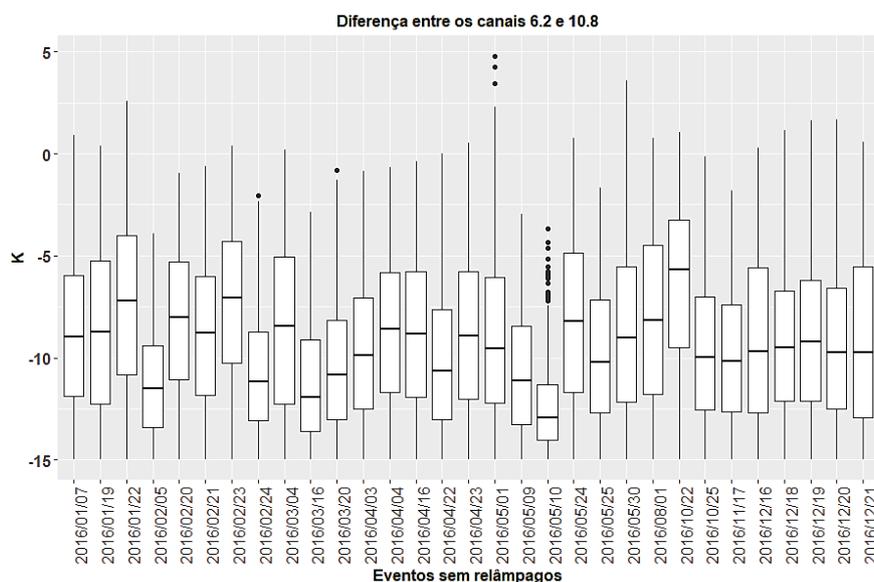


Figura 14. Gráfico da distribuição dos dados da diferença entre o canal 6.2 e 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos sem relâmpagos no ano de 2016 e com valores acima de -15K (MACHADO *et al.*, 2007).

3.2.2 Análise da formação de gelo no topo da nuvem

Já ao analisarmos o canal do infravermelho 10.8 na Figura 15 é observado que a maior concentração dos dados se detém entre o limiar de 233 K e 220 K. Se encontrando também na faixa analisada dos dias com relâmpagos que foi abaixo de 240K. Os dias sem relâmpagos não atingiram valores tão baixos quanto os com relâmpagos, como podemos ver, apenas poucos pixels atingiram valores abaixo de 220K. O valor mais baixo atingido foi de 199,2K ocorrido no dia 1 de maio, porém a maioria dos valores dos pixels para esses dias estão concentrados acima de 220K.

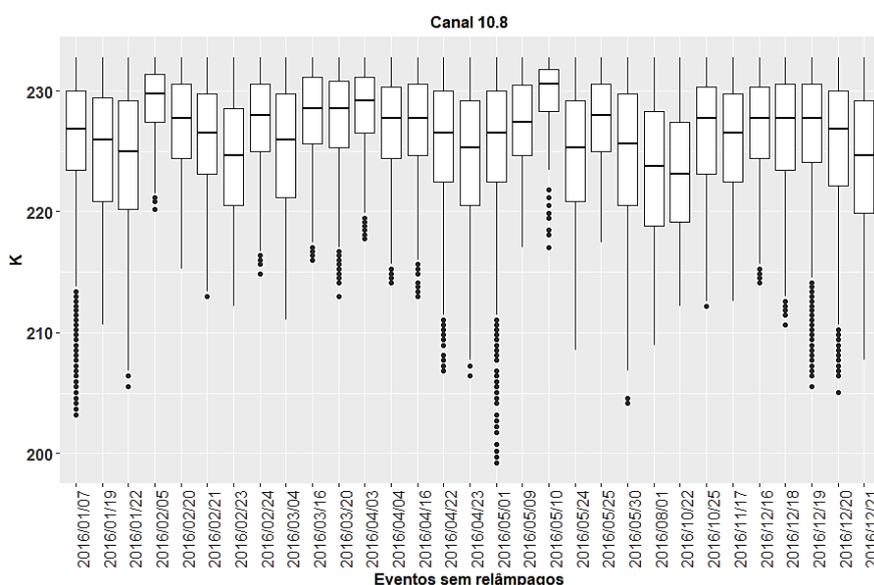


Figura 15. Gráfico da distribuição dos dados do canal 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos com relâmpagos no ano de 2016 e com valores abaixo de 233K (DA

