



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.04.19.15-TDI

ANÁLISE DE PADRÕES DE VARIABILIDADE DO CAMPO ELETROSTÁTICO ATMOSFÉRICO ASSOCIADOS A SISTEMAS CONVECTIVOS

Jéssica Lisandra dos Reis

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Kleber Pinheiro Naccarato, e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 26 de maio de 2023.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49D8PDL>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49D8PDL)

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.04.19.15-TDI

ANÁLISE DE PADRÕES DE VARIABILIDADE DO CAMPO ELETROSTÁTICO ATMOSFÉRICO ASSOCIADOS A SISTEMAS CONVECTIVOS

Jéssica Lisandra dos Reis

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Kleber Pinheiro Naccarato, e Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 26 de maio de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49D8PDL>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Reis, Jéssica Lisandra dos.

R277a Análise de padrões de variabilidade do campo eletrostático atmosférico associados a sistemas convectivos / Jéssica Lisandra dos Reis. – São José dos Campos : INPE, 2023.
xxi + 112 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/07.04.19.15-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadores : Drs. Kleber Pinheiro Naccarato, e Luiz Augusto Toledo Machado.

1. Sistemas convectivos. 2. Campo eletrostático atmosférico.
3. Funções Ortogonais Empíricas. 4. Electric-field Mill. I.Título.

CDU 551.511:537.2



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE TESE DE JÉSSICA LISANDRA DOS REIS
REG. 133620/2017, BANCA Nº 113/2023**

No dia 26 de maio de 2023, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Novo Título: Análise de padrões de variabilidade do campo eletrostático atmosférico associados a sistemas convectivos

Observações da banca: A aluna deverá incorporar todas as correções sugeridas pela banca no prazo estabelecido pelo regimento.

Membros da banca:

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba – Presidente – INPE

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato – Orientador – INPE

Dr. Luiz Augusto Toledo Machado – Orientador – INPE

Dr. Alisson Dal Lago – Membro Interno - INPE

Dr. Ana Paula Paes dos Santos – Membro Externo – ITV/Instituto Tecnológico Vale

Dr. Vinicius Banda Sperling – Membro Externo – CEMTEC



Documento assinado eletronicamente por **Alisson Dal Lago, Pesquisador**, em 31/05/2023, às 14:24 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Magalhães Fares Saba, Pesquisador**, em 31/05/2023, às 16:34 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Pinheiro Naccarato, Pesquisador**, em 31/05/2023, às 17:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Banda sperling (E), Usuário Externo**, em 01/06/2023, às 16:37 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO (E)**, **Usuário Externo**, em 02/06/2023, às 18:52 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula Paes dos Santos (E)**, **Usuário Externo**, em 13/06/2023, às 12:52 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11086910** e o código CRC **C149B0F5**.

Referência: Processo nº 01340.004268/2023-27

SEI nº 11086910

Aos meus pais (in memoriam)...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus, pois sem Ele não seríamos nada. Aos meu pais (*in memoriam*) que me apoiaram em toda vida acadêmica.

Ao meu esposo Lucas Rocha pelo apoio, incentivo e por acreditar que eu chegaria até aqui. A minha filha Sofia por recarregar a minha energia. Aos meus irmãos por todo apoio nessa jornada. Aos colegas e professores do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), que me ajudaram durante todo o Doutorado.

Aos meus orientadores Dr. Kleber Pinheiro Naccarato e Dr. Luiz Augusto Toledo Machado pela paciência, dedicação e ensinamentos durante o trabalho.

Aos membros da banca, e aos demais professores do curso que me incentivaram durante a caminhada acadêmica.

À pós-graduação do INPE, CAPES e CNPq pelo apoio e pela bolsa, permitindo que a conclusão deste trabalho fosse possível.

Ao grupo do Projeto SOS Chuva, liderado pelo Dr. Luiz Augusto Toledo Machado, pela disponibilização dos dados desta tese.

A todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

E hoje posso dizer “Até aqui nos ajudou o Senhor” (I Sam. 7:12).

RESUMO

Uma forma simples e de baixo custo para detectar um sistema convectivo e sua severidade é medindo o campo eletrostático atmosférico local utilizando sensores conhecidos como electric-field mills (EFM). O monitoramento de sistemas convectivos por meio das medições de sensores EFM permite identificar previamente a aproximação ou formação de um sistema convectivo com potencial de gerar descargas atmosféricas. Este trabalho teve como objetivo principal identificar padrões na variabilidade espacial do campo elétrico atmosférico na superfície produzidos por sistemas convectivos isolados e multicelulares. Para identificar esses padrões, dados interpolados de campo elétrico atmosférico obtidos a partir de uma rede com sete sensores EFM foram analisados em conjunto com dados de radar e descargas atmosféricas utilizando-se a técnica matemática chamada de função ortogonal empírica (EOF, sigla em inglês), a qual permitiu identificar a variabilidade espacial e temporal do campo elétrico atmosférico para determinados sistemas convectivos. Esse trabalho utilizou os dados produzidos pelo Projeto SOS-CHUVA, no período de dezembro de 2016 a junho de 2018. Como principal resultado, observou-se que os quatro primeiros modos da EOF representaram, em média, 84,4% da variação do campo elétrico atmosférico produzido por sistemas convectivos isolados e multicelulares. Apesar dos quatro primeiros modos da EOF serem os mais significativos, em nenhum caso se representou 100% da variabilidade espacial dos dados. Independentemente da incidência ou não de descargas atmosféricas ou da estação seca ou chuvosa, os sistemas convectivos isolados apresentaram um padrão concêntrico (linhas fechadas circulares) de campo elétrico no centro da rede, caracterizado por elevado gradiente e abrangendo uma área de aproximadamente 100km x 100km. Já para os sistemas convectivos multicelulares, independentemente da incidência de descargas atmosféricas, o padrão do campo elétrico atmosférico apresentou-se mais complexo, estendendo-se por uma área de aproximadamente 150km x 150km. Analisando-se os sistemas convectivos

multicelulares nas estações chuvosa e a seca, de forma geral, não se observou um padrão predominante, uma vez que cada modo apresentou um padrão espacial distinto. Isso demonstrou que a dinâmica desses sistemas é muito mais complexa, o que dificulta a identificação de padrões de campo elétrico atmosférico. Este trabalho apresentou, pela primeira vez, um estudo mais aprofundado sobre o comportamento espacial do campo elétrico atmosférico gerado por sistemas convectivos, no entanto, ainda há a necessidade de realizar estudos adicionais considerando outras variáveis meteorológicas, bem como um número maior de casos.

Palavras-chave: Sistemas Convectivos, Campo eletrostático atmosférico, Funções Ortogonais Empíricas, *Electric-field Mill*.

ANALYSIS OF VARIABILITY PATTERNS IN THE ATMOSPHERIC ELECTROSTATIC FIELD ASSOCIATED WITH CONVECTIVE SYSTEMS

ABSTRACT

A simple and cost-effective way to detect convective systems and its severity is by measuring the local atmospheric electrostatic field using sensors known as electric-field mills (EFM). Monitoring convective systems using EFM sensors allows to identify in advance the approximation or formation of a convective system with the potential to generate lightning. The main objective of this thesis was to identify patterns and behaviors in the spatial and temporal variability of the atmospheric electric field on the surface, associating them with isolated and multicellular convective systems. To identify these patterns, interpolated atmospheric electric field data obtained from a network with seven EFM sensors were analyzed in conjunction with radar data and atmosphere discharges using the mathematical technique called empirical orthogonal function (EOF), which allowed to identify the spatial and temporal variability of the atmosphere electric field for certain convective systems. This work used the data produced by the SOS-CHUVA Project in the period from December 2016 to June 2018. As the main result, it was observed that the first four EOF modes accounted for an average of 84.4% of the variation in the atmospheric electric field produced by isolated and multicellular convective systems. Although the first four EOF modes are the most significant, they did not represent 100% of the spatial variability of the data. Regardless of the incidence or non-incidence of atmospheric discharges or the dry or rainy season, the isolated convective systems presented a concentric pattern (circular closed lines) of electrical field in the center of the grid, characterized by high gradient and covering an area of approximately 100km x 100km. For multicellular convective systems, regardless of the incidence of discharges, the pattern of the atmospheric electric field has been more complex, extending over an area of approximately 150km x 150km. Analyzing multicellular convective systems in rainy and drought seasons in

general, a predominant pattern was not observed, since each mode presented a distinct spatial pattern. This demonstrated that the dynamics of these systems are much more complex, which makes it difficult to identify patterns of atmospheric electric field. This work presented, for the first time, a more in-depth study of the spatial behavior of the atmospheric electric field generated by convective systems, however, there is still a need to carry out additional studies considering other meteorological variables, as well as a larger number of cases.

Keywords: Convective Systems, Atmospheric Electrostatic Field, Empirical Orthogonal Functions, Electric-field Mill.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Circuito elétrico simplificado.....	5
2.2 Desenvolvimento da nuvem de tempestade: a) estágio de desenvolvimento, (b) estágio de maturação e (c) estágio de dissipação.....	7
2.3 Corte vertical de uma LI clássica. As setas indicam o escoamento. As áreas sombreadas indicam grande concentração de hidrometeoros. As letras A e B indicam alta e baixa pressão, respectivamente.....	7
2.4 Modelo conceitual clássico de uma Supercélula.....	8
2.5 Modelo da estrutura elétrica da nuvem.....	9
2.6 Estrutura multipolar de uma nuvem de tempestade.....	10
2.7 Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem através do processo convectivo e a subsequente intensificação da eletrificação como resultado da descarga corona a partir do solo.....	12
2.8 Um grão de gelo esférico polariza-se na presença de um campo elétrico ambiente. Partículas de gelo que venham a colidir com a parte de baixo do grão removem suas cargas positivas, tornando-a negativamente carregada.....	14
2.9 Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre grãos degelo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente.....	16
2.10 Polaridade das descargas que tocam o solo. (a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN negativo e (d) SN positivo.....	21
3.1 Localização dos 7 sensores EFM (marcador amarelo). Círculos vermelhos: raio de 20 km de cobertura dos sensores de campo elétrico atmosférico. Círculo azul: raio de 60 km de cobertura do radar dentro da rede EFM.....	23
3.2 Funcionamento do sensor EFM.....	25
3.3 Seleção de local para instalação do sensor EFM.....	27

3.4	Sensor EFM (CS110) instalado pelo projeto SOS-Chuva em Campinas. Círculo vermelho mostra o sensor EFM instalado a estação meteorológica.....	28
3.5	Medições do campo elétrico atmosférico e distâncias para as descargas atmosféricas de um sensor da rede integrada de sensores EFM em São José dos Campos.....	29
3.6	Ilustração com o princípio de funcionamento do radar.....	31
3.7	Produto CAPPI do Radar de São Roque/SP.....	33
3.8	Localização dos 7 sensores de EFM (marcador azul), sensores de LMA (marcador vermelho) e área de abrangência do Radar São Roque (círculo vermelho).....	34
3.9	Saída do FortraCC.....	34
3.10	Localização dos sensores da BrasilDAT.....	36
3.11	Teste de Sensibilidade para um caso de tempestade isolada no dia 25 de dezembro de 2016.....	42
3.12	Teste de Sensibilidade para um caso de tempestade multicelular no dia 25 de dezembro de 2016.....	44
4.1	Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 12:20 UTC às 13:00 UTC). Na coluna da direita recortes da imagens de radar referente a área da rede EFM para o dia 18/05/2017, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.....	53
4.2	Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 21:00 UTC às 23:55 UTC), descargas atmosféricas sobrepostos em pontos na cor branca. Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 27/12/2016, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.....	56
4.3	Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 00:00 UTC às 01:30 UTC). Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 31/03/2018, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.....	61

4.4	Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 00:00 UTC às 05:00 UTC), descargas atmosféricas sobrepostos em pontos na cor branca. Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 18/02/2017, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.....	63
4.5	EOF para os casos de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas.....	70
4.6	EOF para os casos de sistemas convectivos isolados com incidência de descargas atmosféricas.....	71
4.7	EOF para os casos de sistemas convectivos multicelular sem incidência de descargas atmosféricas.....	74
4.8	EOF para os casos de sistemas convectivos multicelular com incidência de descargas atmosféricas.....	75
4.9	EOF para os casos de taxa baixa de descargas atmosféricas.....	78
4.10	EOF para os casos de taxa média/alta de descargas atmosféricas....	79
4.11	EOF para os casos sem incidência de descargas atmosféricas.....	80
4.12	EOF dos casos na estação chuvosa sem incidência de descargas atmosféricas.....	82
4.13	EOF dos casos na estação chuvosa com incidência de descargas atmosféricas.....	83
4.14	EOF dos casos na estação seca sem incidência de descargas atmosféricas.....	85
4.15	EOF dos casos na estação seca com incidência de descargas atmosféricas.....	86

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Resultado do fator peso (E) de acordo com o raio de Influência (R)	41
4.1 Quantidade de casos de Sistemas Convectivos sem e com incidência de descargas atmosféricas.....	52

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Circuito elétrico global-CEAG.....	4
2.2 Sistemas Convectivos.....	5
2.2.1 Estrutura elétrica da nuvem de tempestade.....	8
2.2.2 Processos de eletrificação da nuvem de tempestade.....	11
2.2.2.1 Processo convectivo.....	11
2.2.2.2 Processo colisional indutivo.....	13
2.2.2.3 Processo colisional não indutivo.....	14
2.2.3 Campo eletrostático atmosférico em nuvens de tempestade.....	16
2.3 Descargas atmosféricas.....	18
3. DADOS E MÉTODOS.....	22
3.1 Dados.....	22
3.1.1 Campo eletrostático atmosférico.....	22
3.1.1.1 Detecção do campo eletrostático atmosférico.....	24
3.1.2 Imagens de radar meteorológico.....	29
3.1.2.1 Forecast and tracking of convective clouds (FortraCC).....	34
3.1.3 Dados de descargas atmosféricas.....	35
3.2 Métodos.....	37
3.2.1 Interpolação dos dados de campo eletrostático atmosférico	37
3.2.2 Análise de funções ortogonais empíricas	47
3.2.2.1 Aplicação da EOF.....	49
4. RESULTADOS.....	52
4.1 Análise dos Sistemas Convectivos Isolados e Multicelular.....	52
4.1.1 Sistema Convectivo Isolado sem descarga atmosférica e com descarga atmosférica.....	53

4.1.2 Sistema Convectivo Multicelular sem descarga atmosférica e com descarga atmosférica.....	61
4.2 Análise do Campo Elétrico utilizando a EOF.....	68
4.2.1 Análise da EOF para Sistema Convectivo Isolado e Multicelular sem e com incidência de descarga atmosférica.....	68
4.2.2 Análise da EOF para diferentes taxas de descarga atmosférica.....	75
4.2.3 Análise estação chuvosa e seca do Campo elétrico utilizando a EOF...	80
5. CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÊNDICE A - SISTEMAS CONVECTIVOS ISOLADOS.....	97
APÊNDICE B - SISTEMAS CONVECTIVOS MULTICELULAR	101

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, ocorrem eventos meteorológicos intensos que são responsáveis por desastres. O conhecimento e a capacidade de prever esses eventos são fundamentais para a sociedade como um todo (ZHU et al., 2002). O monitoramento de sistemas convectivos tem como objetivo reduzir o impacto desses desastres.

Os eventos meteorológicos que podem causar danos à sociedade ocorrem devido à ocorrência de sistemas convectivos. Esses sistemas podem ocorrer de forma isolada, como uma única célula convectiva, ou de forma multicelular, com o agrupamento de células convectivas. Esses sistemas são caracterizados por nuvens Cumulonimbus (Cb) que acumulam cargas elétricas capazes de produzir descargas atmosféricas. Além disso, essas nuvens são caracterizadas por correntes de ar ascendentes e descendentes intensas, turbulência, rajadas de vento, precipitação intensa e granizo (WALLACE, HOBBS; 2006). Elas são comumente conhecidas como tempestades.

Quando ocorrem as tempestades, o campo elétrico presente na atmosfera apresenta grandes variações, devido à formação de cargas elétricas nas nuvens. Os processos dinâmicos da formação de uma nuvem de tempestade resultam na separação de cargas elétricas dentro da nuvem. O campo elétrico gerado por essas cargas armazenadas em gotículas de água e cristais de gelo é responsável pela geração das descargas atmosféricas (RAKOV, 2016).

A ocorrência de descargas atmosféricas afeta a aviação, sistemas de telecomunicações, sistemas de distribuição de energia, entre outros setores. Por esse motivo, as informações sobre descargas atmosféricas são de grande importância. Hoje em dia, existem sistemas de localização de descargas atmosféricas (LLS) que disponibilizam informações em tempo real (POELMAN, 2010; NAG et al., 2015). Do ponto de vista meteorológico, o uso desses sistemas serve para rastrear as regiões de atividade das tempestades e

fornecer informações valiosas sobre a instabilidade das massas de ar, bem como a localização e o movimento das frentes.

Outro método para detectar a formação e/ou aproximação de um sistema convectivo com potencial para desenvolver descargas atmosféricas é o método de medição do campo eletrostático atmosférico (FERRO et al., 2010; FERRO et al., 2012; MAGINA, 2016). Os sensores de campo elétrico atmosférico, conhecidos como EFM (electric-field mill, em inglês), são dispositivos mais simples e de custo bem inferior em comparação aos sistemas de detecção de descargas atmosféricas. Esses sensores realizam medições precisas até 20 km de distância do local onde estão instalados. Esse tipo de sensor tem o potencial único de fornecer um aviso prévio da primeira ocorrência de descarga de um sistema convectivo em desenvolvimento. Essa capacidade torna esses sistemas particularmente interessantes para aplicações em que o tempo de resposta é crítico, como parques, campos de futebol e arenas de shows ao ar livre, onde seria demorado retirar as pessoas do local.

Há muitas pesquisas sendo conduzidas com o uso de sensores de campo elétrico. Estudos realizados por Igarashi et al. (2011), Ferro et al. (2011), Srivastava et al. (2015) e Costa et al. (2014) têm se dedicado à emissão de alertas de descargas atmosféricas utilizando esses sensores de campo elétrico. Vários sistemas de alerta de descargas já foram desenvolvidos com base em medições realizadas por sensores de campo elétrico atmosférico (MURPHY et al., 2008; ARANGUREN et al., 2005; MONTABYÀ et al., 2004; SIDIK et al., 2014). Ferro et al. (2011) e Costa et al. (2014) investigaram diferentes limiares de campo elétrico, comparando os dados com as descargas atmosféricas detectadas por redes de sensores de monitoramento na superfície.

Outros estudos foram realizados para avaliar a efetividade dos sensores de campo elétrico em emitir alertas (NACCARATO et al., 2008; ARANGUREN et al., 2011; FERRO et al., 2012; LÓPEZ et al., 2012). Magina (2016) avaliou a efetividade dos alertas com base nas medições espacialmente interpoladas. Os resultados mostraram uma excelente resposta na aplicação desse método,

com altos valores para os índices estatísticos de alarmes efetivos e baixos índices de alarmes falsos e não reportados, quando comparados com as avaliações encontradas na literatura para sistemas baseados em medições pontuais. Em Tao et al. (2016), os autores observaram que as medidas tradicionais dos sistemas de localização de descargas atmosféricas são deficientes, comprometendo o suporte à tomada de decisão para interromper trabalhos em uma área monitorada. Os autores detalharam os experimentos ao adotar o campo elétrico atmosférico para a geração de alertas de descargas atmosféricas. Yang et al. (2021) desenvolveram um método de rastreamento de nuvem de tempestade utilizando um aparelho tridimensional de campo elétrico atmosférico.

O monitoramento de sistemas convectivos por meio das medições de sensores EFM permite buscar uma melhor compreensão das assinaturas e padrões do comportamento do campo elétrico dos sistemas convectivos. Dessa forma, essa tese teve como objetivo principal identificar padrões e comportamentos na variabilidade espacial e temporal do campo elétrico atmosférico na superfície, associando-os a sistemas convectivos isolados e multicelulares, além de investigar o comportamento do campo elétrico antes da ocorrência da primeira descarga atmosférica. Este será o primeiro estudo a utilizar uma rede interpolada para obter uma assinatura do campo elétrico para diferentes sistemas convectivos, assim como uma assinatura do campo elétrico prévio à ocorrência das descargas atmosféricas. Para identificar esses padrões, foram realizados testes de sensibilidade na interpolação dos sensores EFM, análise dos dados de campo elétrico atmosférico em conjunto com dados de radar e descargas atmosféricas, e, por fim, aplicação da função ortogonal empírica para analisar a variabilidade espacial e temporal do campo elétrico atmosférico nos sistemas convectivos. Esse trabalho utilizou os dados obtidos pelo Projeto SOS-CHUVA, no período de dezembro de 2016 a junho de 2018.

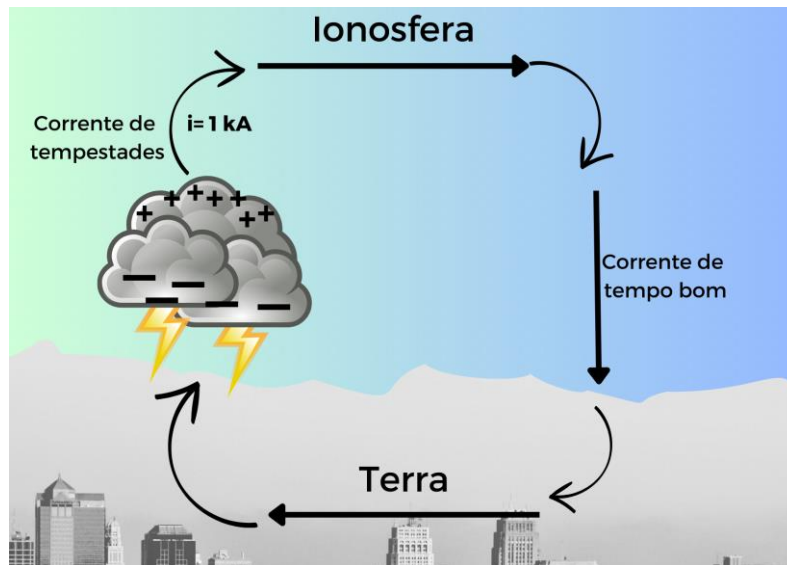
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Circuito Elétrico Atmosférico Global – CEAG

O Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG) baseia-se em um grande circuito elétrico, visualizado como um capacitor esférico, cujas camadas externa e interna são a ionosfera e a superfície da Terra, respectivamente. O conceito do CEAG é ilustrado na Figura 2.1. De acordo com esse modelo, a superfície da Terra está carregada negativamente, com uma carga total de magnitude aproximadamente igual a 5×10^5 C, enquanto uma quantidade igual de carga positiva está distribuída por toda a atmosfera. Como a atmosfera entre as "camadas" do capacitor é fracamente condutora, há uma corrente da ordem de 1 kA entre as camadas, que neutralizaria a carga na Terra e na atmosfera em aproximadamente 10 minutos, se não houvesse um mecanismo de carregamento para repor a carga neutralizada (RAKOV, 2016).

Como o capacitor permanece carregado, é necessário que exista, portanto, um ou mais mecanismos que sustentem essa carga. Wilson (1920) sugeriu que a carga negativa na Terra é mantida pela ação das tempestades. Assim, em média, a qualquer momento, cerca de 2.000 tempestades estão ocorrendo em aproximadamente 10% da superfície da Terra, constituindo o gerador global, enquanto as regiões de tempo bom ocorrem em cerca de 90% do globo (RAKOV, 2016). Assume-se que correntes fluem livremente ao longo da superfície altamente condutora da Terra e na ionosfera. A corrente total da ordem de 1 kA é produzida pelo gerador. A carga negativa é trazida para a Terra principalmente por meio de descargas atmosféricas, a maioria das quais transporta carga negativa para o solo, e pela corrente de corona sob as nuvens de tempestade (RAKOV, 2016).

Figura 2.1 - Circuito elétrico global simplificado.



O campo elétrico atmosférico é um parâmetro sensível às condições meteorológicas locais e às variações climáticas. Em um dia comum, o potencial elétrico aumenta 100 V/m à medida que nos afastamos da superfície. Isso indica a existência de um campo elétrico de 100 V/m no ar, que diminui com a altitude. A partir de 50 km de altitude, o campo já se torna muito pequeno. As maiores variações ocorrem em altitudes baixas. A diferença total de potencial da superfície ao topo da atmosfera pode chegar a 400 kV (RYCROFT et al., 2000).