Quanto a diferença entre os canais 8.7 e 10.8 (Figura 16) para os dias sem relâmpagos é observado maior concentração dos pixels com valores de diferença de até 3 K, comparado ao dias com relâmpagos onde a concentração foi entre -0,5K e 2K, os dias sem relâmpagos encontram-se dentro deste limiar, ou seja, há formação de gelo nas nuvens, porém isto não se torna um fator preponderante para condições ideais de geração de relâmpagos. Desta forma, também não há uma distinção clara neste campo analisado, entre as nuvens geradoras e as não geradoras de descargas elétricas atmosféricas.

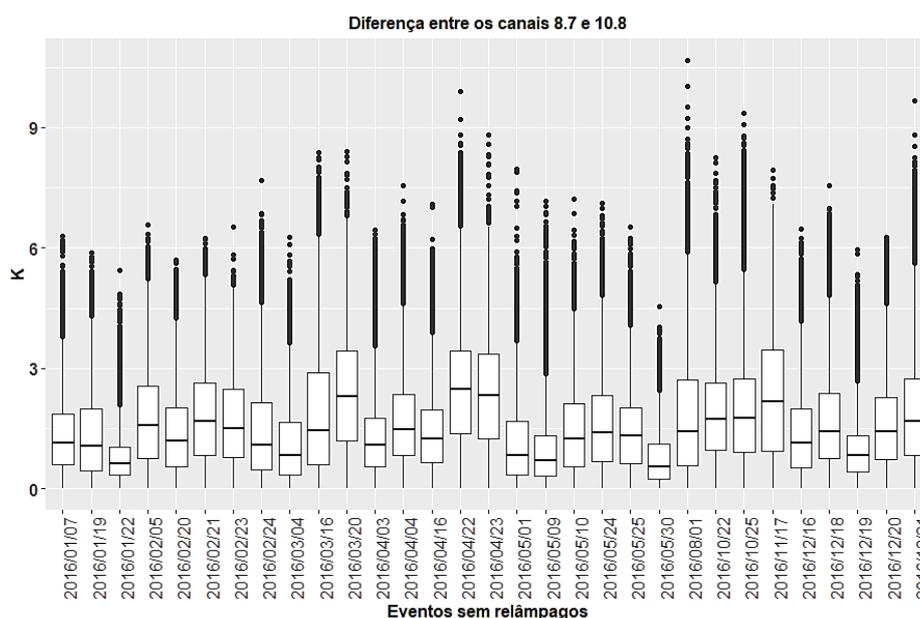


Figura 16. Gráfico da distribuição dos dados da diferença entre o canal 8.7 e 10.8 do MSG em Kelvin (eixo das ordenadas) para os casos dos dias convectivos com relâmpagos no ano de 2016 e com valores acima de 0 K (MATTHEE; MECIKALSKI, 2013).

3.3 Estudo de Caso: Dia 29 de Janeiro de 2016

3.3.1 Condições atmosféricas no dia estudado

Para o estudo de caso foi selecionado o dia 29 de janeiro, visto que foi o dia que apresentou maior quantidade de relâmpagos em 2016, tornando-se o mais representativo. Para este dia, através dos campos de pressão na Figura 17, é observado um cavado a sudoeste do estado e uma crista a leste para o horário de 00 UTC, já para o horário de 06 UTC o cavado se estende na costa do estado e a crista a oeste. A partir das 12 horas o cavado desintensifica, porém as 18 UTC é observada a noroeste do estado uma isóbara fechada de 1010hPa, assim como um cavado a leste. Através dos campos de linhas de correntes de médios (500 hPa) e altos níveis (200 hPa), é possível observar um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) sobre o nordeste brasileiro, presente ao longo do dia nos horários aqui analisados, e de grande profundidade se estendendo de altos a médios níveis com seu eixo inclinado.