2.2 Sistemas convectivos

Sistemas convectivos são fenômenos meteorológicos caracterizados pelo movimento vertical do ar na atmosfera. Esses sistemas desempenham um papel fundamental no transporte de calor, umidade e energia, influenciando a formação de nuvens, tempestades e outras condições climáticas. A convecção ocorre quando o ar quente, menos denso, sobe, enquanto o ar mais frio, mais denso, desce. Esse movimento vertical é impulsionado pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, sendo que áreas aquecidas, como regiões tropicais, tendem a gerar correntes ascendentes de ar. À medida que o ar

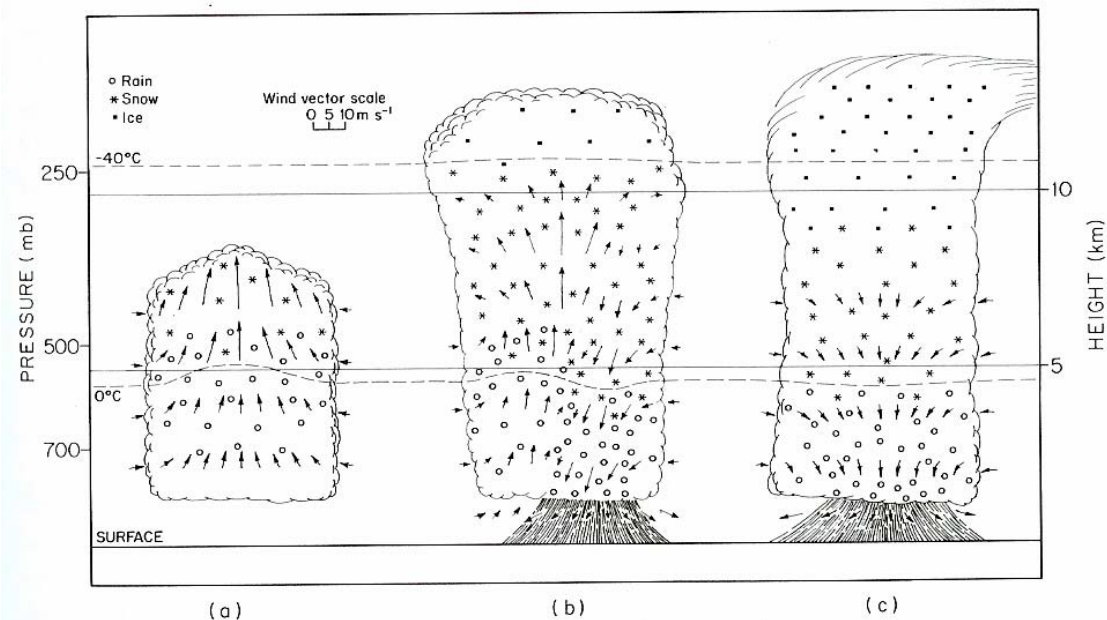
ascendente se eleva, resfria-se e pode formar nuvens, resultando em sistemas convectivos (COTTON, ANDES; 1989). Os sistemas convectivos podem apresentar variações em escala e intensidade, podendo resultar em chuvas intensas, trovoadas, ventos fortes, granizo e, em casos extremos, até mesmo tornados (HOUZE, 2004). O monitoramento e estudo desses sistemas são fundamentais para a sua previsão, possibilitando a adoção de medidas de segurança e a mitigação dos riscos associados a esses eventos meteorológicos.

Existem diferentes tipos de sistemas convectivos na atmosfera. Alguns dos principais tipos são:

1. Sistemas Convectivos Isolados: são sistemas convectivos de pequena escala que se formam independentemente uns dos outros. Geralmente são células únicas, caracterizadas por uma coluna vertical de ar ascendente e descendente (Figura 2.2).
2. Sistemas Convectivos Multicelulares: são sistemas compostos por várias células convectivas interligadas. Podem abranger uma área extensa e ter uma duração mais longa do que as células convectivas isoladas. Dentro desse tipo estão os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e Linhas de Instabilidade (Figura 2.3).
3. Super Células: são tempestades de longa duração e grande intensidade, caracterizadas por um núcleo persistente de rotação chamado mesociclone e forte cisalhamento do vento (Figura 2.4). Podem produzir ventos fortes, granizo e tornados.

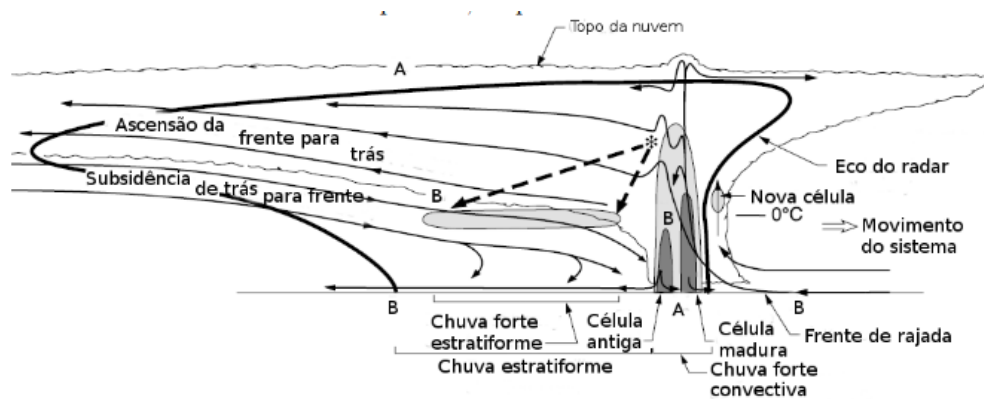
Esses são apenas alguns exemplos de sistemas convectivos atmosféricos. Cada tipo de sistema convectivo possui características distintas e pode gerar diferentes impactos meteorológicos (WALLACE; HOBBS, 2006). Quando um sistema convectivo gera descargas atmosféricas, utiliza-se o termo "tempestades".

Figura 2.2 - Desenvolvimento da nuvem de tempestade: a) estágio de desenvolvimento, (b) estágio de maturação e (c) estágio de dissipação.



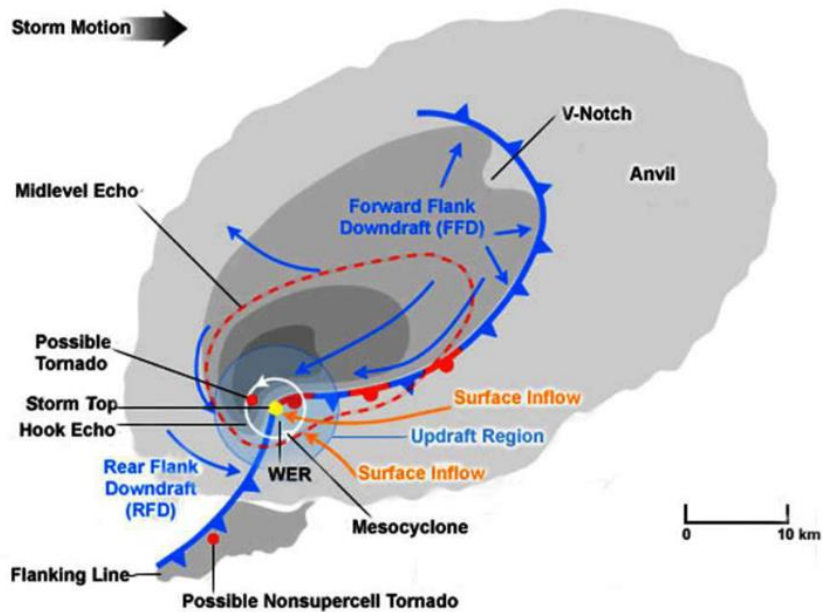
Fonte: Wallace e Hobbs (1977).

Figura 2.3 - Corte vertical de uma LI clássica. As setas indicam o escoamento. As áreas sombreadas indicam grande concentração de hidrometeoros. As letras A e B indicam alta e baixa pressão, respectivamente.



Fonte: Houze (1989).

Figura 2.4 - Modelo conceitual clássico de uma Supercélula.



Fonte: National Severe Storms Laboratory (NWS).

2.2.1 Estrutura elétrica da nuvem de tempestade

As nuvens de tempestade, conhecidas como Cumulonimbus (Cb), acumulam cargas elétricas e desempenham um papel importante na manutenção do CEAG (em particular, da carga do capacitor esférico formado pela superfície terrestre e a ionosfera). Esses tipos de nuvens são capazes de produzir descargas atmosféricas e são caracterizadas por fortes correntes de ar ascendente e descendente, turbulência, rajadas de vento, precipitação intensa e granizo (RAKOV, 2016).

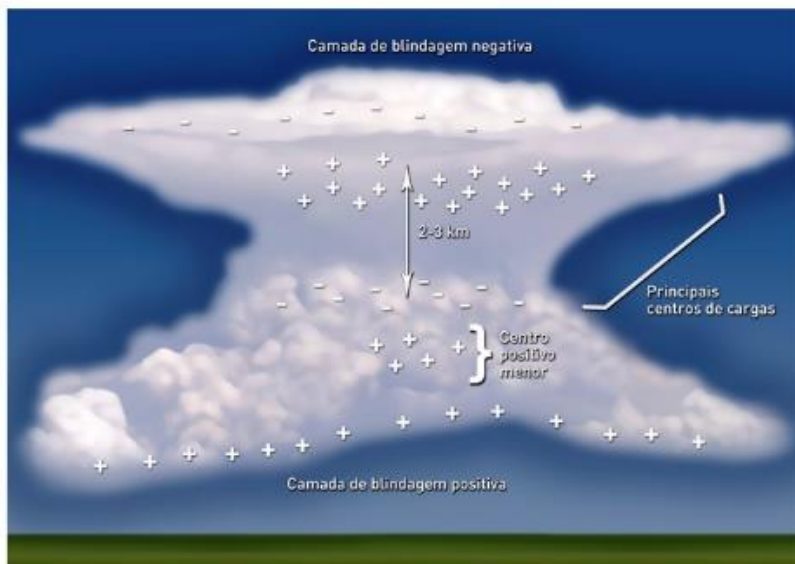
Os primeiros estudos da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade foram realizados por Benjamin Franklin no século XVIII. No início do século XX, o primeiro modelo proposto por ele foi aceito, com base em medições do campo elétrico e da carga presente nas partículas de chuva. Esse modelo descreve a nuvem como um dipolo elétrico, ou seja, composto por dois centros de carga: uma região carregada positivamente acima da nuvem e uma região carregada

negativamente na base (MACGORMAN; RUST et al., 1998).

No final da década de 1930, foi proposto um novo modelo para a estrutura elétrica das nuvens de tempestade. Esse modelo considerava uma estrutura tripolar, ou seja, três centros de carga eram considerados. Dois centros de carga positiva estavam localizados na parte superior e inferior da nuvem, enquanto um centro de carga negativa estava posicionado no meio da nuvem. O centro de carga positiva inferior era associado às cargas positivas provenientes do solo devido ao efeito corona (WILLIAMS, 1989).

Posteriormente, o modelo tripolar foi aprimorado, levando em consideração a existência de camadas finas de carga na base e no topo da nuvem. A camada superior é carregada negativamente, enquanto a camada inferior é carregada positivamente, sendo chamadas de camadas de blindagem (STOLZENBURG, MARSHALL, 2009). Essas camadas de blindagem são formadas pelo aprisionamento de íons da atmosfera e atuam protegendo a região externa da nuvem dos campos elétricos internos, conforme ilustrado na Figura 2.5.

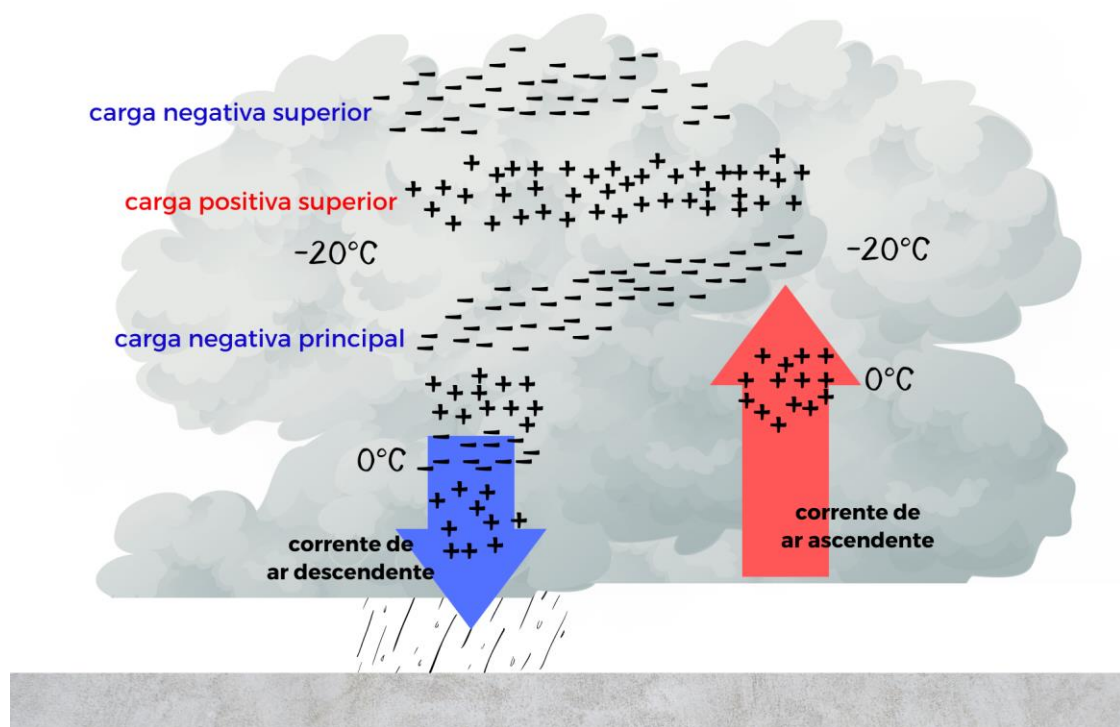
Figura 2.5 – Modelo da estrutura elétrica da nuvem.



Fonte: Adaptado de Pinto Júnior e Pinto (2000).

Foram realizados outros experimentos com o objetivo de aprimorar os modelos da estrutura elétrica das nuvens de tempestade. Através de experimentos com balões, observou-se que a estrutura elétrica é mais complexa do que o modelo tripolar, podendo ser caracterizada como uma estrutura multipolar (RAKOV, 2016). Esse modelo foi desenvolvido por um grupo de cientistas do NSSL (*National Severe Storms Laboratory*) (STOLZENBURG, MARSHALL, 2009). A Figura 2.6 apresenta o modelo da estrutura multipolar. É possível observar que na região de corrente ascendente (seta vermelha), existem quatro regiões de carga, enquanto na região de corrente descendente (seta azul), existem seis regiões de carga.

Figura 2.6 – Estrutura multipolar de uma nuvem de tempestade.



Fonte: Adaptado Stolzenburget al. (1998).

2.2.2 Processos de eletrificação da nuvem de tempestade

Os processos responsáveis pela eletrificação das tempestades ainda não são completamente compreendidos, mas algumas teorias foram sugeridas e estão documentadas na literatura (SAUNDERS et al., 1991; SAUNDERS, 1994; JAYARANTE, 2003; RAKOV, 2016). A complexidade desses processos decorre da interação entre processos microfísicos e microfísicos que ocorrem simultaneamente dentro da nuvem. Os processos microfísicos ocorrem em escala atômica (10^{-13}), enquanto os processos microfísicos ocorrem em escala mesoescalar (10^3) (KREHBIEL, 1986; UMAN, 1987; RAKOV, 2016).

A separação de cargas elétricas nas nuvens está relacionada à presença de partículas de água nos estados sólido e líquido. Em geral, as partículas dentro das nuvens estão expostas a temperaturas abaixo de 0°C , fazendo com que as partículas de gelo tenham destaque nos processos de eletrificação. Existem várias teorias que explicam a eletrificação de nuvens de tempestade, as quais podem ser divididas em dois grupos principais: aquelas em que a convecção desempenha um papel fundamental, transportando íons positivos para dentro da nuvem através de correntes ascendentes; e aquelas em que os hidrometeoros adquirem carga elétrica durante o processo de colisão. A teoria colisional também pode ser subdividida em dois grupos: indutiva, em que o campo elétrico ambiente desempenha um papel determinante no processo de eletrização; e não-indutiva, em que um campo elétrico externo não é necessário para explicar o processo de eletrificação (ALBRECHT et al., 2012). Detalhes sobre os processos de eletrificação podem ser encontrados em Naccarato (2002), Saunders (2006) e Rakov (2016).

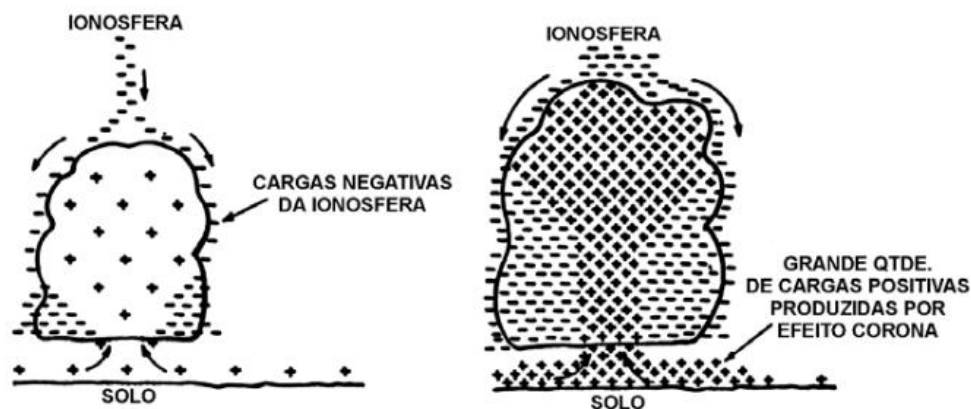
2.2.2.1 Processo convectivo

O processo de eletrificação convectivo ocorre em uma escala microfísica e está relacionado às correntes ascendentes e descendentes dentro das nuvens. Durante o crescimento de uma nuvem cumulus, as correntes ascendentes transportam íons positivos que estavam abaixo da base da nuvem para a parte superior da nuvem. Essas partículas positivas ficam aprisionadas em gotículas

de água no topo da nuvem e atraem cargas negativas presentes na tropopausa. As correntes descendentes, por sua vez, transportam as cargas negativas provenientes da alta atmosfera ao redor da nuvem de tempestade, formando uma camada de blindagem (Figura 2.7) (VONNEGUT, MOORE; 1963).

Nesse processo, ocorre uma mistura das cargas presentes tanto na parte externa quanto na interna da nuvem. As cargas negativas penetram na nuvem e se depositam nos níveis mais baixos, atraindo assim mais cargas positivas que se encontram abaixo da nuvem. Esse mecanismo de separação de cargas cria um campo elétrico dentro da nuvem, o qual pode resultar em descargas atmosféricas.

Figura 2.7 – Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem através do processo convectivo e a subsequente intensificação da eletrificação como resultado da descarga corona a partir do solo.



Fonte: Adaptado de Saunders (1995).

Embora haja evidências de que o processo convectivo realmente ocorra, ele apresenta algumas limitações. A convecção inicial de cargas positivas para dentro da base da nuvem ainda não é completamente compreendida. Não

existem evidências conclusivas de que a produção desses íons positivos por meio de raios cósmicos ou decaimento radioativo na baixa troposfera seja suficiente para eletrificar a nuvem de tempestade. Acredita-se que o processo de penetração de cargas positivas na base da nuvem seja excessivamente lento para contribuir significativamente para a eletrificação. Esse processo é incapaz de explicar os estágios iniciais da eletrificação das nuvens de tempestade. A maior limitação está exatamente na compreensão do início do processo, quando os campos elétricos ainda são fracos. Portanto, conclui-se que outros processos devem estar ocorrendo nos estágios iniciais da eletrificação para que sejam alcançados os altos campos elétricos registrados (VONNEGUT, 1991; NACCARATO, 2002; SAUNDERS, 2006; RAKOV, 2016).

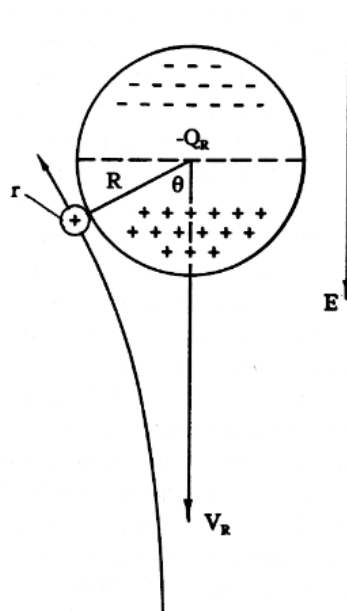
2.2.2.2 Processo colisional indutivo

O processo colisional indutivo ocorre em uma escala microfísica. Nesse processo, estão presentes dois mecanismos de eletrização das partículas nas nuvens: polarização e indução. Os estudos iniciais desse processo são baseados na polarização de partículas de diferentes tamanhos por meio da indução de um campo elétrico direcionado para baixo (REYNOLDS et al, 1957; TAKAHACHI, 1978; JAYARANTE et al., 1983; WILLIAMS, 1989).

Quando uma partícula menor colide na parte inferior de uma partícula maior, a partícula menor perde elétrons para a maior, que adquire carga positiva, ocorrendo, conseqüentemente, uma separação de cargas (Figura 2.8). Esse processo leva à intensificação do campo elétrico. No entanto, esse caso não se aplica a gotas de tamanhos diferentes, pois quando as gotas colidem, o campo elétrico promove a coalescência. Posteriormente, com base em experimentos laboratoriais, considerou-se a colisão de partículas de gelo. Quando um grão de gelo é submetido a um campo elétrico direcionado para a superfície, ocorre a polarização da partícula. Durante a queda dentro da nuvem, o grão de gelo colide com a parte inferior de um cristal de gelo, o que possibilita a transferência de cargas. No entanto, os resultados dos experimentos mostraram que essa transferência seria pouco eficiente pois o tempo de

contato entre as partículas de gelo era muito curto para que o campo elétrico pudesse movimentar as cargas do cristal para o grão de gelo (NACCARATO, 2002; SAUNDERS, 2006).

Figura 2.8 – Um grão de gelo esférico polariza-se na presença de um campo elétrico ambiente. Partículas de gelo que venham a colidir com a parte de baixo do grão removem suas cargas positivas, tornando-a negativamente carregada.



Fonte: Adaptado de Saunders (1995).

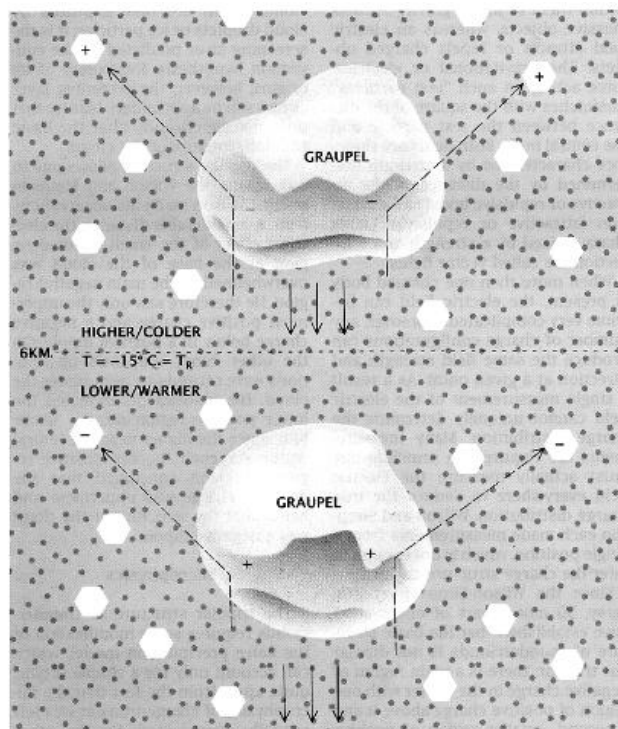
2.2.2.3 Processo colisional não-indutivo

No caso do processo colisional não indutivo, ocorre a colisão dos cristais, que crescem por deposição de vapor, com os grãos de gelo, formados por incrustação, levando em consideração a temperatura de inversão (TI) e a temperatura ambiente. O termo "não-indutivo" indica que os hidrometeoros não precisam ser polarizados pelo campo elétrico ambiente. Há um consenso de que esse mecanismo domina os processos de eletrificação (WILLIAMS, 1989).

Esse processo é resultado de sucessivos experimentos laboratoriais e dados obtidos a bordo de aeronaves. Os resultados desses experimentos demonstraram que as cargas separadas pela colisão de cristais de gelo com grãos de gelo esféricos eram capazes de explicar a eletrificação das tempestades, com a formação da estrutura tripolar. Novos experimentos também revelaram que a transferência de carga dependia da temperatura ambiente e da quantidade de água líquida disponível. Os resultados indicaram que, durante a colisão a temperatura do ambiente abaixo de -15°C , os cristais de gelo se carregavam negativamente, enquanto os grãos de gelo se carregavam positivamente. No entanto, quando a colisão ocorria a temperaturas do ambiente acima de -15°C , os cristais de gelo ficavam carregados positivamente e os grãos de gelo, negativamente (Figura 2.9).

Na década de 80, verificou-se que o sinal da carga transferida entre as partículas estava relacionado à temperatura do ambiente, com a temperatura de inversão aumentando à medida que a quantidade de água líquida diminuía. Além disso, observou-se que a quantidade de carga transferida era afetada pela velocidade de impacto e pelo tamanho dos cristais de gelo. Keith e Saunders (1990) conduziram experimentos adicionais, utilizando cristais de gelo maiores (com diâmetro de até $800\mu\text{m}$). Eles constataram que a quantidade de carga transferida aumentava proporcionalmente ao tamanho dos cristais, mas esse aumento era mais acentuado quando os cristais eram pequenos, tornando-se gradual para cristais maiores. A explicação para esse comportamento foi que as cargas transferidas eram limitadas pelas transferências inversas de algumas das cargas já existentes na superfície das partículas durante as colisões. Essas interações entre cristais e grãos no escuro revelaram emissões de luz associadas a essa transferência de cargas na forma de efeito corona. Com base nesses resultados, estimou-se a temperatura de inversão (TI) em aproximadamente -15°C , localizada a cerca de 6 km de altura. (NACCARATO, 2002; SAUNDERS, 2006).

Figura 2.9 – Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre grãos de gelo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente.



Fonte: Williams (1988, p. 92).

2.2.3 Campo elétrico atmosférico em nuvens de tempestade

Para estudar o campo eletrostático no interior e nas proximidades das nuvens de tempestade, considera-se que, em sua maioria, as nuvens de tempestade podem ser representadas por um tripolo, ou seja, composta por três centros de cargas alternados. A intensidade do campo elétrico devido ao sistema de três camadas é encontrada substituindo o solo perfeitamente condutor por três cargas imagens e usando o princípio da sobreposição. O campo elétrico total é a soma vetorial de seis contribuições (três das cargas reais e três de suas imagens). Em geral, uma alteração no campo elétrico é a diferença entre o valor final do campo elétrico (após a remoção de carga devido a descarga atmosférica) e o valor inicial do campo elétrico devido à distribuição original de carga da nuvem (RAKOV, 2016).

Quando uma carga é removida da nuvem, a mudança eletrostática no campo é o oposto da contribuição dessa carga para o campo elétrico inicial. Supondo que a carga negativa da nuvem seja completamente neutralizada devido a uma descarga para o solo, a mudança resultante no campo elétrico líquido será negativa em qualquer distância. Isso ocorre porque o campo elétrico (positivo) dirigido para cima devido à carga negativa desaparece, ou seja, se torna zero (RAKOV, 2016). Se tanto as cargas positivas principais quanto as cargas negativas principais forem neutralizadas por meio de uma descarga intra-nuvem, a mudança líquida resultante no campo, em relação à distância, exibirá uma inversão de polaridade.

Abaixo de uma nuvem de tempestade ativa, o campo elétrico na superfície normalmente se inverte em relação ao campo de tempo bom, ou seja, passa a ser direcionado para cima, com uma magnitude consideravelmente maior, variando de 1 a 10 kV/m em terrenos relativamente planos. O campo elétrico abaixo de uma nuvem de tempestade exibe variações rápidas conforme ocorrem as descargas atmosféricas, seguidas por oscilações mais lentas que indicam o fim da tempestade. Essa oscilação está associada a mudanças na estrutura elétrica da nuvem na fase de dissipação, que é provocada pela precipitação e neutralização das camadas de blindagem da nuvem. A presença desse campo elétrico resulta na geração de uma corrente corona fluindo de vários objetos localizados abaixo da nuvem. A nuvem de tempestade funciona como um gerador de corrente, onde os fenômenos de convecção, precipitação, efeito corona e descargas atmosféricas levam à formação de uma densidade de corrente que pode ser detectada a uma distância de até 15 km da nuvem. Seu valor máximo pode superar 16 nA/m², sendo mais intensa exatamente abaixo do centro de carga ativo da nuvem. Através do monitoramento contínuo da amplitude do campo elétrico é possível portanto detectar a presença da nuvem de tempestade.

2.3 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas podem ser definidas como descargas elétricas transitórias de alta corrente, tipicamente na faixa de dezenas de kA, que ocorrem no ar e cujo comprimento é medido em quilômetros. Assim como qualquer descarga no ar, o canal de um raio é composto por gás ionizado, ou seja, plasma, cuja temperatura máxima costuma ser de 30.000 K. Essa temperatura é cerca de cinco vezes maior do que a temperatura da superfície do Sol (RAKOV, 2016).

Entre 80 e 95% das descargas atmosféricas não envolvem o solo. Elas incluem descargas dentro das nuvens, entre as nuvens e do topo das nuvens para a atmosfera, sendo genericamente chamadas de descargas intra-nuvem (IN). As descargas atmosféricas que atingem o solo são chamadas genericamente de descargas nuvem-solo (NS) e representam entre 5 e 20% da atividade global (PINTO; PINTO, 2000).

Quando ocorre a quebra da rigidez dielétrica do ar, dentro da nuvem de tempestade, em função dos altos valores de campo elétrico, um canal ionizado altamente condutor se forma (DWYER; UMAN, 2014). Sob a influência do intenso campo elétrico ambiente, cargas positivas se acumulam na extremidade do canal ionizado, apontando na mesma direção do campo, enquanto as cargas negativas se acumulam na extremidade oposta (FERRO, 2008). As duas extremidades continuam se desenvolvendo, alongando o canal condutor e dando origem ao líder bipolar bidirecional. À medida que o líder positivo avança, o líder negativo se propaga em passos (escalonadamente) na direção oposta, podendo se manter dentro da nuvem ou avançar em direção ao solo. Nas pontas desses líderes negativos, há uma concentração de cargas negativas que, rompendo a rigidez dielétrica do ar, se propagam em várias ramificações até alcançar um centro de carga oposto na nuvem ou alguma estrutura na superfície ou a própria superfície (SABA et al., 2010).

As descargas intra-nuvem (IN) ocorrem entre o centro principal de cargas negativas, localizado no centro da nuvem, e o centro principal de cargas

positivas, próximo ao topo da nuvem. Nesse tipo de descarga, o líder negativo se propaga de forma ascendente, enquanto o líder positivo se propaga de forma descendente. Em alguns casos, a propagação do líder bipolar bidirecional pode ocorrer de forma invertida. O líder negativo se desenvolve de forma descendente em direção ao centro de cargas positivas na base da nuvem, enquanto o líder positivo se desenvolve de forma ascendente, seguindo em direção ao centro principal de cargas negativas (RAKOV, 2016). As descargas intra-nuvem possuem predominantemente uma propagação horizontal. Sua propagação vertical ocorre apenas no estágio inicial, e esse canal vertical desenvolvido é de curta duração, pois os líderes logo começam a se espalhar horizontalmente (COLEMAN et al., 2003).

No caso em que o líder negativo avança em direção à superfície, quando se aproxima do solo, devido ao intenso campo elétrico criado por ele, iniciam-se líderes ascendentes, em geral, dos pontos mais altos, conhecidos como líderes conectivos ascendentes, com de carga oposta ao líder escalonado descendente (SABA et al. , 2010). O encontro desses líderes permite um fluxo intenso de cargas elétricas, o qual é chamado de descarga de retorno. Nesse momento, ocorre a transferência máxima de carga líquida e o canal formado apresenta uma luminosidade intensa. Uma vez formado o canal, pode ou não ser acompanhado por uma corrente contínua, que é uma corrente de baixa intensidade e longa duração em comparação com a descarga de retorno (RAKOV, 2016).

Quando o líder escalonado em movimento descendente se conecta ao solo, a primeira descarga de retorno tem início. A corrente da primeira descarga de retorno medida no solo atinge um valor de pico da ordem de 20 a 40 kA (em média) em alguns microssegundos e diminui pela metade em algumas dezenas de microssegundos. Essa descarga de retorno efetivamente transporta para o solo os vários coulombs de carga originalmente depositados no canal, incluindo todas suas ramificações.

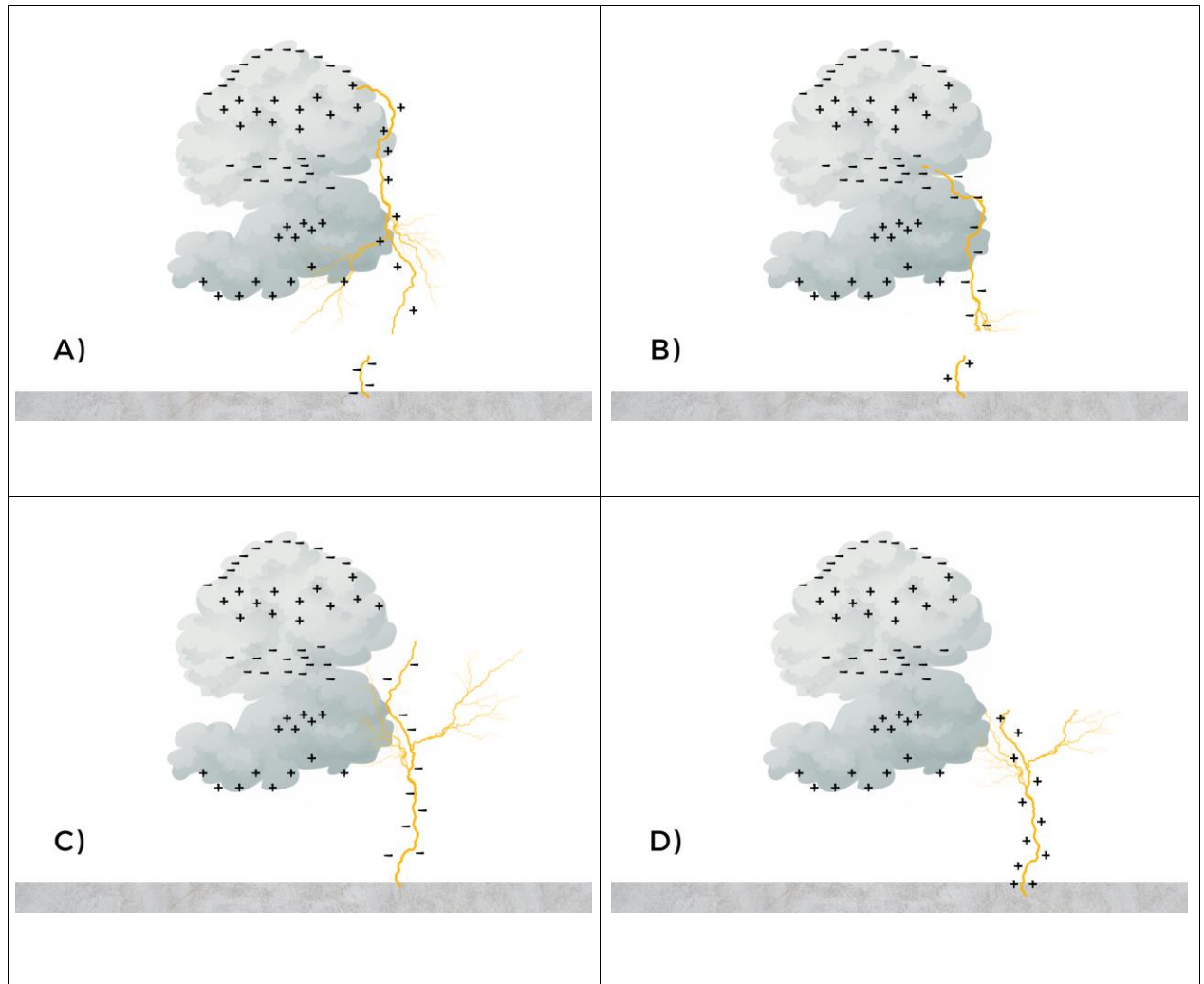
Uma vez que o canal condutor permanece conectado ao solo por um determinado período antes de começar a decair, pode ocorrer a propagação de um líder contínuo que retraça o canal e atinge o solo, ocorrendo assim uma segunda descarga de retorno (genericamente chamada de descarga subsequente), a qual transfere cargas adicionais da nuvem ao solo, neutralizando-as. A corrente da descarga de retorno subsequente no solo, em média, atinge valores de pico da ordem de 10 a 15 kA em menos de um microssegundo e diminui pela metade em algumas dezenas de microssegundos.

Cerca de 80 a 90% das descargas nuvem-solo globais possuem polaridade negativa, ou seja, cargas negativas são efetivamente transportadas da nuvem para o solo através de um processo que se desenvolve na direção descendente. Outros tipos de descargas nuvem-solo incluem as descargas descendentes com polaridade positiva, descargas ascendentes (cujo processo se desenvolve da superfície em direção à nuvem), com polaridades negativas ou positivas. As descargas descendentes exibem ramificações descendentes, enquanto as descargas ascendentes ramificam-se para cima. As descargas ascendentes ocorrem apenas a partir de objetos altos (superiores a cerca de 100 m) ou de objetos de altura moderada localizados no topo de montanhas (RAKOV, 2016; SABA et al., 2012).

As descargas positivas nuvem-solo (NS) são aquelas que transferem cargas positivas para o solo. Embora as etapas sejam semelhantes às descargas negativas nuvem-solo, algumas características são distintas. Apenas 20% delas apresentam mais de uma descarga de retorno. Suas descargas subsequentes, na maioria das vezes, formam outro canal e atingem outro ponto de contato no solo (SABA et al., 2010). Em relação à corrente contínua, as descargas positivas nuvem-solo possuem correntes contínuas longas em 70% dos casos (SABA et al., 2010). Além disso, costumam apresentar picos de corrente de maior intensidade (ORVILLE et al., 2001; RAKOV; UMAN, 2003; SCHULZ et al., 2005; NACCARATO, 2005; SABA et al., 2010). A Figura 2.10

esquematiza as possíveis polaridades das descargas atmosféricas para as descargas nuvem-solo (NS) e solo-nuvem (SN), que são as descargas que partem de torres ou estruturas altas em direção à nuvem.

Figura 2.10 – Polaridade das descargas que tocam o solo. (a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN negativo e (d) SN positivo.



Fonte: Adaptado de Naccarato (2006).

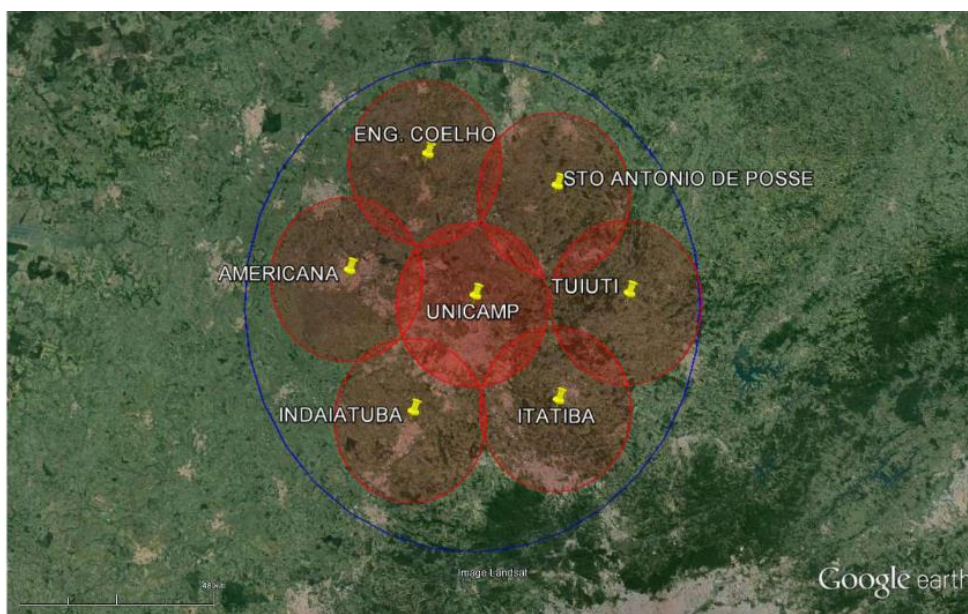
3 DADOS E MÉTODOS

3.1 Dados

3.1.1 Campo eletrostático atmosférico

A rede de sensores EFM utilizada no Projeto SOS-Chuva era composta por sete sensores instalados nas cidades de Campinas, Americana, Engenheiro Coelho, Itatiba, Santo Antônio da Posse, Tuiuti e Indaiatuba (SOS CHUVA, 2016). A área de estudo foi definida em função da localização destes sensores, esta área é delimitada espacialmente pelo retângulo: -47.5°W , -23.311°S , -46.429°W , -22.342°S . A Figura 3.1 apresenta a localização dos sensores EFM e a grade de estudo deste trabalho. O período estudado foi de dezembro de 2016 a junho de 2018, considerando apenas os dias que os sete sensores estiveram ativos.

Figura 3.1 – Localização dos 7 sensores EFM (marcador amarelo). Círculos vermelhos: raio de 20 km de cobertura dos sensores de campo elétrico atmosférico. Círculo azul: raio de 60 km de cobertura do radar dentro da rede EFM.



Fonte: SOS Chuva (2016).

Durante o Projeto Chuva, ocorreu uma série de experimentos de campo em nove localidades no Brasil. O objetivo desse projeto era estudar os regimes de precipitação em diferentes regiões do país, cada uma com padrões climáticos distintos. O principal propósito do projeto era avançar no conhecimento dos processos nas nuvens, criando assim uma base de dados para aprimorar a estimativa de precipitação por meio de satélites e validar as parametrizações da microfísica das nuvens.

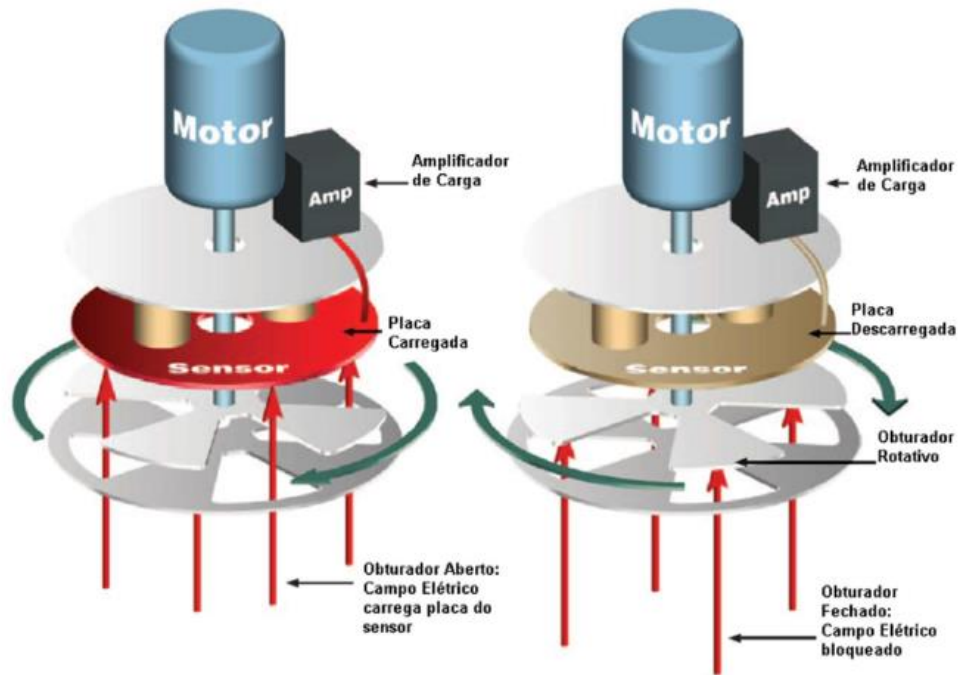
Em 2016, o projeto passou a ser chamado de Projeto SOS-CHUVA e um experimento foi conduzido em Campinas/SP durante 24 meses. Nessa etapa, foram utilizados um radar de dupla polarização, detectores de granizo, sensores de campo elétrico e redes de monitoramento de descargas atmosféricas. Esses dados simultâneos foram empregados com o objetivo de

capturar e estudar eventos intensos de precipitação, visando aprimorar a previsibilidade em curto prazo, a detecção de severidade e a estimativa de precipitação com alta resolução temporal e espacial por meio de radares e satélites (MACHADO et al., 2014). A combinação de medições de campo elétrico, descargas atmosféricas e radares meteorológicos, por exemplo, contribuiu para uma melhor compreensão dos processos físicos e da eletrificação das tempestades.

3.1.1.1 Detecção do campo eletrostático atmosférico

Neste estudo, o dispositivo utilizado para detectar o campo elétrico é o sensor EFM, abreviação de electric-field mill. O sensor EFM é um dispositivo que se baseia no princípio da indução eletrostática (BRUNING; MACGORMAN, 2013). Ele é composto por duas placas condutoras (Figura 3.2). Uma das placas funciona como um obturador rotativo, enquanto a outra é a placa sensor, que é exposta periodicamente ao campo elétrico. Essa exposição ocorre devido à rotação do obturador rotativo localizado abaixo da placa sensor.

Figura 3.2 - Funcionamento do sensor EFM.



Fonte: Adaptado de Mission Instruments (2015).

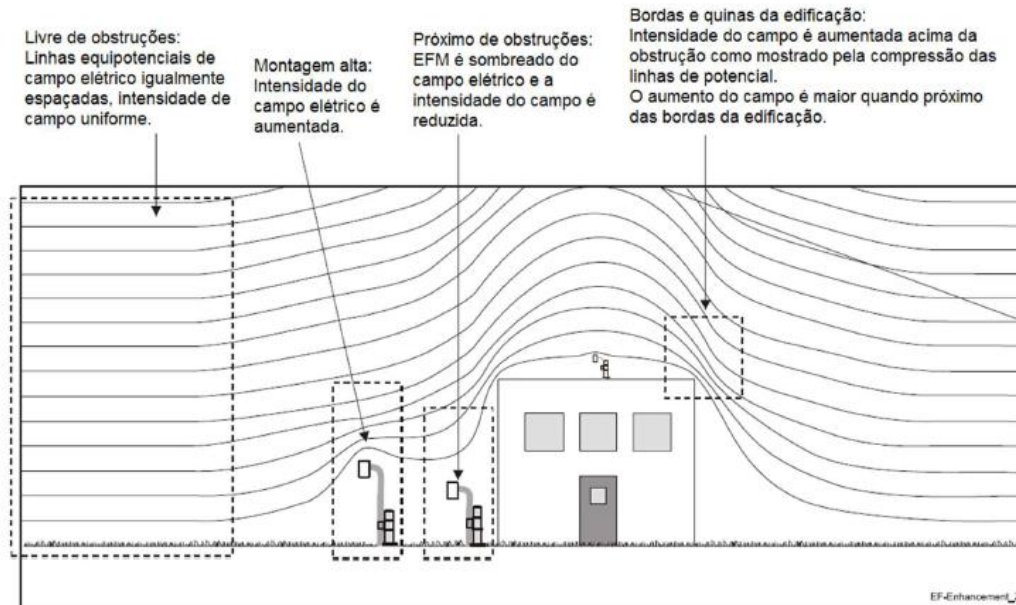
Os sensores EFM detectam o campo elétrico atmosférico vertical e as variações lentas desse campo devido à presença de cargas presentes diretamente acima e nas proximidades do sensor. A distância de detecção de um sensor EFM pode variar de alguns quilômetros a até 20 km, dependendo da localização da nuvem (BLOEMINK, 2013).

Quando os sensores EFM detectam alterações do campo elétrico da ordem de segundos, isso ocorre devido ao rearranjo global da distribuição de cargas em uma nuvem causado por uma descarga atmosférica. Já quando detectam mudanças mais lentas no campo (da ordem de minutos), isso se deve aos processos de eletrificação da nuvem e ao rearranjo de carga na atmosfera. Quando uma nuvem começa a separar cargas nas proximidades ou diretamente acima de um sensor EFM, geralmente ocorre uma inversão na polaridade do campo elétrico e um aumento em sua magnitude. Esses dados

são muito úteis como alerta para o risco de incidência de descargas nuvem-solo. No entanto, nem todos os casos de inversão de polaridade indicam o desenvolvimento de uma tempestade. A magnitude exata alcançada pelo campo depende fortemente da distância entre o sensor EFM e as regiões de carga na nuvem. Portanto, um algoritmo automático com um limite fixo para a magnitude do campo pode ou não detectar todas as tempestades. Os sensores EFM também podem ser usados quando uma tempestade em desenvolvimento se aproxima da área de proteção, o que ocorre em 90% dos casos (MURPHY et al., 2008).