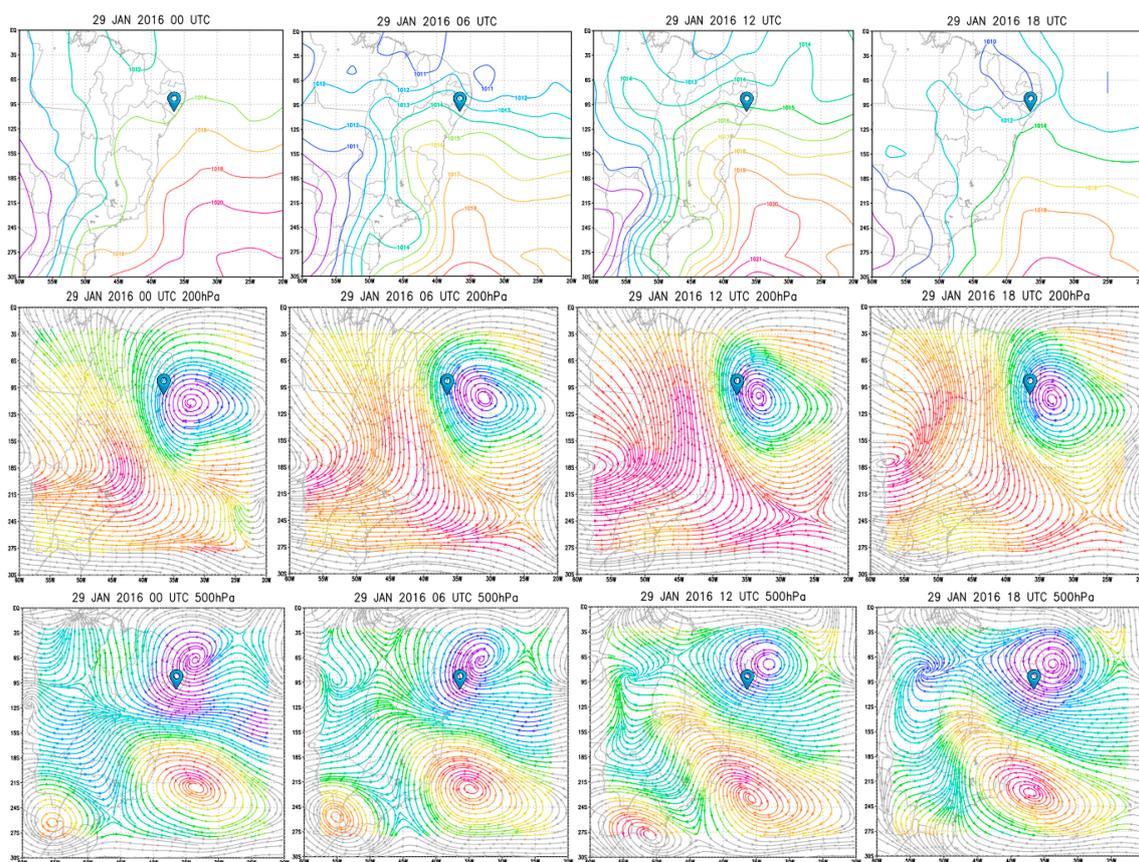


Figura 17. Pressão a nível do mar em hPa (Primeira linha), linhas de correntes em 500 hPa (segunda linha) e Linhas de correntes em 200 hPa (terceira linha). Os dados foram plotados para o dia 29 de janeiro de 2016 nos horários de 00 UTC (primeira coluna), 06 UTC (segunda coluna), 12 UTC (terceira coluna), 18 UTC (quarta coluna). Seta azul destacando a localização do estado de Alagoas.

O VCAN, de acordo com Cordeiro (2014), é o principal fenômeno associado com trovoadas no estado de Alagoas. Dessa maneira, o cavado em conjunto com o VCAN no dia 29 de janeiro de 2016, foram os sistemas sinóticos que causaram a nebulosidade para este dia e, conseqüentemente, condições favoráveis para a ocorrência das descargas elétricas atmosféricas em Alagoas.

Através da densidade de relâmpagos, na Figura 18, é possível observar a distribuição espacial das descargas que ocorreram no dia 29 de janeiro. Foram detectados relâmpagos em grande parte do estado de Alagoas, porém há uma maior concentração na região leste do estado próximo à região litorânea. Municípios como Barra de Santo Antônio e São Luís do Quitunde apresentam valores de até 5 relâmpagos por km².

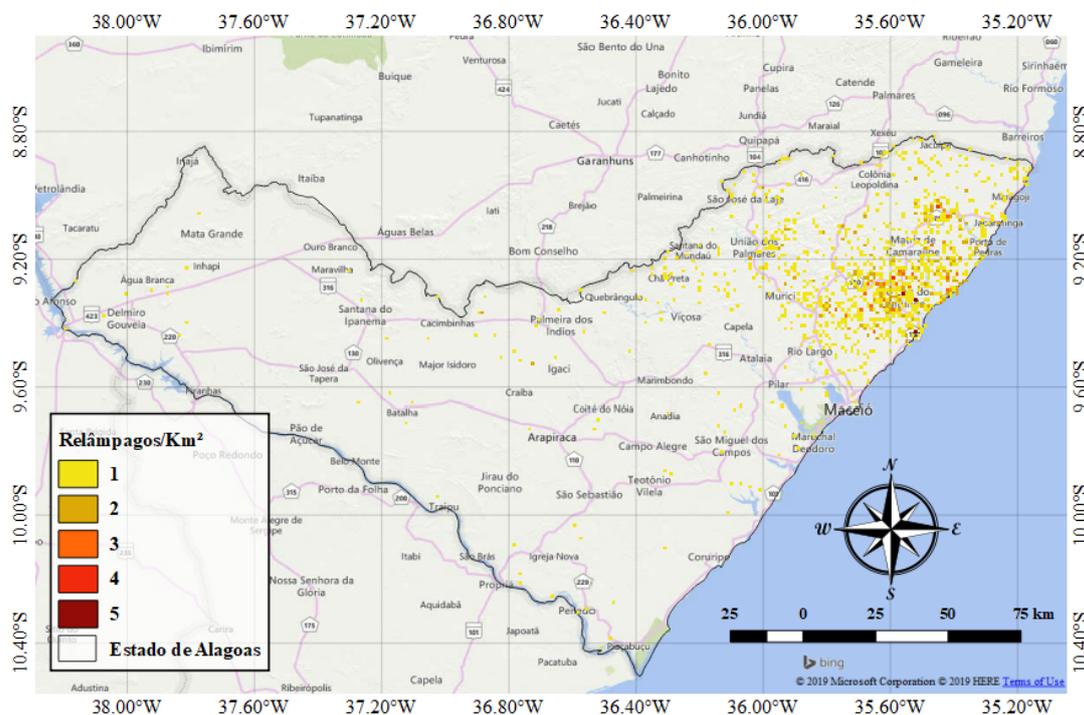


Figura 18. Densidade de Relâmpagos (relâmpagos / km²) no Estado de Alagoas para o dia 29 de janeiro de 2016.

3.3.2 Análise com os dados do MSG

Para a análise, foi escolhido o horário de 15:15 UTC, pois foi o horário em que mais houve ocorrência de relâmpagos. Nota-se na Figura 19 que as ocorrências iniciaram desde 13:45 UTC até as 22:45 UTC, porém a maior frequência foi de 134 relâmpagos detectados neste horário de 15:15 UTC.

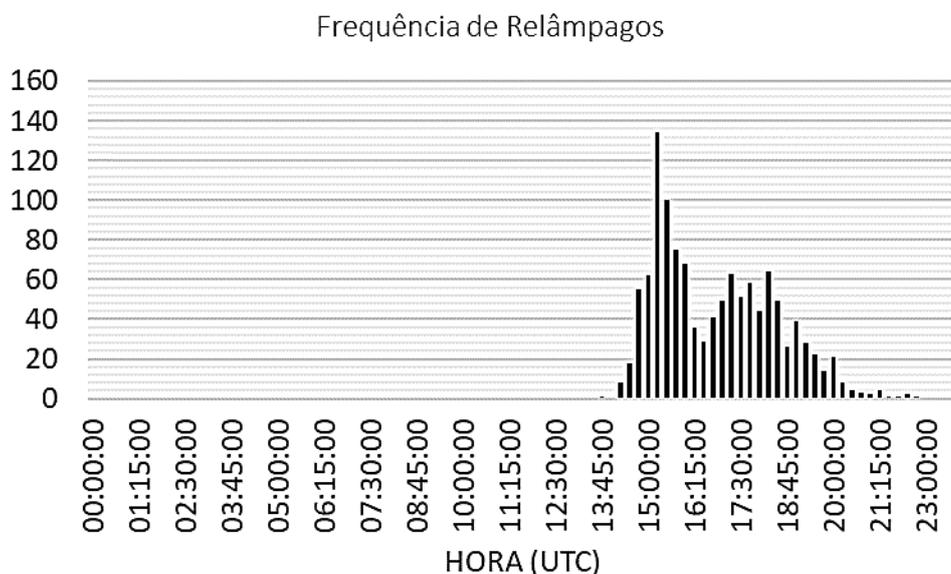


Figura 19. Gráfico da frequência de relâmpagos a cada 15 minutos no Estado de Alagoas para o dia 29

de janeiro de 2016.