Ao escolher o local de instalação do EFM, vários fatores são determinantes. Um exemplo é o crescimento da vegetação, que pode reduzir a altura efetiva do instrumento instalado em uma posição elevada acima do solo, criando um espaço onde ocorre a descarga corona indesejada. Para prevenir esse problema, é necessário cobrir o solo ao redor do local designado com pedra britada, cascalho ou blocos de concreto, impedindo o crescimento da vegetação e evitando mudanças na altura efetiva do instrumento (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2012). Outro fator a ser considerado é a presença de animais e pessoas próximas ao sensor, pois isso pode afetar significativamente as medições. Uma solução é a instalação de uma cerca ao redor do sensor, no entanto, é importante que o material da cerca seja não condutor para evitar interferências. Recomenda-se também evitar locais de instalação próximos a objetos muito altos. No caso de instalação sobre edifícios (Figura 3.3), é recomendado escolher superfícies planas, como terraços ou lajes de cobertura, pois isso resultará em menos interferência nas medições em comparação com telhados com pontas e inclinações. Se possível, é preferível posicionar o sensor o mais próximo possível do centro do teto da edificação, onde a distorção do campo elétrico é menor, evitando assim a instalação nas bordas, onde a distorção do campo é mais acentuada.

Figura 3.3 – Seleção de local para instalação do sensor EFM.



Fonte: Adaptado de Vaisala e Oyj. (2006).

No projeto SOS Chuva, o sensor EFM utilizado foi o modelo CS110 da marca Campbell. A Figura 3.4 mostra uma foto do sensor EFM instalado pelo projeto na cidade de Campinas/SP. O sensor de campo elétrico foi conectado a uma estação meteorológica.

Figura 3.4 – Sensor EFM (CS110) instalado pelo projeto SOS-Chuva em Campinas. Círculo vermelho mostra o sensor EFM instalado a estação meteorológica.

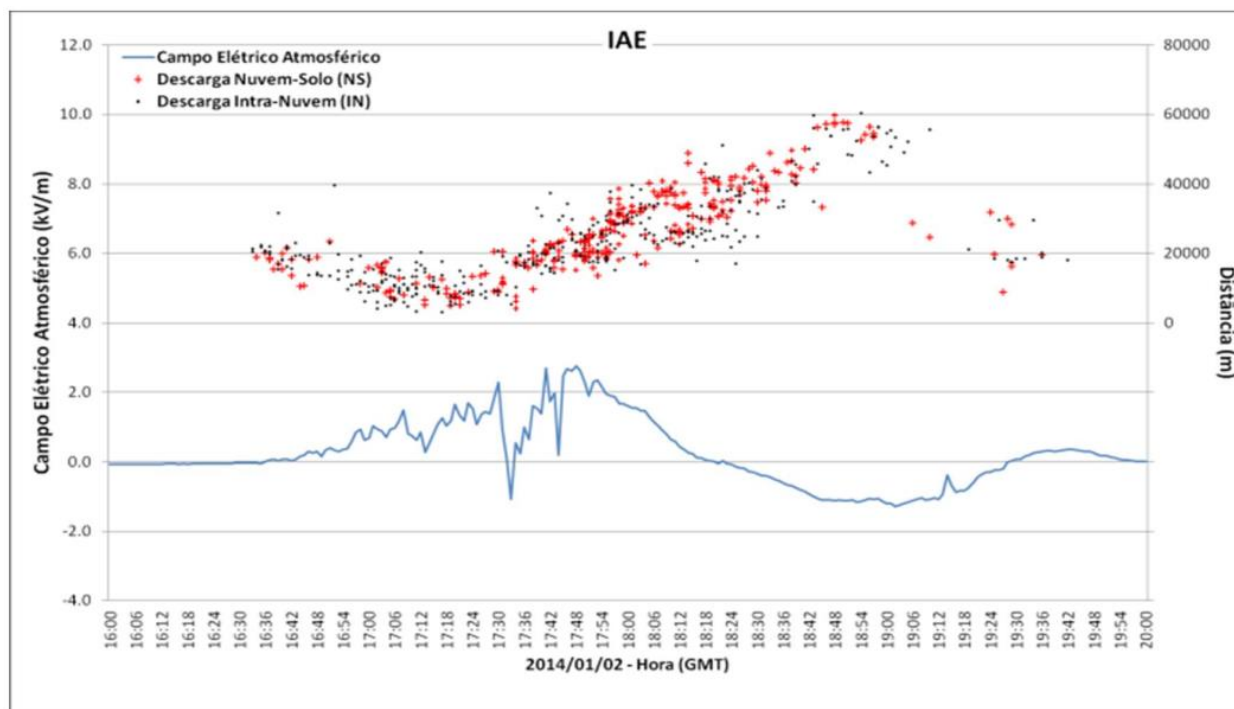


Fonte: Magina (2016).

O sensor EFM é capaz de medir o deslocamento de uma nuvem e seu impacto no campo elétrico. Conforme já explicado anteriormente, quando a nuvem está se aproximando, em geral, o campo eletrostático se intensifica positivamente, seguido por uma inversão (polaridade negativa), à medida que a nuvem passa acima do equipamento. Por fim, a nuvem, ao se afastar do sensor, na maioria das vezes, antes do campo elétrico reduzir, ocorre uma nova inversão de polaridade, tornando-se positiva, podendo se repetir algumas vezes. Essas inversões do campo elétrico na fase de dissipação ou afastamento da

tempestade é conhecida como ESO (em inglês, “*End of Storm Oscillation*”). Na Figura 3.5 pode-se observar o que foi detalhado.

Figura 3.5 - Medições do campo elétrico atmosférico e distâncias para as descargas atmosféricas de um sensor da rede integrada de sensores EFM em São José dos Campos.



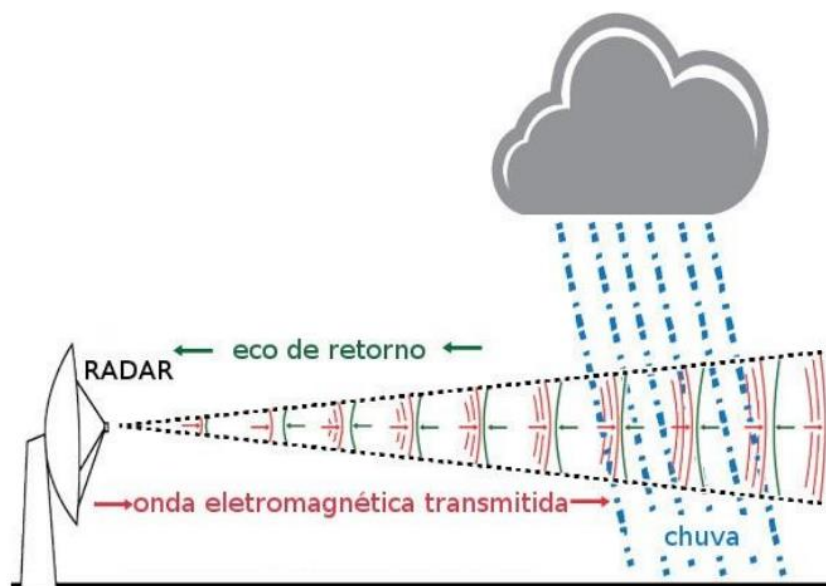
Fonte: Magina (2016).

3.1.2 Imagens de radar meteorológico

Para complementar a análise do campo eletrostático atmosférico, foram utilizadas imagens de radar do Radar de São Roque/SP. Através dessas imagens, é possível analisar o tipo de sistema convectivo (isolada ou multicelular) em atividade a fim de comparar com as medidas de campo elétrico.

Para compreender o sensoriamento remoto da atmosfera por meio de radares meteorológicos, é necessário ter conhecimento básico sobre ondas eletromagnéticas e os efeitos que a atmosfera causa nessas ondas à medida que se propagam a partir de uma antena transmissora até alcançarem os hidrometeoros. O radar (RAdio Detection And Ranging) é um sistema eletromagnético que realiza varreduras e detecta obstáculos por meio de ecos de rádio. A transmissão de pulsos de energia eletromagnética ocorre na faixa de micro-ondas e é concentrada em um feixe através de uma antena rotativa. Os alvos que são iluminados pelo feixe podem absorver parte dessa energia e refleti-la em várias direções. A fração de energia que retorna ao radar é medida pelo receptor e, ao conhecer o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do eco, é possível determinar a distância do alvo, como ilustrado na Figura 3.6. A intensidade desse eco é quantificada pela medida da energia retornada, permitindo a obtenção de medidas em tempo real e com alta resolução espacial provenientes dos ecos dos alvos (WILSON; BRANDES, 1979; RINEHART, 2004). A refletividade do radar pode variar em uma ampla faixa de valores, sendo geralmente medida em decibéis (dBZ).

Figura 3.6 - Ilustração com o princípio de funcionamento do radar.



Fonte: Adaptado de USP (2018).

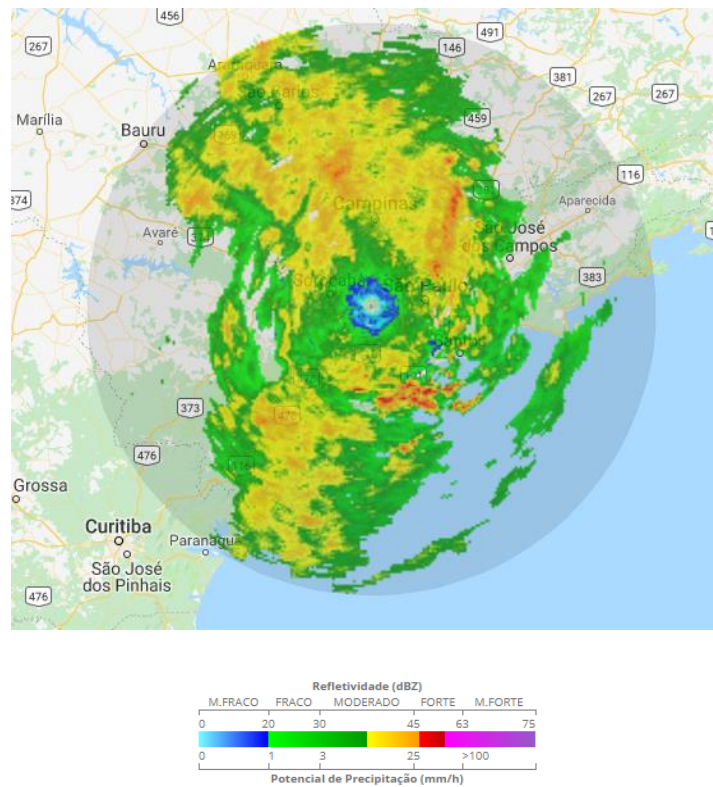
Existem três tipos de radares utilizados na meteorologia: o radar meteorológico convencional, que mede apenas uma polarização; o radar Doppler, que mede as mudanças de frequência do eco de retorno para determinar se está se afastando ou se aproximando do radar; e o radar de multipolarizações, que emite e recebe sinais em várias polarizações. A partir dos dados e produtos obtidos desses radares, é possível estudar medidas de precipitação e sua estrutura tridimensional, medidas de vento, turbulência e cisalhamento, previsão de nowcasting, detecção de granizo, rajadas de vento e identificação de diferentes tipos de hidrometeoros. De um modo geral, os valores de refletividade do radar estão associados a estimativas de precipitação.

Os radares transmitem pulsos de determinada duração em intervalos regulares, obtendo informações sobre a precipitação dentro de uma determinada faixa de alcance. Essas informações são coletadas por meio de uma varredura completa da antena do radar, realizando uma rotação de 360° ou selecionando ângulos específicos, incluindo cortes verticais. Os tipos de varredura comumente utilizados são: varredura em azimuth, varredura em elevação e

varredura volumétrica. A partir dos dados tridimensionais obtidos, é possível gerar diversos produtos que mostram a refletividade do radar. Alguns dos produtos mais comuns incluem PPI (*Plan Position Indicator*), CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*), RHI (*Range Height Indicator*) e MAXCAPPI.

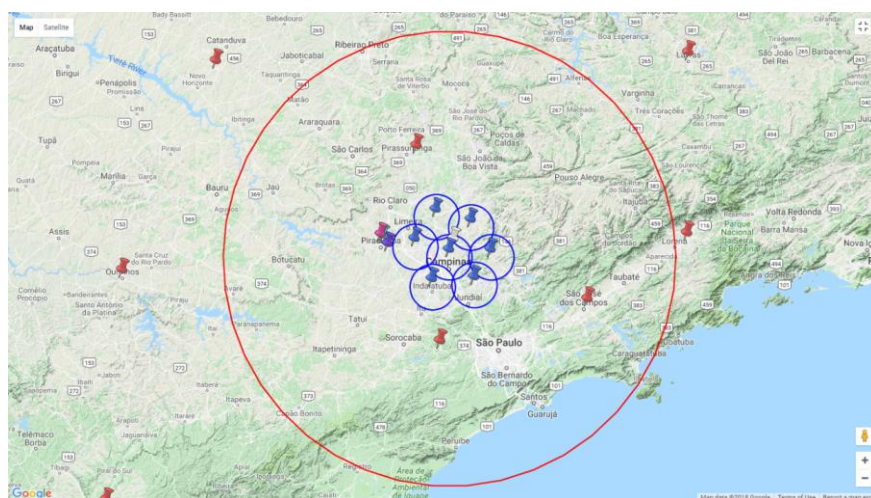
O radar meteorológico de São Roque foi utilizado neste estudo para gerar os produtos CAPPI a uma altura de 3 km, com base nos dados volumétricos do radar. O CAPPI é um dos principais produtos derivados de dados de radar meteorológico. Ele é usado para representar informações meteorológicas em um plano de altitude constante em uma determinada altura acima do solo. O CAPPI é uma representação bidimensional da refletividade obtida por meio de uma varredura volumétrica, projetando os dados em um plano horizontal a partir de uma camada de altura constante. A altura de 3 km é amplamente utilizada para monitorar a precipitação. O CAPPI é um produto muito útil, pois permite combinar informações de outros radares, expandindo assim a área de cobertura. A Figura 3.7 mostra uma imagem do radar de São Roque no produto CAPPI, a 3 km de altura, enquanto a Figura 3.8 apresenta a localização dos sensores EFM, a rede de detecção de descargas e a área coberta pelo radar de São Roque, que foi utilizado neste estudo.

Figura 3.7 – Produto CAPPI do Radar de São Roque/SP.



Fonte: Redemet (2018).

Figura 3.8 – Localização dos 7 sensores de EFM (marcador azul), sensores de LMA (marcador vermelho) e área de abrangência do Radar São Roque (círculo vermelho).



3.1.2.1 Forecast and tracking of convective clouds (FortraCC)

Os dados de radar foram utilizados em uma ferramenta chamada FortraCC. Essa ferramenta, desenvolvida por Vila et al. (2008), foi criada com o objetivo de rastrear e prever o deslocamento de células convectivas. O FortraCC consegue identificar e caracterizar o ciclo de vida dos sistemas convectivos rastreados. Inicialmente, o FortraCC foi desenvolvido a partir de imagens de satélites e, posteriormente, foi adaptado e aperfeiçoado para usado com imagens de radares.

Neste trabalho, o FortraCC foi utilizado para classificar e separar os sistemas convectivos em sistemas isolados e multicelulares, a fim de buscar um padrão de campo elétrico para os diferentes tipos de sistemas. Para essa classificação, foram utilizadas imagens de radar CAPPI a 3 km de São Roque. Após a aplicação da ferramenta, os sistemas são rastreados e a figura abaixo apresenta uma parte dos dados de saída do FortraCC como exemplo (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Saída do FortraCC.

FAMILY= 31 - YEAR=2018 MONTH= 3 DAY= 20 HOUR=18.10 FIRST MEMBER= 56 CLASSIF=NDS																			
SYS#	XLAT	XLON	TIME	SIZE	DSIZE	TMED	DTM	ED	TMIN	DTMIN	TMIN9	DTMIN9	FRAC	VEL	DIR	T_INI	CLA	SYS_ANT	
56	-23.09	-47.10	0.00	23	-999.9	29.1	-999.9		41.6	-999.9	30.7	-999.9	0.26	0.0	-999	0.00	N	0	
48	-23.06	-47.06	0.16	44	1088.3	33.8	29.1		54.3	79.5	45.4	91.6	0.36	35.5	45	0.16	C	56	
46	-23.02	-47.06	0.32	42	-80.7	34.3	3.4		50.5	-23.7	44.1	-8.0	0.43	25.1	0	0.32	C	48	
44	-22.97	-47.04	0.48	65	289.4	34.4	0.6		55.1	28.6	46.6	15.6	0.40	0.0	-999	0.48	M	46	48
44	-22.98	-47.03	0.64	77	215.5	33.6	-4.7		56.7	9.8	50.3	23.0	0.40	17.7	134	0.64	M	44	49
33	-22.98	-47.03	0.80	108	581.8	34.5	5.6		53.4	-20.6	46.1	-26.3	0.52	0.0	-999	0.80	C	44	
28	-22.98	-47.10	0.96	161	242.2	33.7	-5.2		54.6	7.3	50.0	24.4	0.44	25.1	90	0.96	M	33	31
TOTAL TIME= 0.96 DELTAX 0.00 DELTAY 0.11 LAST IMAGE= R END=NOR																			
FAMILY= 32 - YEAR=2018 MONTH= 3 DAY= 20 HOUR=18.10 FIRST MEMBER= 59 CLASSIF=NDS																			
SYS#	XLAT	XLON	TIME	SIZE	DSIZE	TMED	DTM	ED	TMIN	DTMIN	TMIN9	DTMIN9	FRAC	VEL	DIR	T_INI	CLA	SYS_ANT	
59	-23.83	-47.06	0.00	4	-999.9	24.8	-999.9		27.5	-999.9	19.6	-999.9	0.00	0.0	-999	0.00	N	0	
51	-23.81	-47.01	0.16	9	1335.5	23.8	-6.8		28.1	4.2	16.8	-17.9	0.00	39.5	71	0.16	C	59	
51	-23.81	-46.95	0.32	10	182.7	23.8	0.1		27.7	-2.8	19.7	18.4	0.00	37.5	90	0.32	C	51	
46	-23.79	-46.93	0.48	7	-612.7	23.9	1.1		29.6	12.2	20.0	2.1	0.00	17.7	45	0.48	C	51	
48	-23.79	-46.91	0.64	13	1041.7	22.0	-12.2		25.8	-23.7	17.8	-14.0	0.00	12.5	90	0.64	C	46	
39	-23.79	-46.87	0.80	13	0.0	22.3	2.1		28.0	13.2	18.6	5.0	0.00	25.0	90	0.80	C	48	
40	-23.72	-46.81	0.96	8	-826.7	24.4	12.9		27.6	-2.4	19.9	8.0	0.00	62.5	36	0.96	C	39	
TOTAL TIME= 0.96 DELTAX 0.25 DELTAY 0.11 LAST IMAGE= R END=MER - NSYS: 39																			

Nos dados de saída do FortraCC, observa-se que o método não caracteriza diretamente o tipo do núcleo convectivo. No entanto, por meio do FortraCC, é possível extrair as seguintes informações da coluna CLA: N (Novo - indica que um novo núcleo convectivo foi rastreado), C (Contínuo - indica que o núcleo

convectivo não sofreu alterações), M (Merge - indica fusão com outro sistema) e S (Split - indica que o sistema foi dividido).

O primeiro passo consistiu em executar a ferramenta para todo o período de estudo, de dezembro de 2016 a junho de 2018, considerando apenas os dias em que os sete sensores estavam ativos. A partir dos dados de saída do FortraCC, obtiveram-se informações sobre o rastreamento e a caracterização dos sistemas convectivos, incluindo estágios como núcleo convectivo novo, contínuo (sem alterações), fusão com outro sistema ou divisão do sistema. Cada núcleo convectivo rastreado pelo FortraCC recebeu um número de identificação (Família), o que permitiu acompanhar a trajetória e as mudanças associadas a cada núcleo convectivo ao longo do tempo. Com isso, foram obtidas as informações sobre o ciclo de vida dos sistemas convectivos estudados.

No segundo passo, os núcleos convectivos que passaram por processos de fusão e divisão foram separados dos núcleos convectivos contínuos. Os núcleos convectivos que sofreram fusão ou divisão foram classificados como multicelulares, enquanto aqueles que permaneceram contínuos foram classificados como isolados. Essa classificação permitiu diferenciar os diferentes tipos de sistemas convectivos com base em seus padrões de evolução.

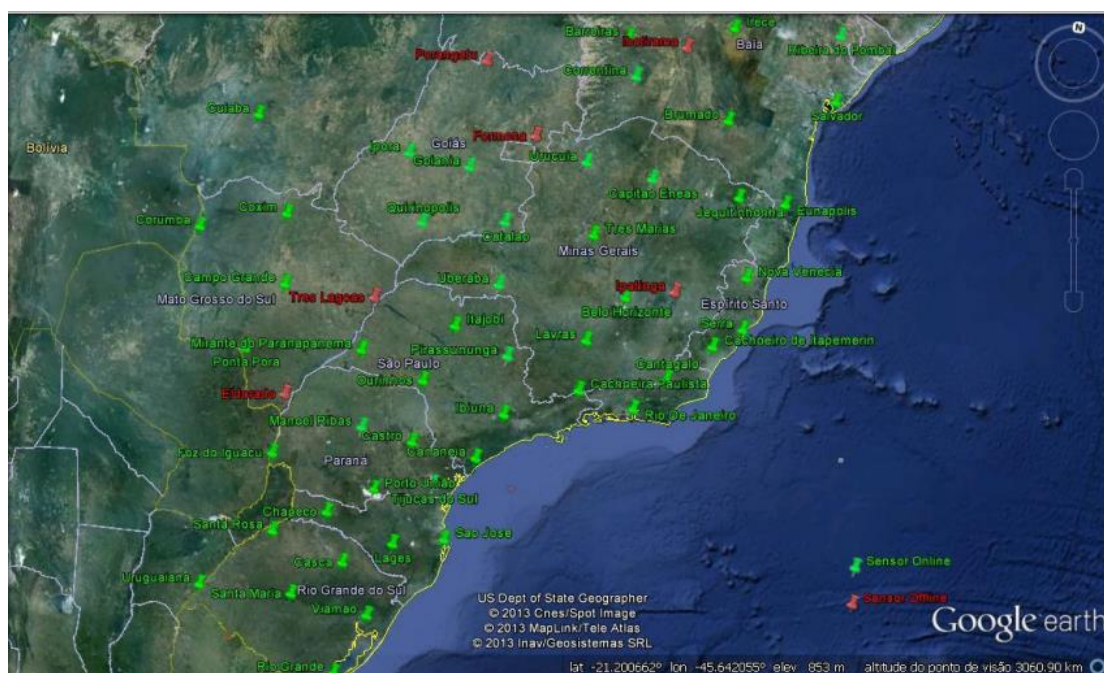
Após a classificação dos sistemas em isolados e multicelulares, foi realizada uma análise de cada caso, utilizando-se mapas de campo elétrico, imagens de radar meteorológico e dados de descargas atmosféricas. Os resultados dessa análise serão discutidos com mais detalhes no Capítulo 4.

3.1.3 Dados de descargas atmosféricas

Os dados de descargas atmosféricas, tanto de descargas atmosféricas NS quanto de IN, obtidos da rede BrasilDAT, foram sobrepostas no mapa de variação do campo eletrostático. Isso permitiu analisar a relação entre as descargas atmosféricas e as variações específicas do campo elétrico.

A BrasilDAT é uma rede de detecção de descargas atmosféricas baseada no sistema de descargas atmosféricas totais da Earth Networks (ENTLS, em inglês). Durante o período do projeto SOS-Chuva, essa rede era composta por 56 sensores que abrangiam 10 estados (Figura 3.10), incluindo o Sudeste, Sul, Centro e parte do Nordeste do país (NACCARATO et al., 2012).

Figura 3.10 – Localização dos sensores da BrasilDAT.



Fonte: Naccarato et al. (2012).

A rede BrasilDAT é uma rede de detecção de descargas atmosféricas em VLF (*Very Low Frequency*) e LF (*Low Frequency*) que registra tanto as descargas NS quanto as descargas IN. No caso das descargas NS, o sistema registra informações como o momento exato da ocorrência, a localização do ponto de impacto e características físicas como intensidade e polaridade. Já para as descargas IN, apenas o momento exato e a localização média (projeção na superfície) são registrados (NACCARATO et al., 2012).

Cada sensor que detecta um evento válido envia os dados para um sistema central de processamento, que calcula os parâmetros de cada descarga. Em seguida, esses dados são armazenados em bancos de dados específicos, permitindo consultas posteriores. Atualmente, a rede BrasilDAT é a terceira maior rede de monitoramento de descargas atmosféricas do mundo e a maior na região tropical do planeta, com mais de 70 sensores em todo o centro-sul do Brasil e parte da região Nordeste. A região norte ainda não possui uma cobertura com alta eficiência.

A rede BrasilDAT possuía, na ocasião das medidas, uma eficiência de detecção baseada em modelos de aproximadamente 85% a 90% para descargas nuvem-solo, cerca de 50% a 60%, para descargas intra-nuvem e uma precisão de localização de cerca de 500 metros para descargas nuvem-solo dentro da área do experimento SOS-CHUVA (SOS CHUVA, 2016).

3.2 Métodos

3.2.1 Interpolação dos dados de campo eletrostático atmosférico

A partir das medidas do campo elétrico atmosférico obtidas pelos sensores EFM foi utilizada uma técnica de interpolação para obter valores em pontos de grade regularmente espaçados. Os valores de campo de cada sensor foram interpolados em uma grade de 110 x 115 km usando o método de Barnes (1964), com o objetivo de analisar o comportamento espacial do campo eletrostático atmosférico. Também foram realizados testes de sensibilidade na interpolação para se identificar qual o melhor raio de busca do método. Segundo o estudo de Magina (2016), as medições interpoladas de campo elétrico são melhores do que aquelas obtidas em estudos anteriores que consideraram medições pontuais do EFM. Outro motivo é que as medições interpoladas podem ser obtidas em qualquer ponto da área coberta pelos sensores da rede. Dessa forma, sempre haverá uma medição interpolada de campo elétrico mais próxima do centro de carga de uma nuvem de tempestade, mesmo que esteja localizada distante dos sensores EFM da rede.

O princípio de interpolação de Barnes estabelece pesos proporcionais à distância entre o ponto de grade no qual o valor interpolado do campo está sendo calculado e cada um dos sensores participantes do processo de interpolação. Isso permite distinguir a contribuição individual de cada sensor no cálculo do valor interpolado para o ponto de grade em questão. O valor atribuído a cada ponto de grade é determinado através do melhor ajuste dos valores ao seu redor, levando em consideração o raio de influência. O raio de influência é definido como a distância na qual a contribuição de um determinado sensor é insignificante no cálculo do valor interpolado. Ao considerar várias medições para determinar o valor do ponto de grade, ocorre uma suavização dos dados. O valor final estará, portanto, entre o valor máximo e mínimo das medições utilizadas. No caso específico, ocorrerá uma suavização dos valores de campo elétrico medidos pelos sensores EFM da rede.

No princípio da interpolação de Barnes, o processo é realizado em duas etapas. Na primeira interpolação, é gerado um campo inicial de campo elétrico. Na segunda interpolação, busca-se melhorar a qualidade das informações obtidas a partir da interpolação anterior. As interpolações subsequentes têm como objetivo corrigir o valor calculado na primeira interpolação, aproximando-o o máximo possível da medida que seria obtida se um sensor estivesse instalado naquele ponto específico. Essa correção é obtida para cada ponto de coleta de dados subtraindo o valor calculado na interpolação anterior da medida feita pelo sensor.

Para atribuir pesos (w) aos pontos da grade (i, j), é utilizado um fator de ponderação determinado pela seguinte fórmula, inicialmente com um parâmetro de raio de influência $R = 40$ km. Esse valor é assumido porque é a distância a partir da qual a contribuição de um determinado sensor torna-se desprezível no cálculo do valor interpolado.

$$\omega_{ij} = \exp\left(\frac{-d^2}{R^2}\right) \quad (3.1)$$

Onde d é a distância entre o ponto de medição ao ponto de grade e R é o raio de influência. A interpolação inicial dos valores do sensor $S(x_i, y_j)$ é dada por:

$$g_0(x_i, y_j) = \frac{\sum \omega_{ij} S(x_i, y_j)}{\sum \omega_{ij}} \quad (3.2)$$

Onde $S(x_i, y_j)$ são os valores nos pontos de medição localizados dentro do raio de influência. Em seguida, foi realizada uma segunda etapa de interpolação de Barnes, que foi somada à primeira etapa. Essa segunda etapa envolveu a aplicação de um parâmetro de suavização, denotado por f , à diferença entre os valores interpolados e as observações do sensor, a fim de fazer uma correção. Foi adotado um valor de $f = 0.3$.

$$g_1(x_i, y_j) = g_0(x_i, y_j) + \sum \left(g_0(x_i, y_j) - S(x_i, y_j) \right) \exp\left(\frac{-d^2}{fR^2}\right) \quad (3.3)$$

Para automatizar o método de Barnes utilizado na interpolação do campo elétrico atmosférico, foi desenvolvido um software em linguagem MATLAB (MATHWORKS, 2015). Esse software tem como entrada os dados medidos a cada 5 minutos pelos sete sensores EFM da rede e gera como saída figuras que mostram as linhas equipotenciais do campo elétrico, bem como a localização das eventuais descargas atmosféricas que ocorreram na área de estudo durante o mesmo período em que as medições dos EFM foram realizadas, dezembro de 2016 a julho de 2018.

Foi realizado um teste de sensibilidade da interpolação de Barnes para 14 casos, e serão apresentados aqui apenas 2 desses casos (Figuras 3.11 e 3.12). O método de interpolação de Barnes aplicado aos dados da rede EFM utiliza um fator de peso que considera a fonte do campo elétrico e a distância até o sensor. Além disso, esse método utiliza um raio de influência para os

sensores, que é baseado na capacidade de cada sensor em medir o campo eletrostático. Para calcular o fator de peso (E), utilizamos a Equação 3.4, onde "R" é o raio de influência e "r" é a distância do ponto de grade em relação aos sensores (Equação 4.2).

$$E = \exp(-r^2 / R^2) \quad (3.4)$$

$$r^2(x,y) = (\text{latitude ponto} - \text{latitude sensor})^2 + (\text{longitude ponto} - \text{longitude sensor})^2 \quad (3.5)$$

Para realizar o teste de sensibilidade, foi necessário calcular o fator de peso "E" utilizando as equações mencionadas anteriormente. No teste, foram definidos valores para o raio de influência "R", variando a cada 5 km no intervalo de 15 a 60 km. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela a seguir.

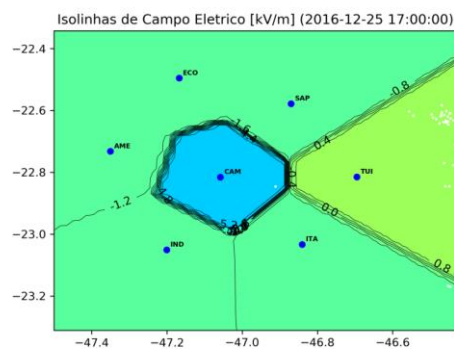
Tabela 3.1 – Resultado do fator peso (E) de acordo com o raio de Influência (R).

R	E
15	0,10
20	0,21
25	0,25
30	0,32
35	0,35
40	0,37
45	0,42
50	0,52
55	0,55
60	0,57

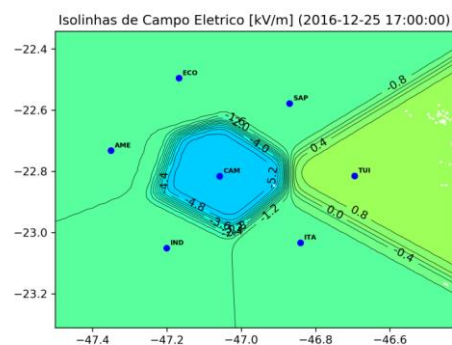
Figura 3.11 - Teste de Sensibilidade para um caso de sistema convectivo isolado no dia 25 de dezembro de 2016.

1º Caso – 25/12/2016 -Sistema convectivo isolado às 17:00.

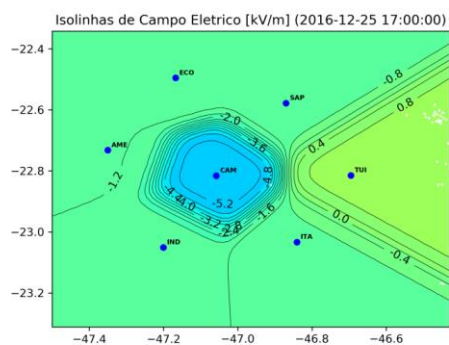
15km



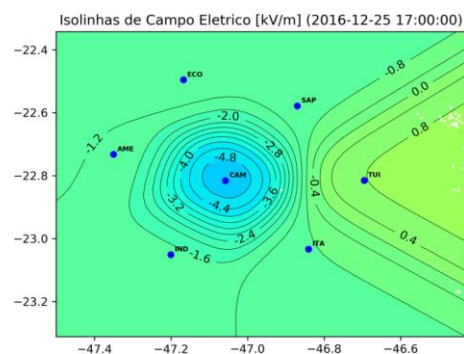
20km



25km



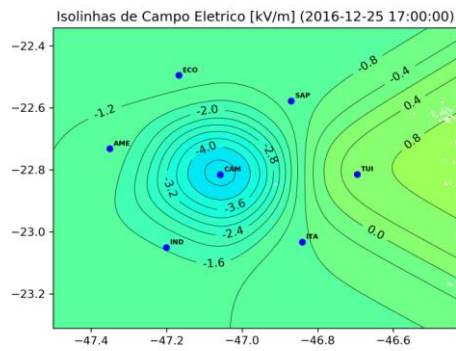
30km



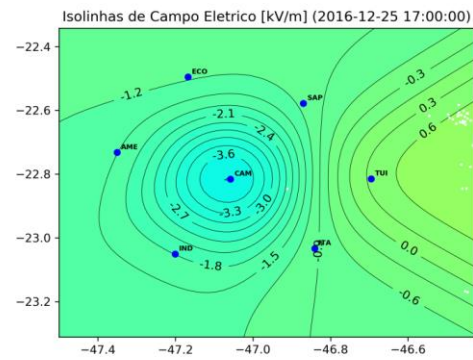
continua

Figura 3.11 - Continuação.

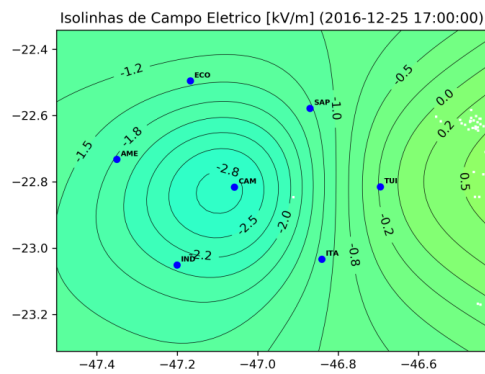
35km



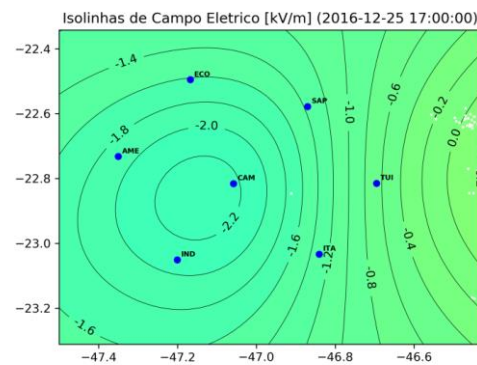
40km



45km



50km



continua

Figura 3.11 - Conclusão.

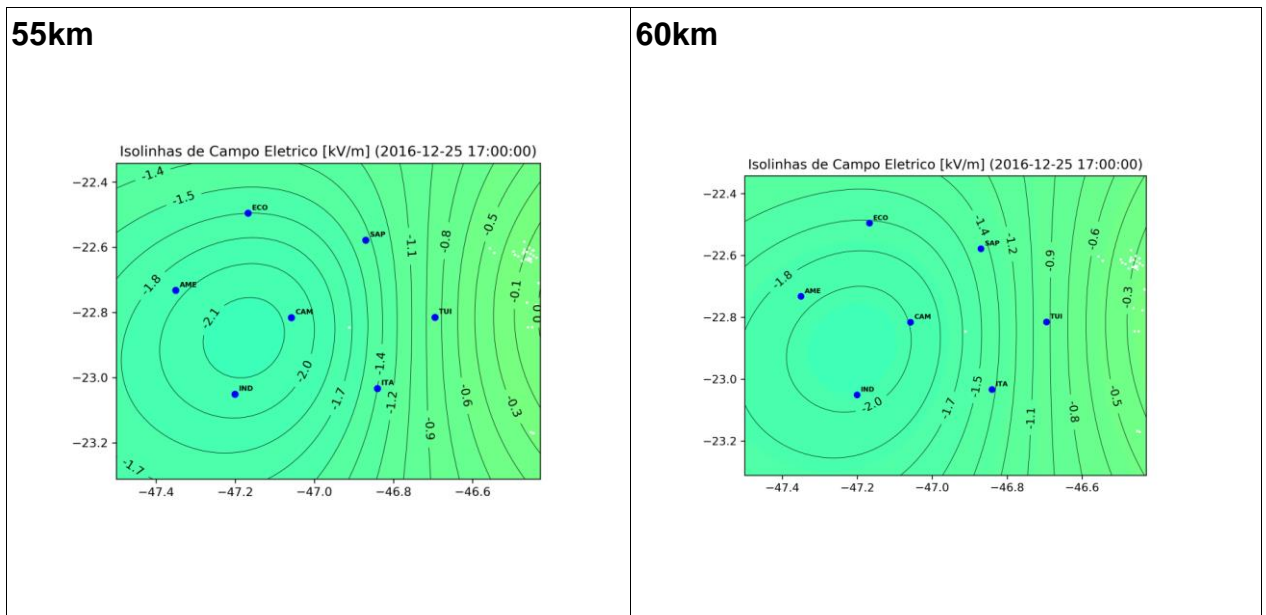
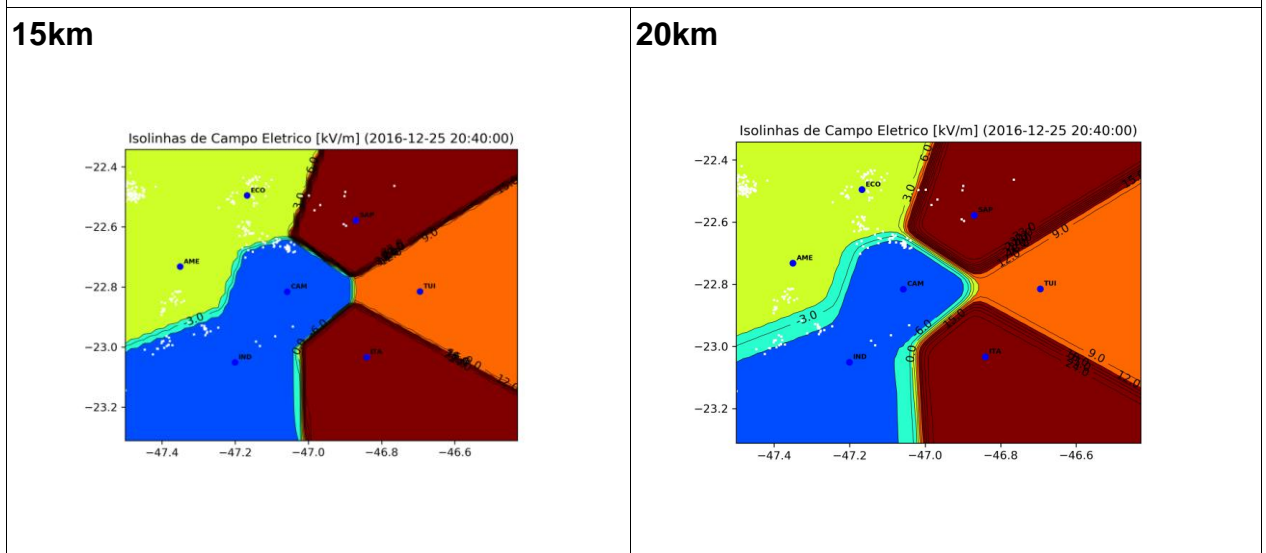


Figura 3.12 - Teste de Sensibilidade para um caso de sistema convectivo multicelular no dia 25 de dezembro de 2016.

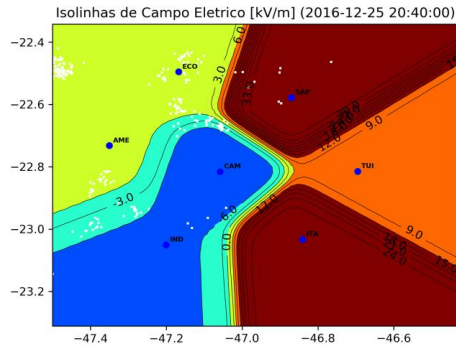
2º Caso – 25/12/2016 – Sistema Convectivo multicelular em toda área da rede às 20:40.



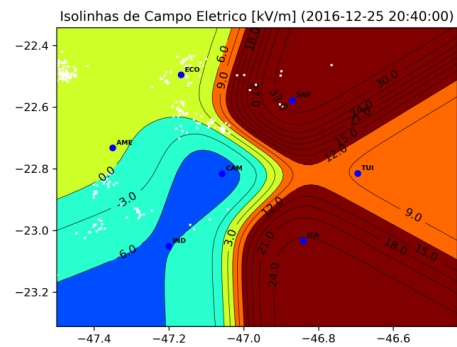
continua

Figura 3.12 - Continuação.

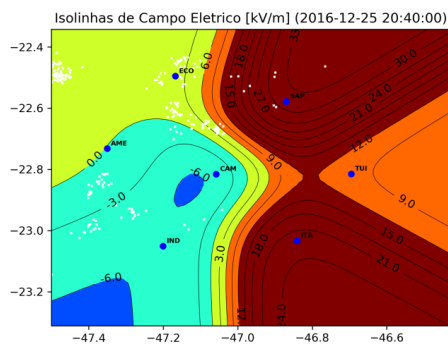
25km



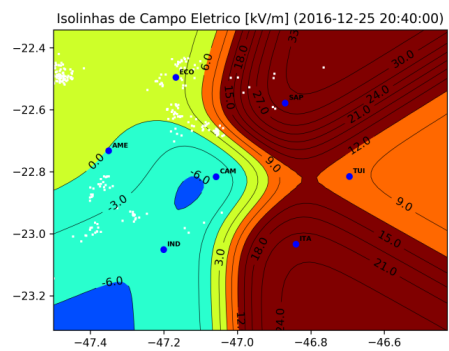
30km



35km

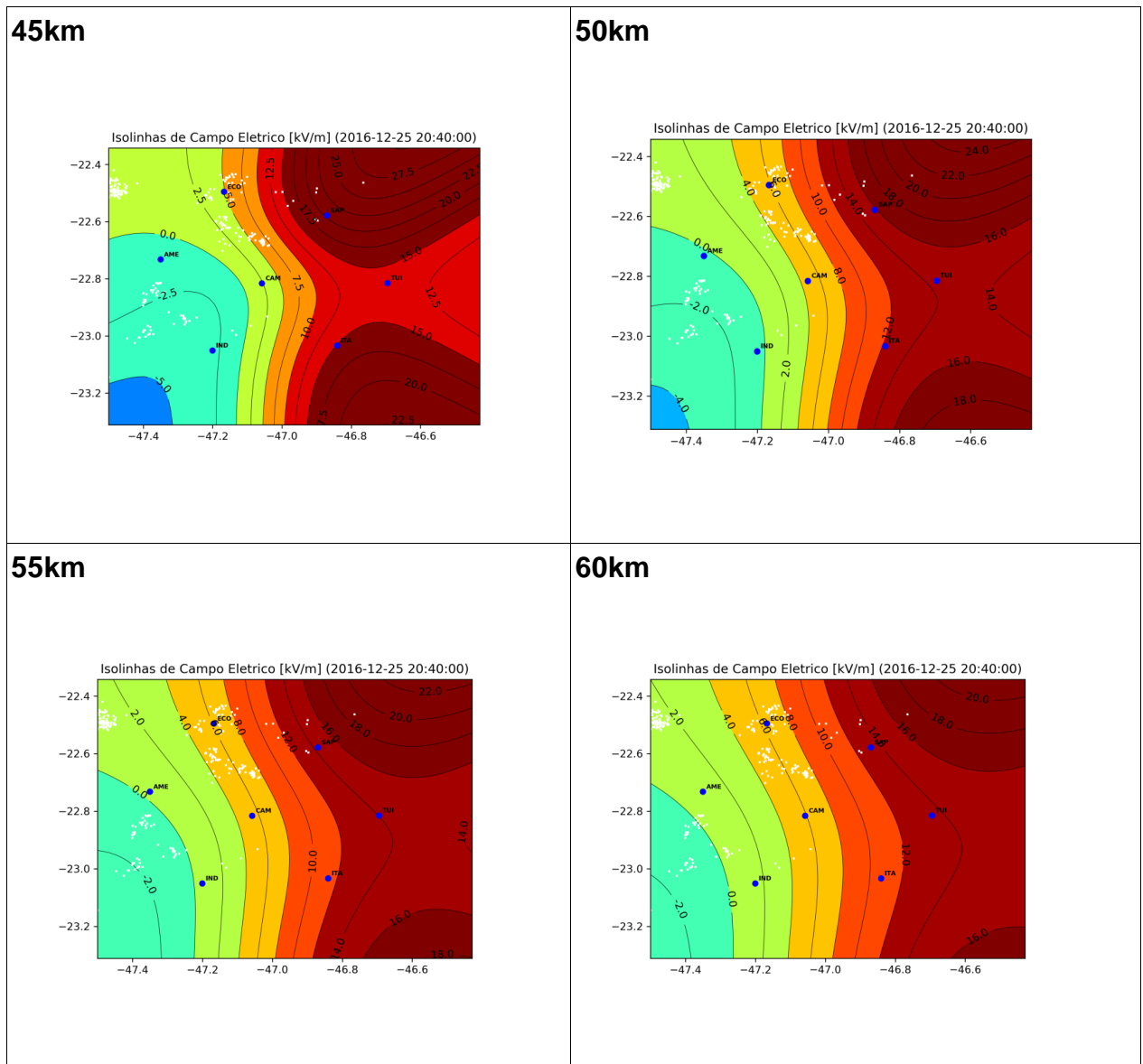


40km



continua

Figura 3.12 – Conclusão.



Ao analisar os casos selecionados para o teste de sensibilidade, foi observado que, em todos os casos, à medida que o valor do parâmetro "R" aumentava, as linhas equipotenciais se espaçavam mais e apresentavam maior suavização. Para valores de "R" menores que 35 km, foi observada uma limitação na capacidade de extrapolação, resultando em linhas equipotenciais mais precisas e próximas aos sensores. Foi observado que acima de 45 km, os núcleos de campo elétrico, que previamente estavam alinhados com os núcleos

apresentados no radar, começaram a se deslocar para a esquerda em todos os casos analisados, distanciando-se completamente do núcleo de tempestade indicado na imagem de radar.

Ao considerar a análise dos casos, constatou-se que, independentemente do sistema convectivo em curso, as características mencionadas anteriormente foram semelhantes em todos os casos. Dessa forma, o teste confirmou que o melhor raio de influência seria em torno de 30 km a 35 km, visto que essa é a distância média entre os sensores (linha de base). Portanto, o raio de influência de 35 km foi escolhido para dar continuidade aos estudos, uma vez que ele preserva a estrutura espacial dos sistemas.

3.2.2 Análise de funções ortogonais empíricas

Vários métodos estatísticos têm sido utilizados para identificar a natureza temporal e espacial da variabilidade climática, proporcionando uma interpretação física dos campos meteorológicos. A técnica conhecida como Função Ortogonal Empírica (EOF, do inglês Empirical Orthogonal Function) é uma das técnicas estatísticas de análise multivariada mais conhecidas e amplamente utilizadas nas ciências atmosféricas. Após estudos meteorológicos realizados por Lorenz (1956), essa técnica se tornou uma das mais populares.