Na Figura 20, podemos observar que às 15:15 UTC havia nebulosidade formada devido ao VCAN, principalmente nas áreas de sua extremidade (Figura 17). Em Alagoas, há nebulosidade em grande parte do estado, mas é notável a nebulosidade convectiva na costa leste do estado de Alagoas, que também se estende até o estado de Pernambuco.

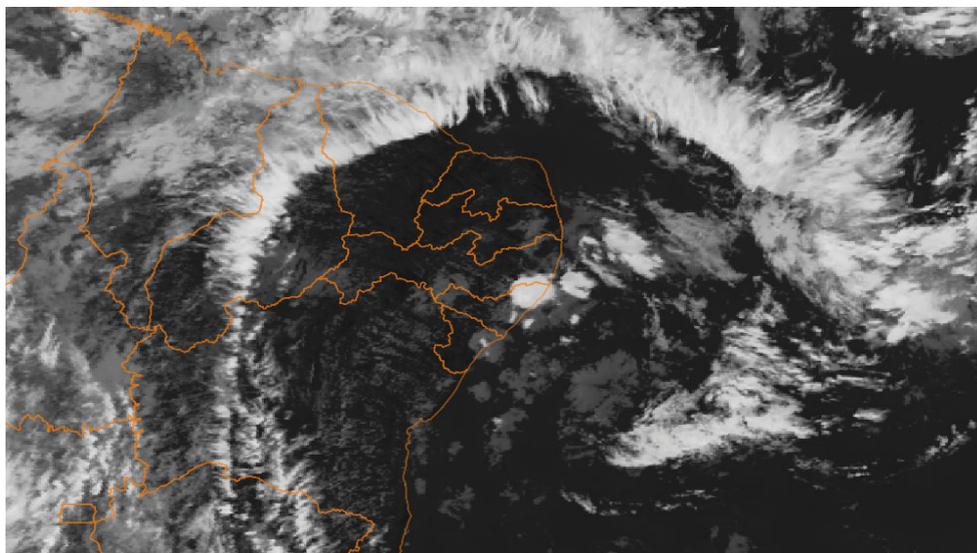


Figura 20. Imagem do canal Infravermelho 10.8 do MSG para o horário de 15:15 UTC no dia 29 de janeiro de 2016.

Na diferença entre os canais 6.2 e 10.8 do MSG para este horário (Figura 21), nota-se na região leste do estado de Alagoas que há uma concentração de valores acima de -5K, justamente na área da nebulosidade observada anteriormente. Ou seja, a nebulosidade observada apresenta grande desenvolvimento vertical, condições favoráveis para descargas elétricas, as quais foram detectadas apenas nesta região para as 15:15 UTC. Entre a região de Coruripe e São Miguel dos Campos também são observados alguns valores acima de -5K, porém em uma área menor e não houve relâmpago detectados para esta região neste horário.

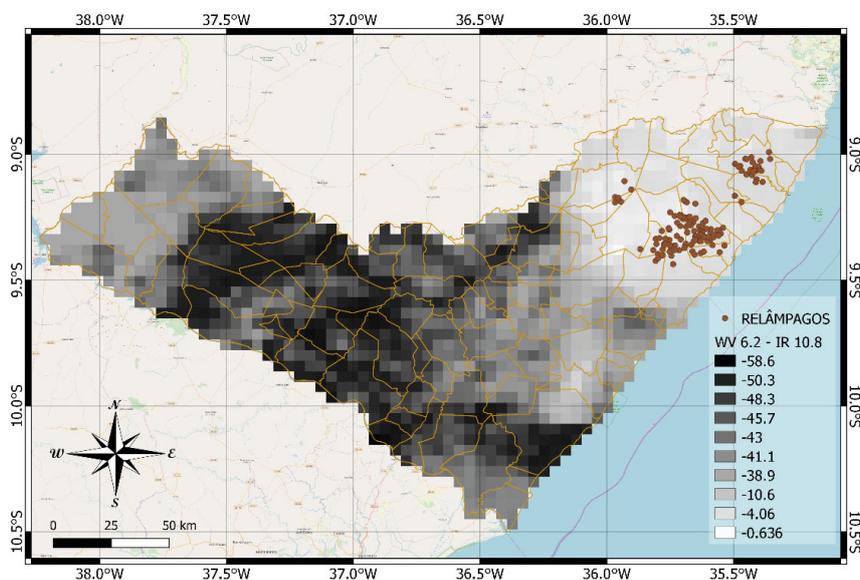


Figura 21. Mapa da diferença de Temperatura de brilho entre o canal 6.2 e 10.8 do MSG para Alagoas-