A decomposição em Funções Ortogonais Empíricas (EOF) é uma técnica estatística multivariada utilizada para entender as dependências existentes e estruturar um conjunto de dados. O significado físico dessa técnica depende da interpretação dos resultados matemáticos. A análise de EOF envolve a reescrita das coordenadas das amostras em um sistema de eixos mais adequado para análise. Nessa análise, pressupõe-se que os modos sejam ortogonais no espaço e no tempo, sendo que o primeiro modo maximiza a variância explicada em relação ao conjunto total de dados, o segundo modo não possui correlação com o primeiro e explica a maior parte da variância restante, e assim por diante (MOITA NETO; MOITA, 1998). Esse processo é repetido até que todos os padrões de EOF sejam computados. No entanto, apenas os primeiros modos de EOF possuem significado físico (DESER et al.,

2010), permitindo que as demais funções geradas sejam descartadas. Especialmente os dois primeiros modos, que apresentam padrões independentes, representam processos físicos significativos, associados a padrões espaciais e temporais característicos.

As Funções Ortogonais Empíricas (EOF) são os autovetores da matriz de covariância obtida a partir dos dados de entrada. Como um autovetor pode ser multiplicado por qualquer escalar e ainda permanecer um autovetor, o sinal é arbitrário. Do ponto de vista matemático, o sinal de um autovetor não é relevante. O sinal só é considerado quando se deseja interpretar o significado físico desse autovetor.

Nos últimos anos, diversos estudos têm empregado a análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) para investigar os mecanismos físicos associados à variabilidade climática. No entanto, não houve trabalhos que tenham utilizado a técnica de EOF para compreender o comportamento do campo eletrostático atmosférico. Neste trabalho, foi realizada uma análise de EOF para investigar a variabilidade espacial e temporal dos dados de campo elétrico atmosférico, buscando compreender o seu comportamento em diferentes escalas de tempo e no espaço, bem como antes da ocorrência das primeiras descargas atmosféricas. Para essa análise, foram considerados apenas os quatro primeiros modos da EOF, que eram os mais significativos. Cada modo revelou um padrão espacial do campo elétrico durante o período analisado, permitindo observar como ocorreram as perturbações nesse campo na região de estudo. Além disso, foi investigado se havia um comportamento padrão para o campo elétrico, de acordo com o tipo de sistema convectivo e o período considerado.

Por fim, para a análise da EOF, os dados de campo elétrico foram divididos em grupos. Essa divisão foi realizada após uma análise subjetiva de cada caso fornecido pelo Fortracc. Os grupos incluem: Sistemas Convectivos Isolados (com e sem incidência de descargas atmosféricas), Sistemas Convectivos Multicelulares (com e sem incidência de descargas atmosféricas), Sistemas com baixa taxa de descargas atmosféricas, Sistemas com taxa média/alta de

descargas atmosféricas, Estação Chuvosa (com e sem incidência de descargas atmosféricas) e Estação Seca (com e sem incidência de descargas atmosféricas).

3.2.2.1 Aplicação da EOF

A partir da matriz de dados X (com n indivíduos \times p características), em que as variáveis possuem média $E(x_j) = m(j)$ e variância $V(x) = s(j)$, $j = 1 \dots p$, é possível obter a matriz de variância e covariância S , da seguinte forma:

$$S = \frac{1}{n} X \cdot X^t \quad (3.6)$$

Considerando a matriz X com valores centrados e X^t como sua matriz transposta, e n como o número de indivíduos ou estações. Normalizando a matriz das variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ (com média zero e variância um) por meio da média e do desvio padrão, a matriz de variância e covariância será igual à matriz de correlação R , conforme a seguinte expressão:

$$R = \frac{1}{n} Z \cdot Z^t \quad (3.7)$$

Sendo a matriz R uma matriz de correlação simétrica e positiva de dimensão ($p \times p$), ela pode ser diagonalizada por uma matriz ortogonal A , que é chamada de matriz de autovetores e representa uma mudança de base. Dessa forma, a matriz diagonal D , na qual os elementos diagonais são os autovalores de R , pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$D = A^{-1} \cdot R \cdot A = A^t \cdot R \cdot A \quad (3.8)$$

onde A^{-1} é a inversa da matriz A .

As EOF's são obtidas por combinações lineares entre a transposta dos autovetores de A^t e a matriz de observações X , isto é:

$$U = A^t \cdot X \quad (3.9)$$

Os valores X_i do n -ésimo local podem ser estimados pela seguinte expressão:

$$X_i = A_{j1}U_1 + A_{j2}U_2 + \dots + A_{jk}U_k + \dots + A_{jp}U_p \quad (3.10)$$

onde as variáveis de U_p é o conjunto dos autovetores de X ordenados por ordem decrescente dos autovalores mais significativos de a em k a , qual seja:

$$U_k = \sum_{j=1}^n a_{jk} X_k \quad (3.11)$$

O melhor ajuste das componentes é realizado através da explicação da variância, seguindo a ordem crescente dos autovalores. A soma dos autovalores representa a soma das variâncias centradas e normalizadas. Portanto, a porcentagem da variância explicada pelos autovalores, em ordem decrescente, é dada por:

$$\%Var(X) = \frac{\sum_{i=1}^q \lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (3.12)$$

O método de rotação ortogonal usado foi o VARIMAX, que maximiza a variância em cada componente. A correlação entre a i -ésima variável original e a i -ésima componente principal é dada por:

$$Coor(X_i Z_j) = a_{ij} \cdot \sqrt{\lambda_i} \quad (3.13)$$

a_{ij} é o j-ésimo elemento do i-ésimo autovetor e λ_i o i-ésimo autovalor.

4 RESULTADOS

4.1 Análise dos sistemas convectivos isolados e multicelular

Dentro do período em estudo, foram selecionados 412 dias nos quais os sete sensores EFM estiveram ativos. Desses 412 dias, foram identificados a atuação de Sistemas Convectivos, que com algoritmo Fortracc foram classificados esses eventos em Sistemas Convectivos Isolados e Sistemas Convectivos Multicelulares, conforme explicado no capítulo da metodologia. Ao todo, foram encontrados 72 casos de Sistemas Convectivos Isolados (Apêndice A) e 286 casos de Sistemas Convectivos Multicelulares (Apêndice B).

Durante a análise dos casos, foram identificadas duas situações distintas. No primeiro cenário, identificou-se Sistemas Convectivos sem ocorrência de descargas atmosféricas, porém, com perturbação no campo elétrico atmosférico. Já no segundo cenário, observou-se Sistemas Convectivos com ocorrência de descargas atmosféricas e perturbação no campo elétrico atmosférico. Essas situações ocorreram tanto para os Sistemas Isolados como para os Multicelulares. A Tabela 4.1 apresenta uma visão geral da distribuição. Para a análise desses casos, foram utilizadas imagens de radar e mapas de campo elétrico atmosférico, sobrepondo-se os dados de descargas atmosféricas.

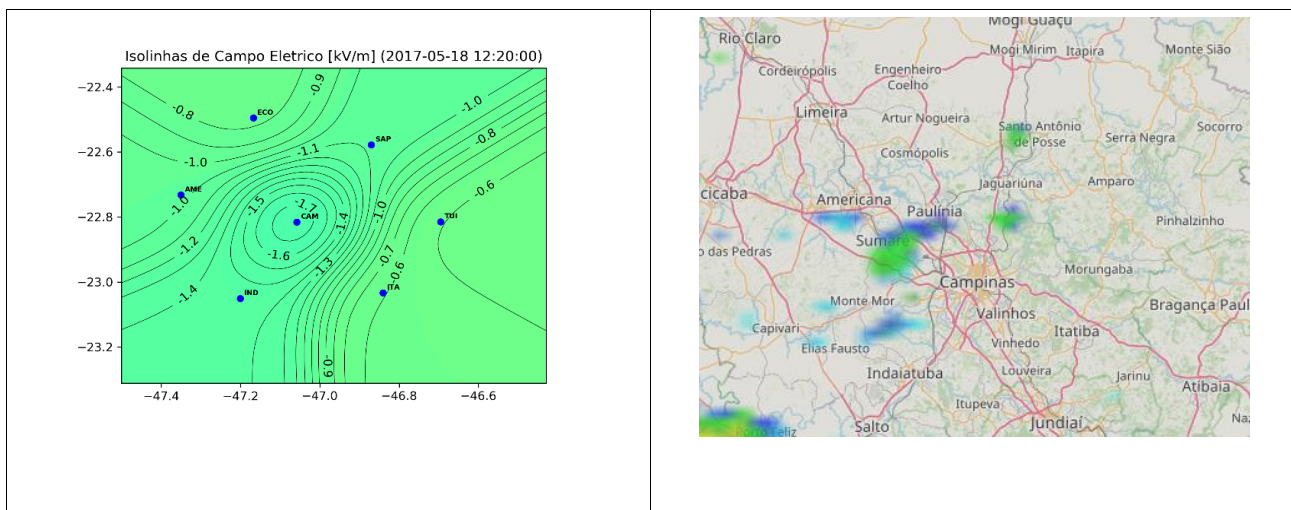
Tabela 4.1 - Quantidade de casos de Sistemas Convectivos sem e com incidência de descargas atmosféricas.

Sistemas Convectivos	Sem descargas atmosféricas	Com descargas atmosféricas
Isolados	53	19
Multicelular	130	156

4.1.1 Sistema convectivo isolado sem e com ocorrência de descargas atmosféricas

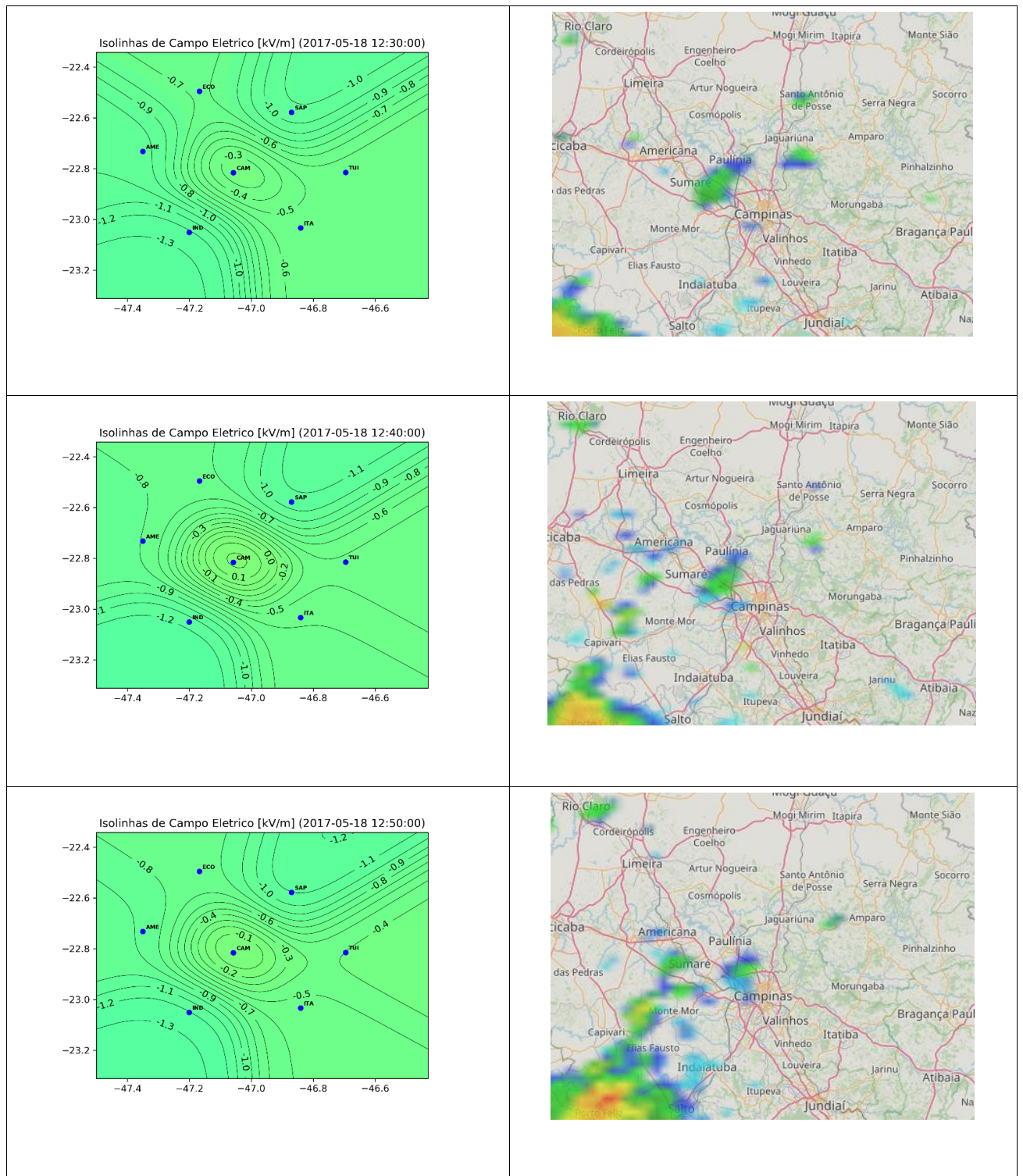
A Figura 4.1 apresenta um caso específico de um Sistema Convectivo Isolado que não apresentou incidência de descargas atmosféricas, porém, houve perturbação no campo elétrico atmosférico. Nesse caso em particular, o núcleo próximo ao município de Sumaré-SP começou a se intensificar e se deslocou lentamente em direção a Campinas. A partir das 12:20 UTC, pode-se observar um leve aumento da intensidade do campo elétrico e o surgimento de um padrão de linhas circulares, indicando que o núcleo está se aproximando do centro da rede. É importante ressaltar que, mesmo com o aumento da intensidade do campo elétrico, não foram detectadas descargas atmosféricas nesse núcleo. Após às 13:00 UTC, o núcleo em análise se fundiu com outros núcleos, transformando-se em um sistema multicelular.

Figura 4.1- Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 12:20 UTC às 13:00 UTC). Na coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM para o dia 18/05/2017, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.



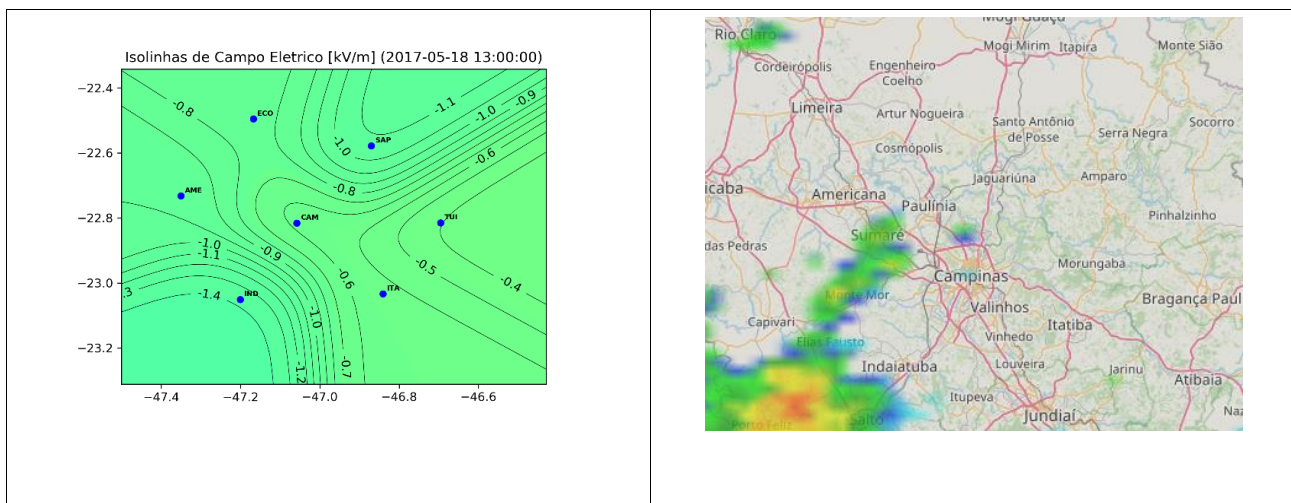
continua

Figura 4.1 – Continuação.



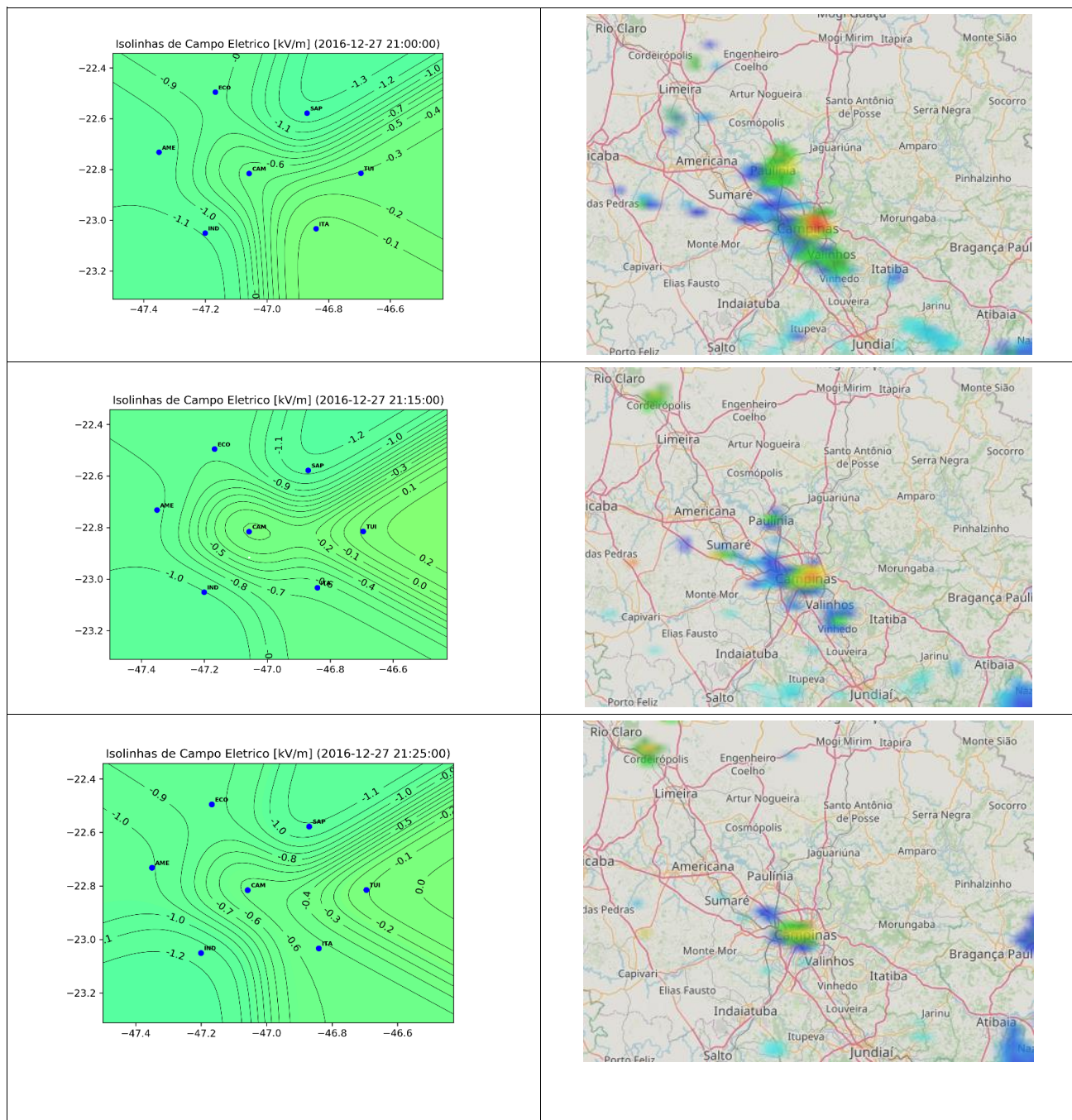
continua

Figura 4. 1 – Conclusão.



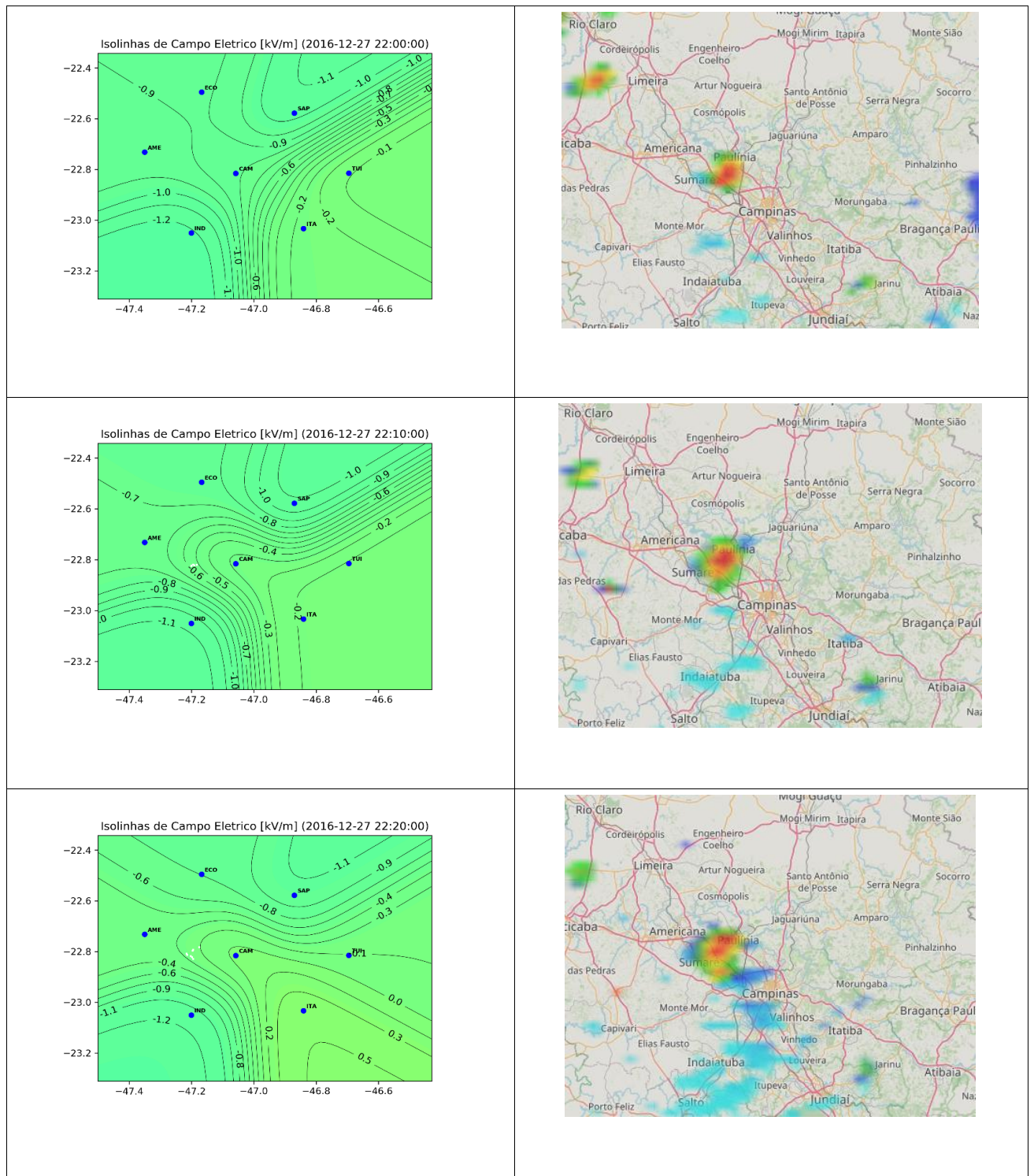
A Figura 4.2 apresenta um dos casos em que o Sistema Convectivo Isolado teve incidência de descargas atmosféricas e perturbação do campo elétrico atmosférico. Nesse caso específico, há um núcleo isolado e intenso próximo ao município de Campinas, localizado muito próximo da rede de sensores EFM. A partir das 22:10 UTC, o núcleo começa a gerar descargas atmosféricas, representadas pelos pontos brancos na imagem. Após 40 minutos, o campo elétrico atmosférico passa a apresentar um padrão circular, característico de um Sistema Convectivo Isolado localizado sobre a rede de sensores EFM. No entanto, esse padrão desaparece 10 minutos depois. A partir das 23:15 UTC, o sistema começa a se intensificar novamente, o que caracteriza um aumento na refletividade do radar e na quantidade de descargas atmosféricas. Mais uma vez, observa-se que as linhas do campo elétrico adquirem o padrão de linhas circulares. Após a incidência das descargas atmosféricas, ocorre uma inversão na polaridade do campo elétrico. A partir das 23:40 UTC, é possível notar a aproximação de um outro Sistema Convectivo, que perturba as linhas do campo elétrico atmosférico à leste. Posteriormente, esse núcleo se transforma em um sistema multicelular.

Figura 4.2 – Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 21:00 UTC às 23:55 UTC), descargas atmosféricas sobrepostos em pontos na cor branca. Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 27/12/2016, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.



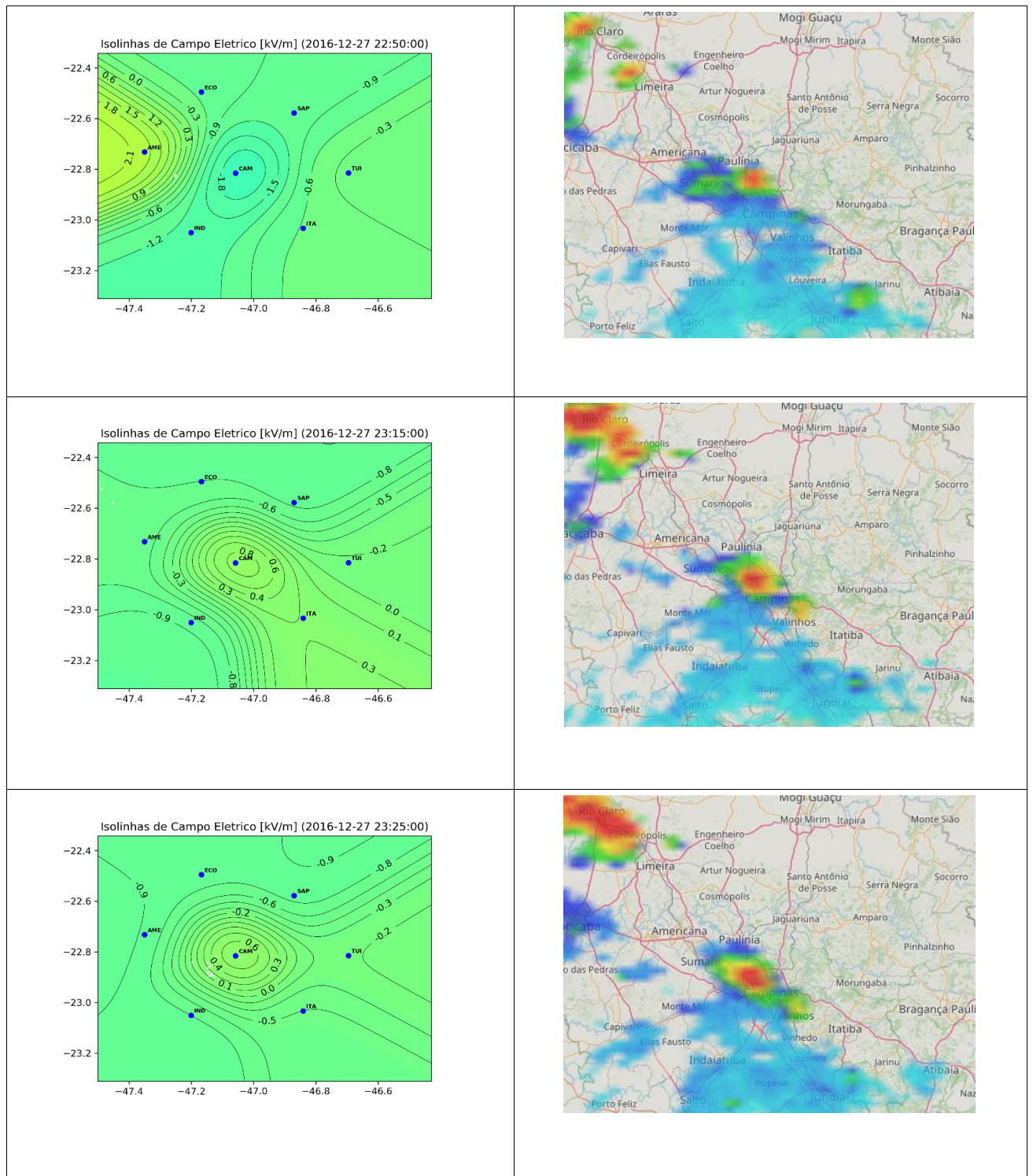
continua

Figura 4.2 – Continuação.



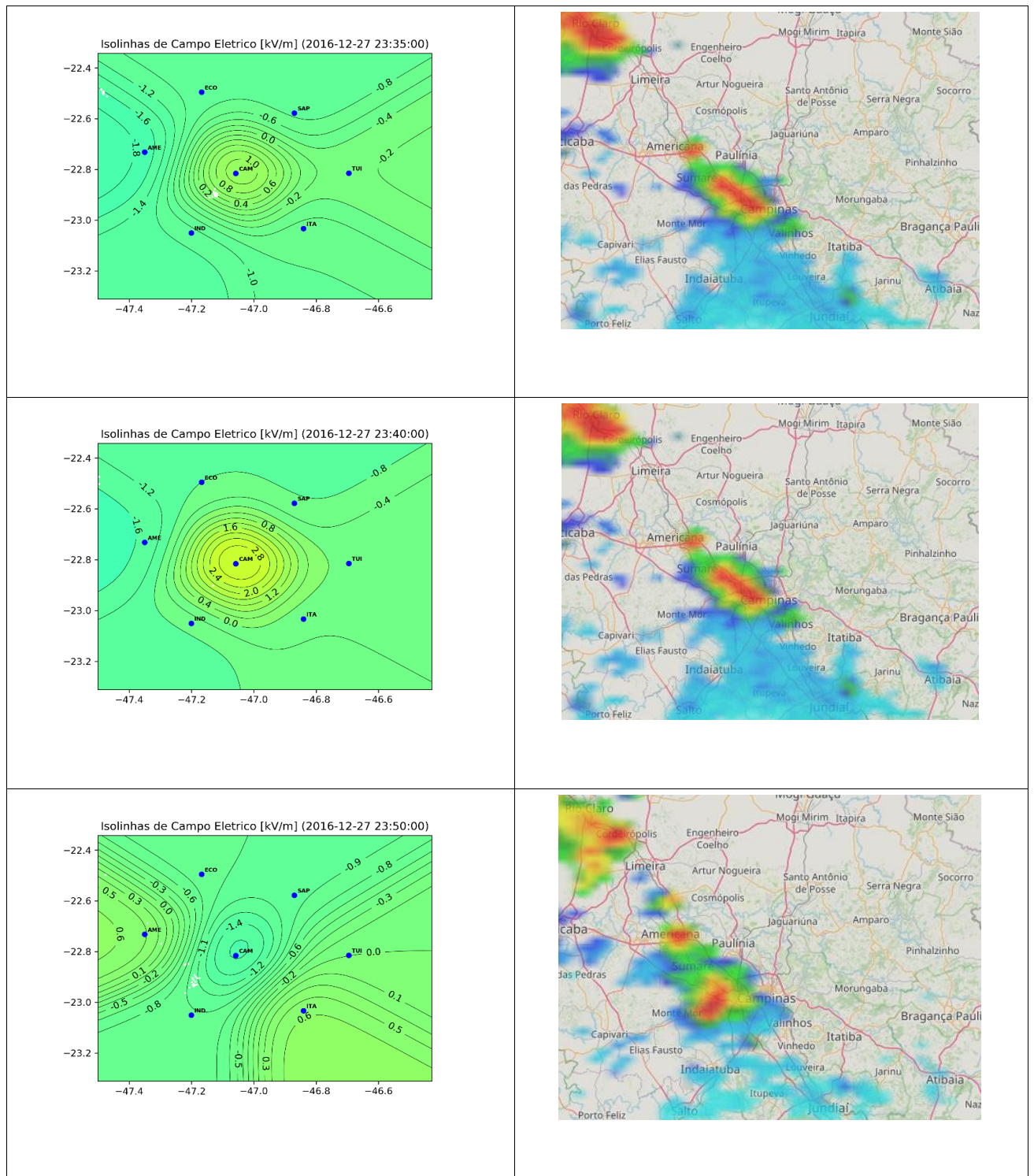
continua

Figura 4.2 – Continuação.



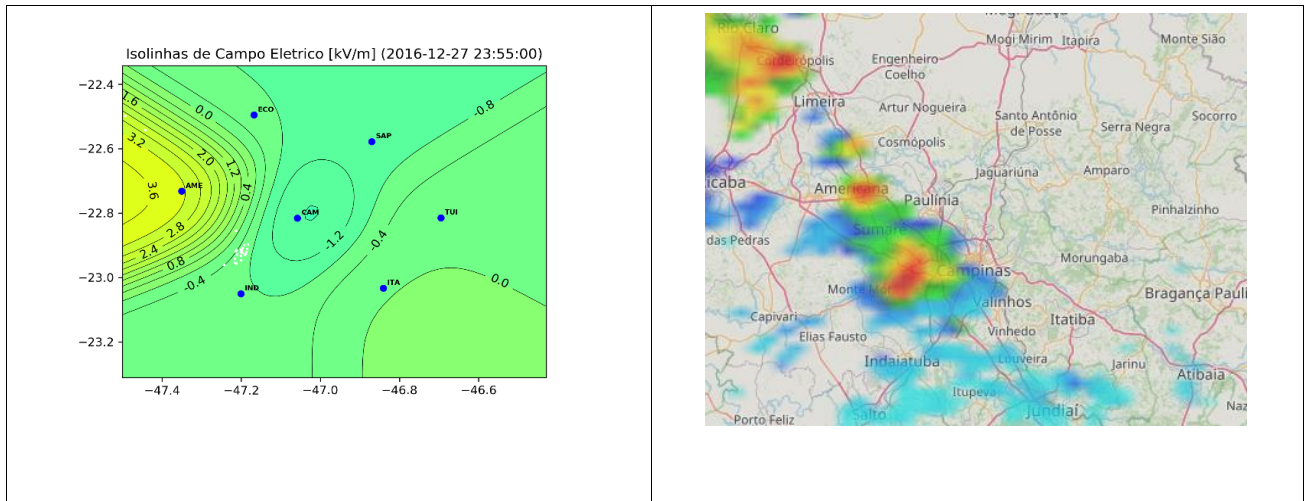
continua

Figura 4.2 – Continuação.



continua

Figura 4.2 – Conclusão.

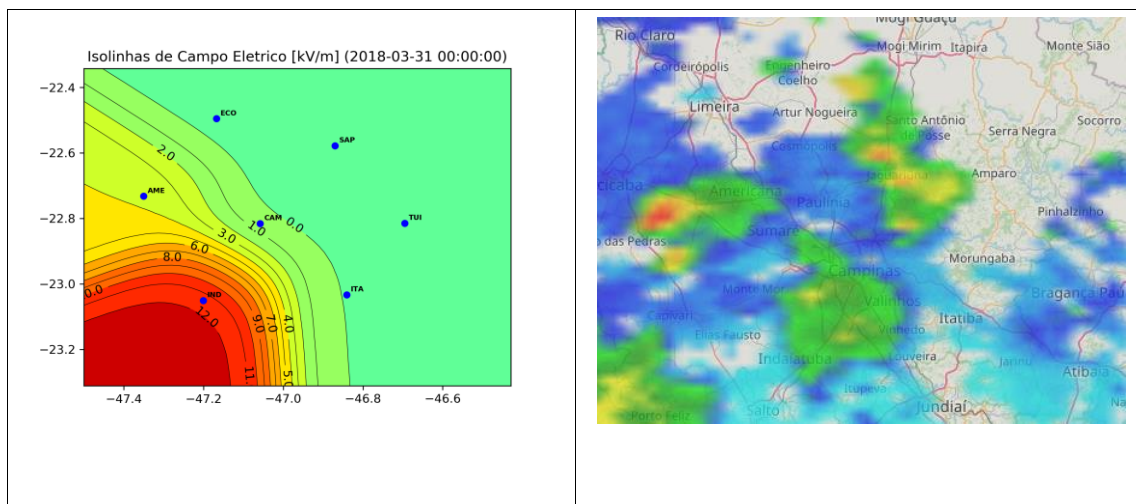


Os casos em que não ocorreram descargas atmosféricas confirmam que é possível que um sistema convectivo perturbe o campo elétrico atmosférico sem gerar descargas atmosféricas. Isso devido às variações na distribuição das cargas elétricas dentro das nuvens. Ao analisar os casos isolados de forma geral, observa-se que quando há mais de um núcleo convectivo dentro da área da rede de sensores EFM, mesmo que apenas um núcleo esteja gerando descargas atmosféricas, a perturbação do campo elétrico atmosférico não fica bem caracterizada apenas para esse núcleo, resultando em um padrão mais complexo. Outra observação é que os sistemas que se formaram em Campinas, localizada no centro da rede EFM, apresentaram linhas circulares fechadas de campo; já aqueles que ocorreram nas extremidades da rede não exibiram esse comportamento simplesmente pela assimetria das observações. Para que o campo elétrico tenha uma configuração circular, os centros de carga das nuvens devem estar sobre na região central da rede EFM. Quando isso não acontece, as medidas dos diferentes sensores da rede não levam a um padrão concêntrico após a interpolação.

4.1.2 Sistema convectivo multicelular sem e com ocorrência de descargas atmosféricas

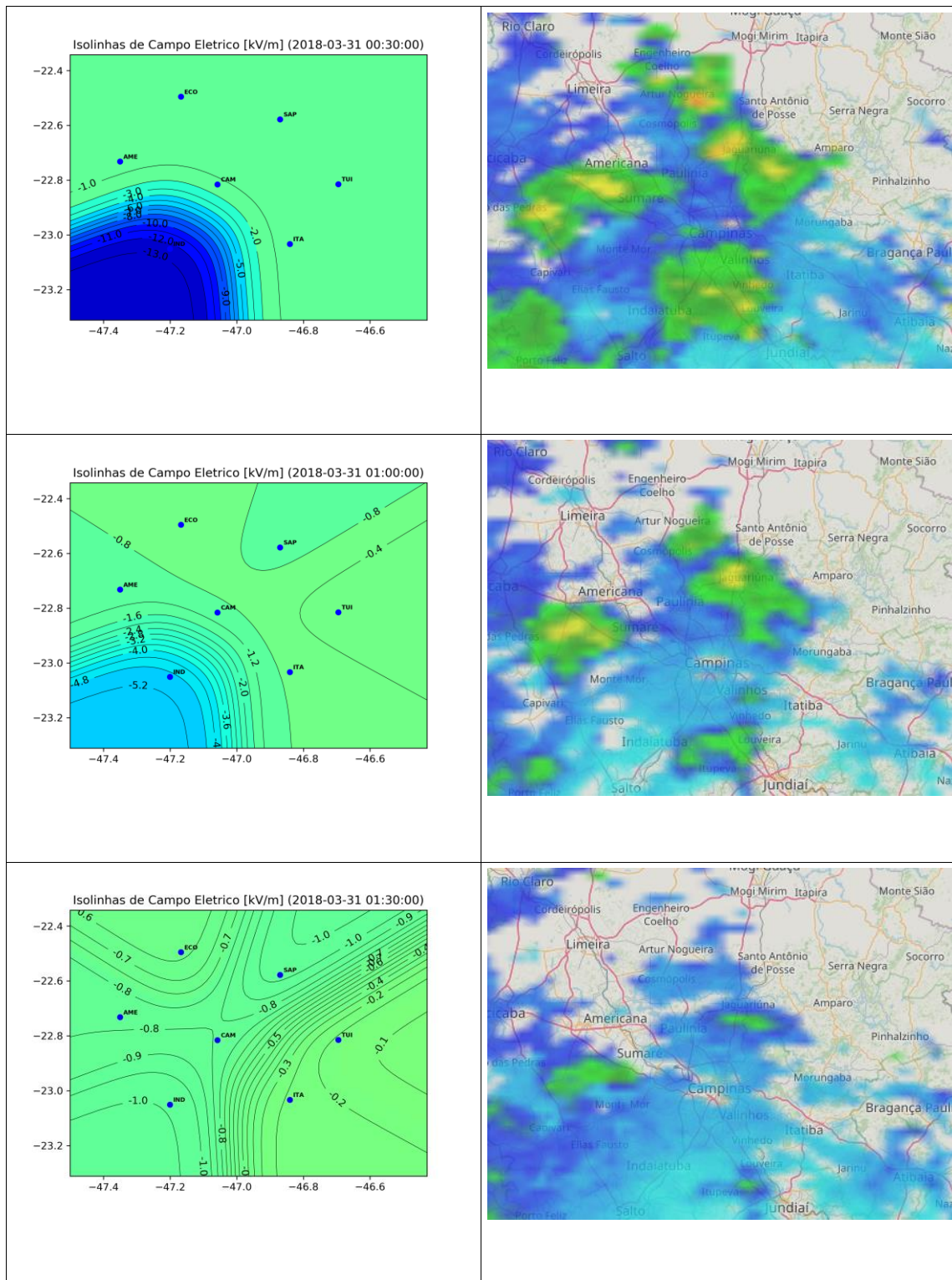
A Figura 4.3 apresenta um caso de sistema convectivo multicelular no qual não ocorreram descargas atmosféricas, mas houve perturbação no campo elétrico atmosférico. Esse caso específico ocorreu em 31 de março de 2018, entre 00:00 UTC e 01:30 UTC. Durante esse período, foram observados núcleos convectivos multicelulares relativamente intensos dentro da área estudada, mas sem a produção de descargas atmosféricas. No entanto, eles perturbaram as linhas do campo elétrico atmosférico. A partir das 01:30 UTC, os núcleos começaram a dissipar. Observa-se que os núcleos convectivos com maior refletividade têm um impacto maior na perturbação do campo elétrico.

Figura 4.3 - Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 00:00 UTC às 01:30 UTC). Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 31/03/2018, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.



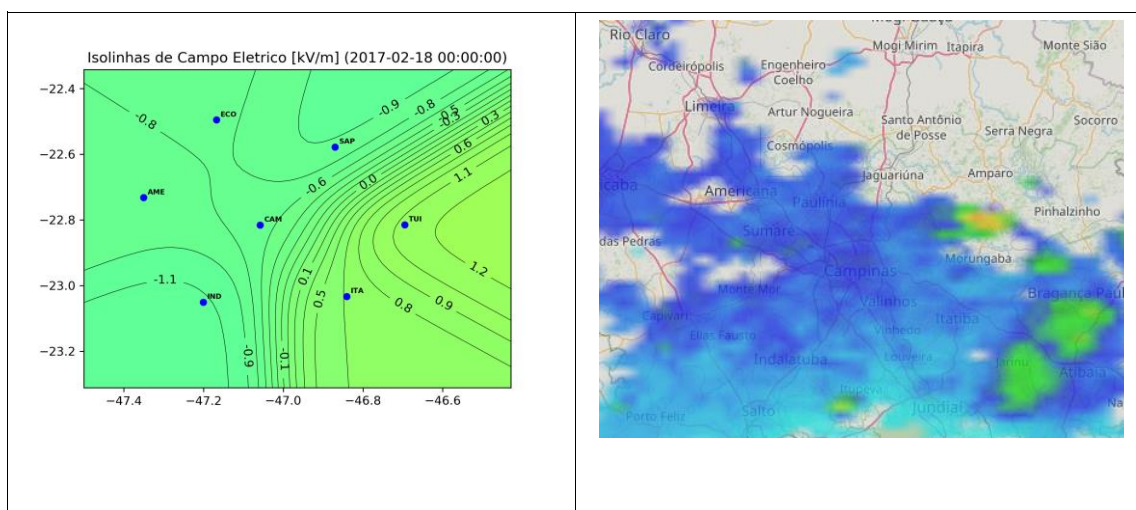
continua

Figura 4.3 – Conclusão.



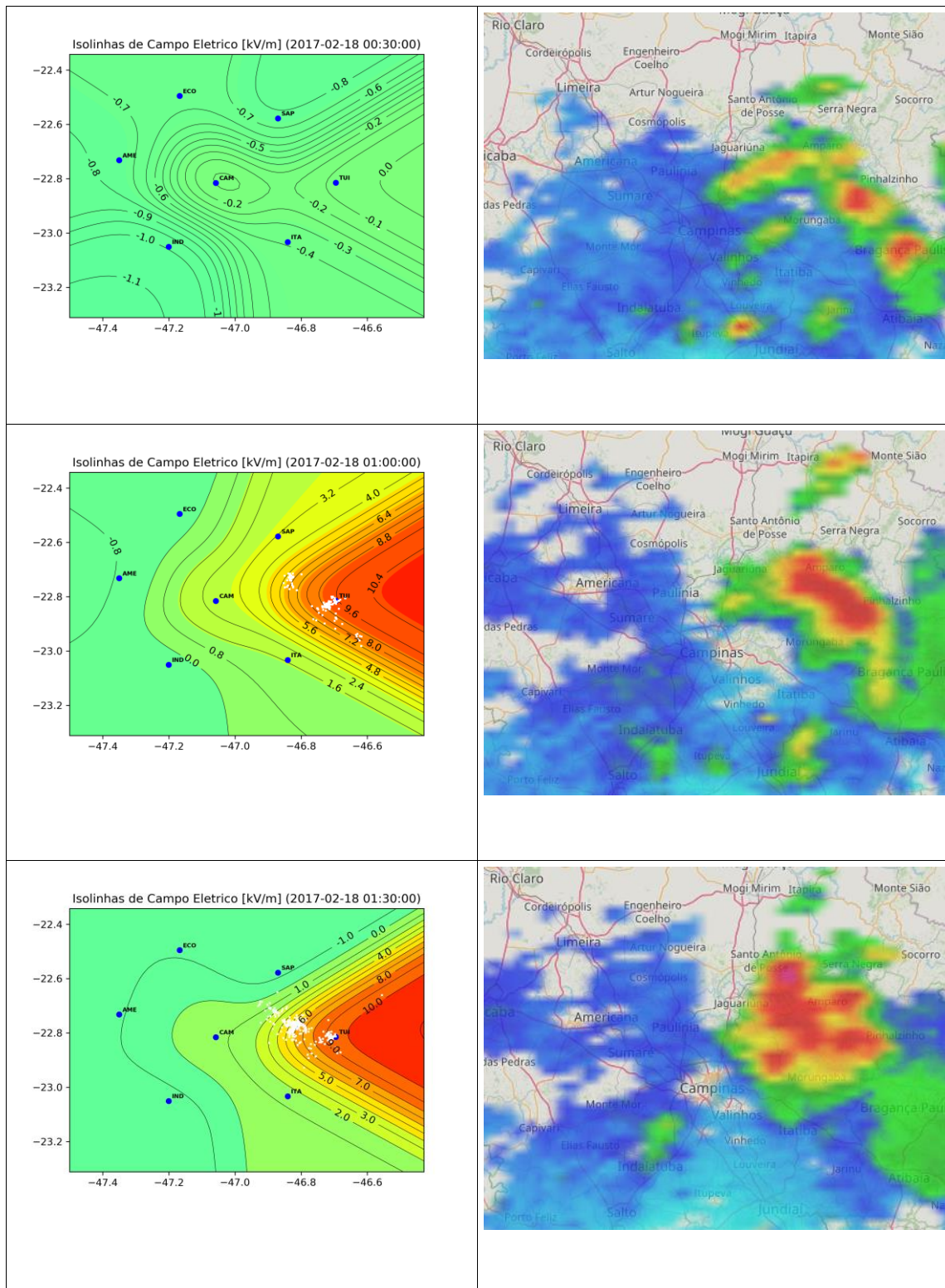
A Figura 4.4 apresenta um caso em que o sistema multicelular produziu descargas atmosféricas e perturbou as linhas do campo elétrico. Nesse caso, o sistema convectivo multicelular ocorreu em toda a área abrangida pela rede de sensores EFM. A partir das 00:00 UTC, esse sistema se intensificou, gerando descargas atmosféricas. Após as 05:00h, começou a se dissipar. É possível observar uma grande perturbação e intensificação nas linhas do campo elétrico, principalmente nas áreas onde ocorreram as descargas atmosféricas. A inversão de polaridade do campo elétrico está relacionada à ocorrência das descargas atmosféricas, que, por sua vez, resultam em um rearranjo dos centros de cargas dentro das nuvens, neutralizando parte dos centros negativos e expondo os centros positivos.

Figura 4.4 - Na coluna da esquerda mapas de campo elétrico com os horários descritos na figura (das 00:00 UTC às 05:00 UTC), descargas atmosféricas sobrepostos em pontos na cor branca. Coluna da direita recortes das imagens de radar referente a área da rede EFM no dia 18/02/2017, nos horários mencionados nos mapas de campo elétrico.