no horário de 15:15 UTC para o dia 29 de janeiro de 2016.

Na Temperatura de brilho do canal 10.8 (Imagem 22), há uma concentração de valores abaixo de 236K na região onde ocorreram os relâmpagos. Então a nebulosidade no leste de alagoas observada apresentou formação de gelo em seu topo. As demais regiões que não apresentaram descargas elétricas tiveram em sua maioria, temperaturas acima de 247K, exceto na região mencionada anteriormente (entre Coruripe e São Miguel dos Campos) onde também houve temperaturas abaixo de 236K.

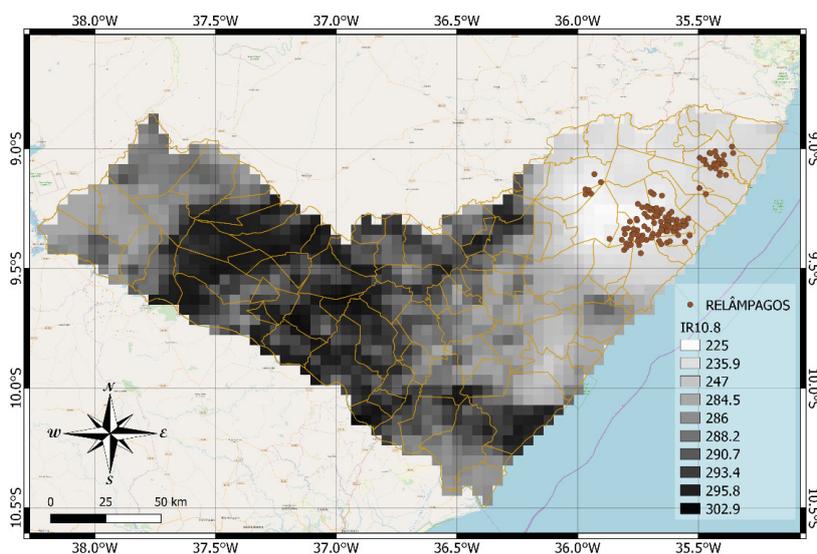


Figura 22. Mapa da Temperatura de brilho do canal 10.8 do MSG para Alagoas no horário de 15:15 UTC para o dia 29 de janeiro de 2016.

Para a diferença de temperatura de brilho entre os canais 8.7 e 10.8 do MSG (Figura 23), nota-se grande concentração de pixels com valores maiores que -0,5K nas regiões onde ocorreram os relâmpagos, e entre Coruripe e São Miguel dos Campos são observados valores até positivos, desta forma, há formação de gelo no topo das nuvens nesta região, apesar de não ocorrer nenhuma descarga, é destacável o fato desta região apresentar nuvens com topos frios, formação de gelo e grande desenvolvimento vertical.

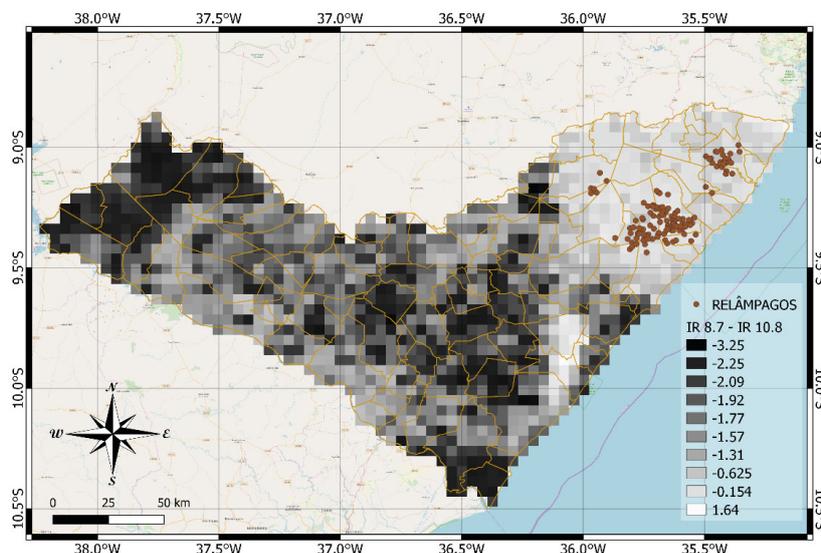


Figura 23. Mapa da diferença de Temperatura de brilho entre o canal 8.7 e 10.8 do MSG para Alagoas

no horário de 15:15 UTC para o dia 29 de janeiro de 2016.

Conclusões

O desenvolvimento vertical das nuvens analisadas através da diferença entre o canal 6.2 e 10.8 tiveram repostas significativas quanto as nuvens geradoras de relâmpagos, corroborando com resultados de Machado *et al.* (2007), porém através dos resultados deste trabalho é possível adaptar, para o estado de Alagoas, o limiar de -15 K proposto, para valores maiores que -5 K que se mostraram mais representativos nos casos aqui analisados. Já para o limiar de temperatura de brilho do canal 10.8 do MSG proposto por Da Silva Neto, Barbosa, Beneti (2016) não se mostrou tão significativo já que os valores das nuvens geradoras de relâmpagos estiveram concentrados a partir de 240 K e não de 233 K. Para a diferença de temperatura de brilho do canal 8.7 e 10.8 em Alagoas foi notório que não só valores acima de 0 K, como proposto por Matthee e Mecikalski (2013), mas sim, valores próximos deste limiar que foram mais característicos nas nuvens geradoras de relâmpagos analisadas

A melhor característica aqui analisada que representou a diferença entre as nuvens geradoras e as não geradoras foi o desenvolvimento vertical das nuvens observadas através da diferença entre o canal de vapor d'água 6.2 e do Infravermelho 10.8. Foi possível observar que apesar das nuvens não geradoras serem convectivas, não tinham tanto desenvolvimento quanto as que eram geradoras. Desta forma a profundidade de convecção se mostrou uma característica forte para identificação de nuvens geradoras de descargas elétricas atmosféricas para o estado de Alagoas.

Quanto a presença ou formação de gelo das nuvens, notou-se que as descargas ocorreram em nuvens que possuíam não só gelo em seu topo, mas também água super-resfriada e que quanto maior a quantidade de gelo em relação a água super resfriadas (Valores positivos mais distante de 0 K da diferença entre os canais do infravermelho 8.7 e 10.8), decresce o potencial desta nuvem ser geradora de relâmpago. Apesar disto não houve uma diferença clara, quanto apenas este fator, entre as nuvens geradoras e não geradoras, já que o topo das nuvens convectivas em que não houveram descargas também possuíam formação de gelo.

Já no estudo de caso feito para o dia 29 de janeiro de 2016, mostrou que a nebulosidade geradora de descargas elétricas possuía todas as características encontradas neste estudo, porém uma nebulosidade entre os municípios de Coruripe e São Miguel dos Campos também possuía, mas não houve descargas. O fator característico da diferença entre essas nebulosidades foi sua extensão, conseqüentemente também a densidade de pixel com valores dentro dos limiares aqui encontrados. Desta maneira o diâmetro da nebulosidade com valores característicos de nuvem geradoras de relâmpago pode vir a ser um outro fator a ser levado em consideração.

Os resultados aqui encontrados podem auxiliar o desenvolvimento de ferramentas, assim como suporte para análise e monitoramento de nuvens que tenham potencial de serem geradoras de relâmpagos no estado de Alagoas e que representam um risco a sociedade de forma geral, seja por dano de vida ou econômico.

Referências

BRITO, B. M. de *et al.* Análise do comportamento das trovoadas no estado de Alagoas, previsão à curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 243-256, jun. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862011000200009&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 29 abr. 2020.

- COOPER, M. A.; HOLLE, R. L. **Reducing lightning injuries worldwide**. EUA: Springer International Publishing, 2019.
- CORDEIRO, E. S. **Análise sinótica dos eventos com trovoadas para o estado de Alagoas dentre o período de 15 anos (1998-2012)**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.
- DA SILVA NETO, Carlos Pinto; BARBOSA, Humberto Alves; BENETI, Cesar Augustus Assis. A method for convective storm detection using satellite data. **Atmosfera**, v. 29, n. 4, p. 343-358, 2016.
- DOWDEN, R. L.; BRUNDELL, J. B. Improvements relating to the location of lightning discharges. **Australia Patent**, v. 749713, p. 200071483, nov. 2000.
- DOWDEN, R. L.; BRUNDELL, J. B.; RODGER, C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Nova Zelândia, v. 64, n. 7, p. 817-830, 2002.
- EKSTEEN, S.; BREETZKE, G. D. Predicting the abundance of African horse sickness vectors in South Africa using GIS and artificial neural networks. **South African Journal of Science**, Africa do Sul, v. 107, n. 7-8, p. 20-28, jul. 2011.
- FEDOROVA, N. **Sinótica I: fenômenos atmosféricos dados sinóticos e massas de ar**. Maceió: EDUFAL, 2008.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população**. 2017. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_TCU_2017_20190919.pdf. Acesso em: 01 fev. 2019.
- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclone vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, São Paulo, n. 33, p. 538-551, fev. 1981.
- LANG, T. J. *et al.* WMO world record lightning extremes: longest reported flash distance and longest reported flash duration. **Bulletin of the American Meteorological Society**, EUA, v. 98, n. 6, p. 1153-1168, jun. 2017.
- MACHADO, Luiz A. T. *et al.* Relationship between cloud-ground lightning and penetrative clouds: a multi-channel satellite application. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2007. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.13.17.25/doc/v1.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.
- MAGNUM. **A História do Python**, 2014. Disponível em: <http://mindbending.org/pt/a-historia-do-python>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- MATTHEE, R.; MECIKALSKI, J. R. Geostationary infrared methods for detecting lightning-producing cumulonimbus clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Washington, v. 118, n. 12, p. 6580-6592, jun. 2013.
- MCMAHON, B. *et al.* An Observation of Very Low Frequency (VLF) Electromagnetic Waves Generated by Lightning Strikes via RockSat-X. In: PROCEEDINGS OF THE WISCONSIN SPACE CONFERENCE, 2016, Wisconsin. **Proceedings** [...]. Wisconsin: Carthage College, 2016. p. 1-7.
- MECIKALSKI, J. R. *et al.* Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by Meteosat Second Generation. Part I: Infrared fields. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Alabama, v. 49, n. 3, p. 521-534, mar. 2010.
- R CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 01 ago. 2018.
- RODGER, C. J. *et al.* Growing detection efficiency of the world wide lightning location network. In: CONFERENCE PROCEEDINGS AIP, 2009. Nova York, **Proceedings** [...]. Nova York, American Institute of Physics, 2009. p. 15-20.
- RODRIGUES, L.R.L.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. CavadosbáricosatuantesnoEstadodeAlagoas

e fenômenos adversos associados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14., 2006a. Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://www.cbmet.org.br/cbm-files/14-c33ac63b37ca05927dc7a8c45998330b.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2020.

RODRIGUES, L. R. L.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Trovoadas na costa leste do nordeste do Brasil associadas a interação entre ondas nos ventos de leste e VCAN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14, 2006b. Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis, 2006.

RUDLOSKY, S. D.; SHEA, D. T. Evaluating WLLN performance relative to TRMM/LIS. **Geophysical Research Letters**, EUA, v. 40, n. 10, p. 2344-2348, maio, 2013.

SCHMETZ, J. et al. An introduction to Meteosat second generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, EUA, v. 83, n. 7, p. 977-992, jun. 2002.

SCHMETZ, J. et al. 1997: Monitoring deep convection and convective overshooting. **Adv. Space Res.**, v. 19, n. 3, p. 433-441, 1997.

SILVA, B. F. P. da et al. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 323-338, set. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862011000300001&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 29 abr. 2020.

TARAVAT, A. et al. Multilayer perceptron neural networks model for meteosat second generation SEVIRI daytime cloud masking. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1529-1539, fev. 2015.

ZHANG, W.; ZHANG, Y.; ZHOU, X. Lightning activity and precipitation characteristics of Typhoon Molave (2009) around its landfall. **Acta Meteorologica Sinica**, v. 27, n. 5, p. 742-757, oct. 2014.