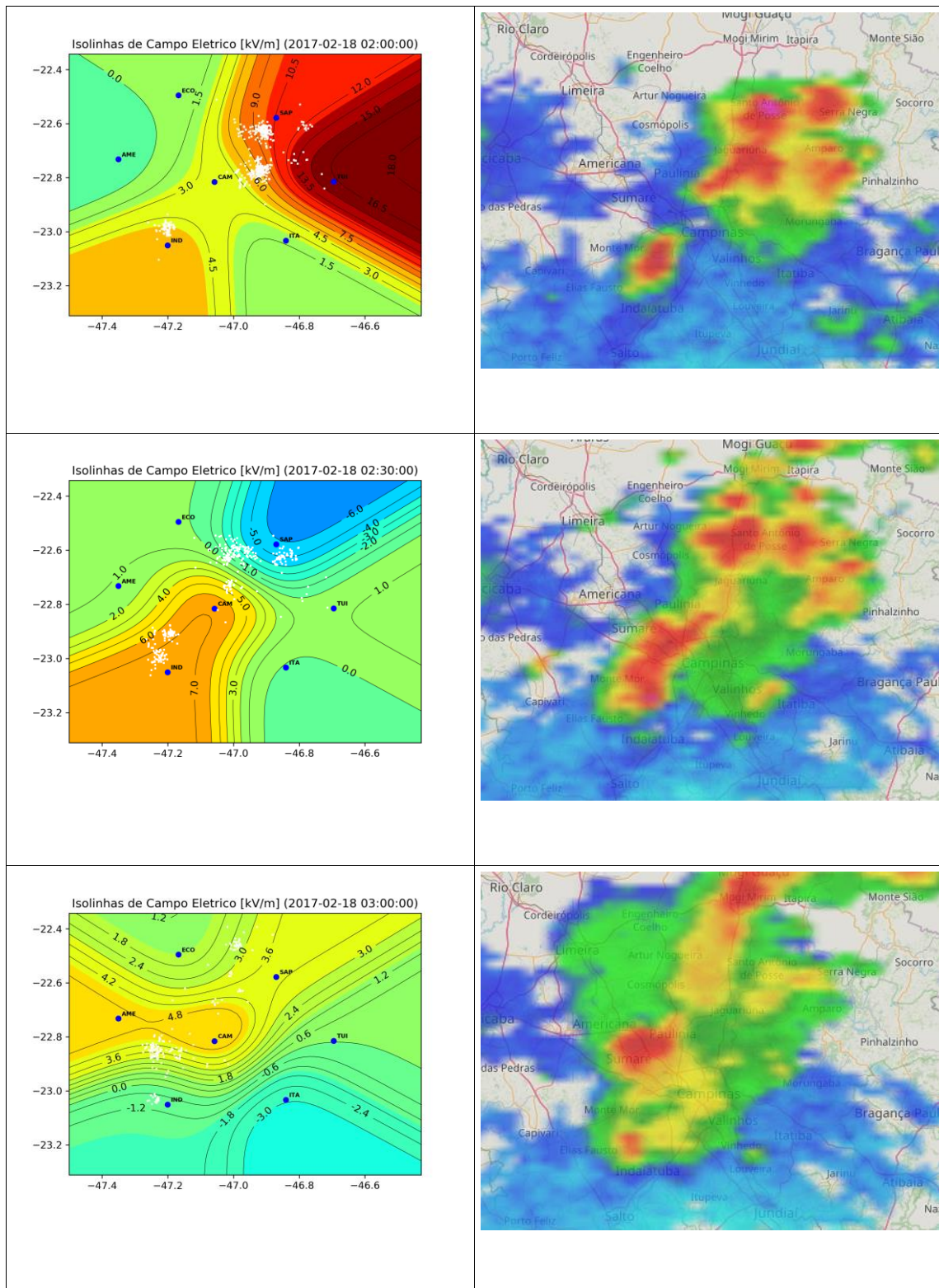
continua

Figura 4.4 – Continuação.



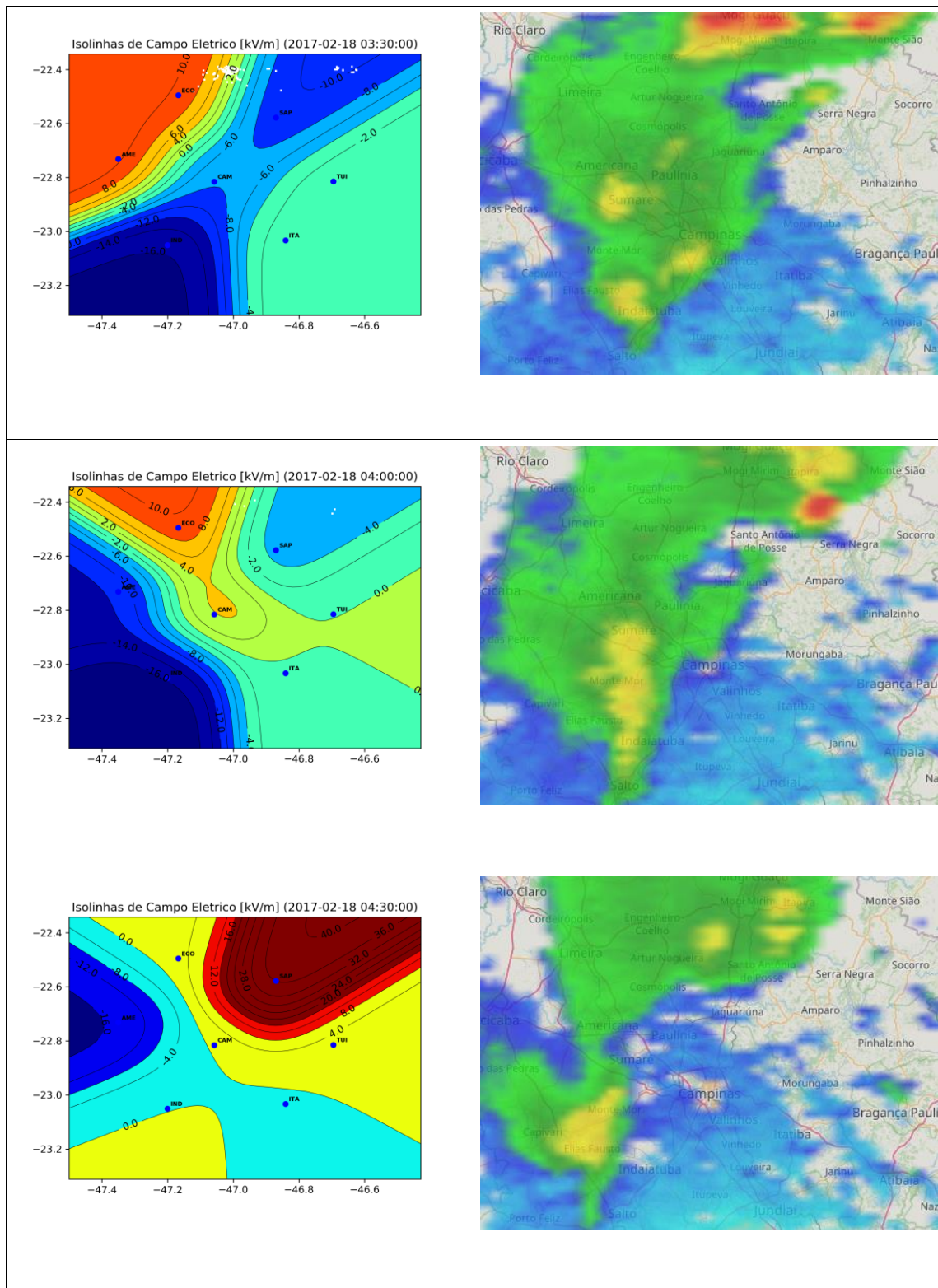
continua

Figura 4.4 – Continuação.



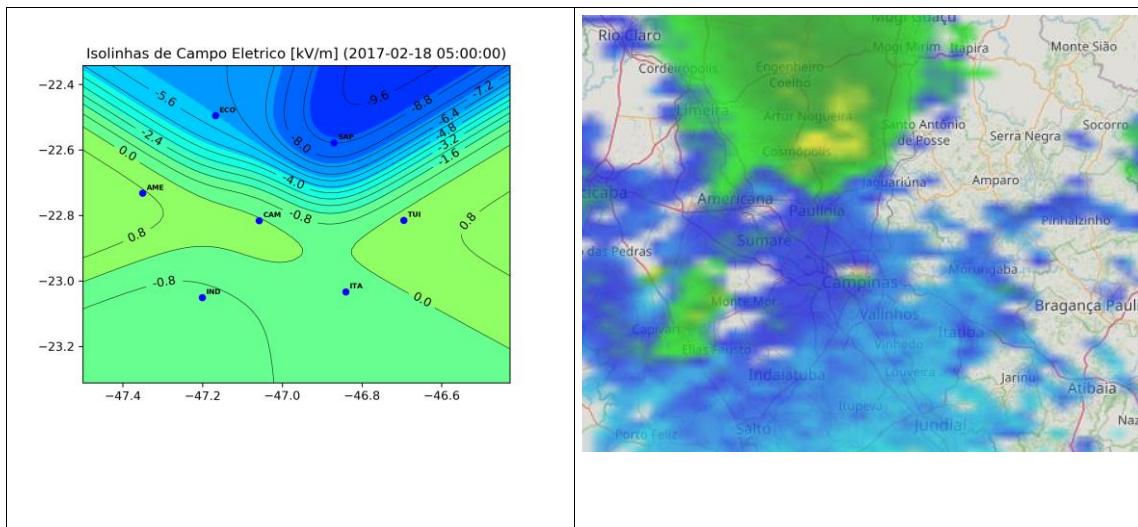
continua

Figura 4.4 – Continuação.



continua

Figura 4. 4 – Conclusão.



Ao analisar todos os casos de sistemas multicelulares, independentemente da produção ou não de descargas atmosféricas, observa-se uma grande semelhança entre eles. Na maioria dos casos, nota-se a assinatura de um campo elétrico intenso, com padrões complexos. A explicação para isso está na complexidade dos centros de carga dentro desses sistemas multicelulares. Os diversos núcleos convectivos geram várias estruturas tripolares ou multipolares as quais produzem na superfície um padrão de campo sobreposto, gerando configurações complexas. Além disso, por serem sistemas maiores em comparação com os isolados, eles extrapolam os limites da rede de sensores EFM, provocando a assimetria na interpolação, conforme já discutido anteriormente.

Tanto para os Sistemas Isolados quanto para os Multicelulares, observou-se que, quanto maior a refletividade(dBz) do núcleo convectivo, mais intensa é a perturbação do campo elétrico atmosférico. Isso é um comportamento esperado pois os valores mais altos de refletividade do radar estão associados à presença de gelo dentro da nuvem. O gelo é o elemento fundamental nos processos de eletrificação das nuvens, separando cargas e formando os centros de carga em estruturas tipicamente tripolares. Dessa forma, quanto mais gelo houver no núcleo convectivo, maior a refletividade do radar, mais

intensos os processos de eletrificação, maiores os campos elétricos produzidos (WILLIAMS, 1989; SAUNDERS, 2006; RAKOV, 2016).

4.2 Análise do campo elétrico utilizando a EOF

4.2.1 Análise da EOF para sistemas convectivos isolados e multicelulares

Neste tópico foram realizados a EOF para os dois casos de forma separada, ou seja, foram aplicados a EOF para o conjunto total de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas e outra para os casos isolados com incidência de descargas atmosféricas. O mesmo procedimento foi adotado para os casos multicelular. É importante destacar que, para os casos em que não houve incidência de descargas atmosféricas, isso ocorreu para toda a área de estudo.

Na Figura 4.5, são apresentados os sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas. Os quatro primeiros modos da EOF representam 81,6% da variação dos casos estudados, o que significa que esses quatro modos representam uma boa parte da variabilidade espacial do campo elétrico atmosférico, mas não sua totalidade. Especificamente, o primeiro modo representa 42,7% da variação, o segundo 16,6%, o terceiro 11,9% e o quarto 10,4%.

Com o objetivo de buscar um padrão de comportamento espacial do campo elétrico atmosférico, serão analisados os quatro modos da EOF de forma conjunta. Os dois primeiros modos da EOF, que juntos representam 59,3% da variabilidade dos dados, indicam um padrão de campo elétrico com formato circular no centro da rede de sensores EFM. Já os outros dois modos da EOF (22,3% da variabilidade) mostram um padrão diferente. Isso ocorre, muito provavelmente, porque alguns sistemas isolados ocorreram nas extremidades da rede, causando assimetria na interpolação das medidas individuais, o que impede a formação do padrão concêntrico. A predominância dos casos isolados no centro da rede EFM pode ser atribuída à existência da ilha de calor na região metropolitana de Campinas, a qual se caracteriza pelo maior

aquecimento da área urbana em comparação com as áreas circunvizinhas, provocando assim maior instabilidade atmosférica e favorecendo a formação dos sistemas isolados (NACCARATO et. al, 2003).

Na Figura 4.6, são apresentados os sistemas convectivos isolados com incidência de descargas atmosféricas. Os quatro primeiros modos da EOF representam 86,1% da variação dos casos analisados. O primeiro modo representa 41,4% da variação, o segundo 21,1%, o terceiro 12,7% e o quarto 10,9%. Nesse caso, cada modo indicou um padrão espacial de campo elétrico atmosférico distinto, sendo que o padrão concêntrico ocorreu apenas no primeiro modo.

Ao comparar as Figuras 4.5 e 4.6, observa-se que somente o primeiro e segundo modos indicam um comportamento similar do campo elétrico atmosférico (casos com e sem descargas atmosféricas). Observa-se que o primeiro modo, para ambos os casos, apresenta o mesmo padrão concêntrico de perturbação do campo, caracterizado por elevado gradiente e abrangendo uma área de aproximadamente 100km x 100km. Já o segundo modo apresenta uma grande semelhança para ambos os casos, indicando, no entanto, variações espaciais do campo elétrico atmosférico com gradiente menores, sendo que o caso sem descargas atmosféricas ainda apresente a conformação concêntrica. Isso pode ser explicado pela melhor configuração circular do campo elétrico quando não ocorrem descargas atmosféricas, as quais descarregam os centros de cargas e, com isso, produzem padrões de campo menos regulares. Esse segundo modo tende a representar também os casos em que o núcleo convectivo isolado ocorreu nas extremidades da rede. Todas essas observações sugerem que os primeiros dois modos da EOF são consistentes em ambos os conjuntos de dados analisados, indicando dois padrões comuns de perturbação no campo elétrico atmosférico.

Figura 4.5 – EOF para os casos de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas.

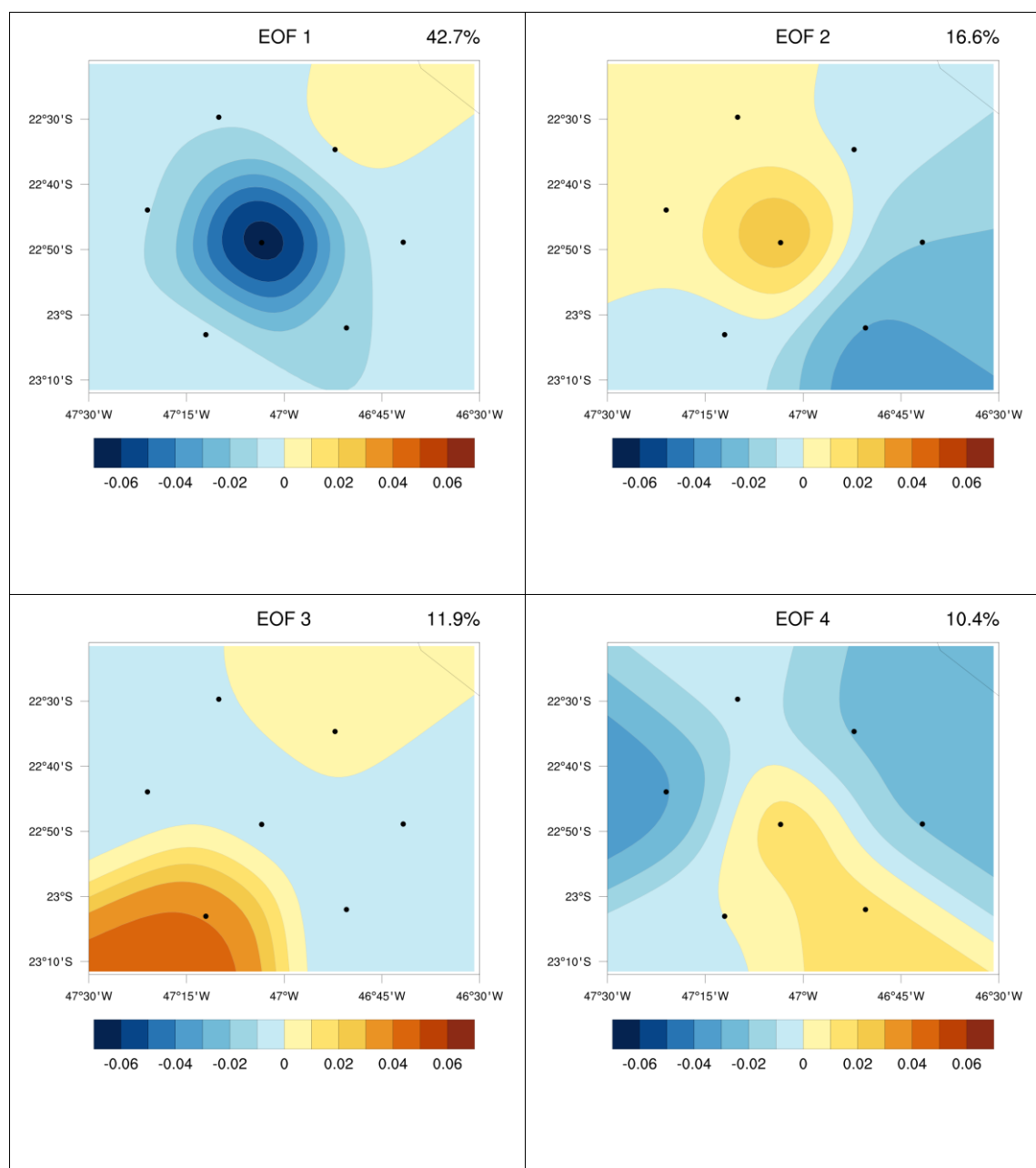
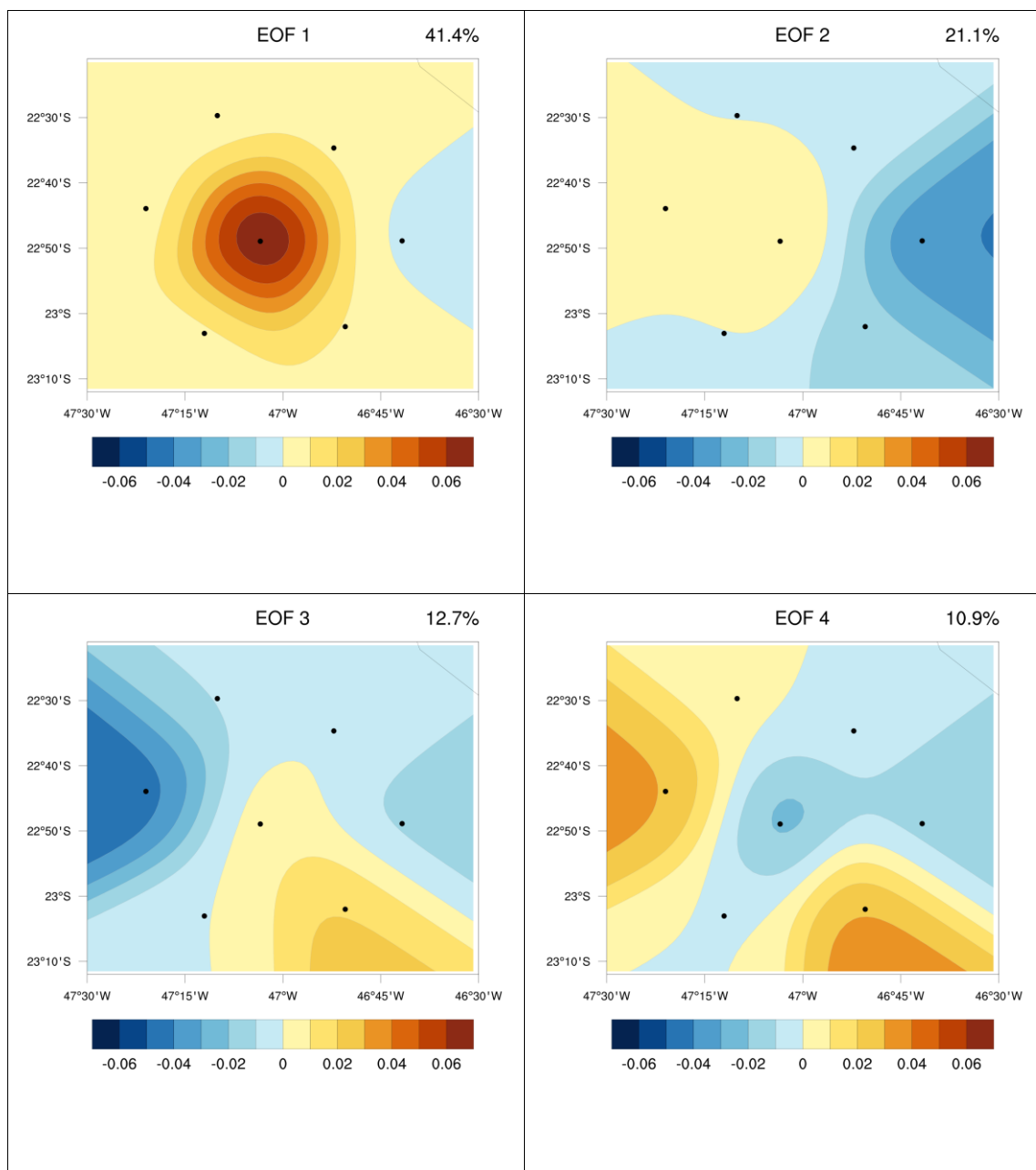


Figura 4.6 – EOF para os casos de sistemas convectivos isolados com incidência de descargas atmosféricas.



Na Figura 4.7, que apresenta os sistemas convectivos multicelulares sem incidência de descargas atmosféricas, os quatro modos da EOF representam 85,3% da variação dos casos. O primeiro modo representa 31,2% da variabilidade, o segundo 27,2%, o terceiro 18,2% e o quarto 8,7%. Na Figura

4.8, que mostra os sistemas convectivos multicelulares com incidência de descargas atmosféricas, os quatro primeiros modos representam 85,2% da variação dos dados. O primeiro modo representa 34,1%, o segundo 21,3%, o terceiro 19,5% e o quarto 10,3%.

Observa-se uma grande semelhança nos padrões espaciais do campo elétrico atmosférico entre três modos dos casos com e sem incidência de descargas atmosféricas: primeiro e quarto. Isso sugere que, para os sistemas convectivos multicelulares, de uma forma geral, a perturbação do campo elétrico independe da incidência de descargas atmosféricas, estendendo-se por uma área de aproximadamente 150km x 150km. Por outro lado, ao analisar o segundo e terceiro modos para ambos os casos (com e sem incidência de descargas atmosféricas), observa-se uma característica que parece estar relacionada muito mais com o deslocamento do sistema do que com a produção de descargas atmosféricas em si. Nas análises individuais dos casos, observou-se que a maioria desses sistemas teve início na região de relevo elevado a leste da área de estudo, deslocando-se para oeste, conforme o padrão de escoamento predominante, que ocorre na maioria das vezes no sentido anti-horário, transportando umidade do oceano para o continente. Com isso, o deslocamento leste-oeste desses sistemas geraria padrões de campo opostos, conforme os observados no segundo e terceiro modos, devido à passagem sobre a rede de EFM gerando assimetrias nas extremidades.

Ao comparar as análises dos sistemas convectivos isolados com os multicelulares, observa-se que, nos sistemas isolados, o padrão de campo elétrico atmosférico apresenta uma conformação mais bem definida, com a predominância do formato concêntrico no primeiro e segundo modos e com gradientes mais intensos. Já os sistemas multicelulares, o padrão do campo elétrico atmosférico apresenta gradientes menos acentuados e conformações espaciais mais irregulares. Isso ocorre fundamentalmente devido às diferentes características físicas desses dois tipos de sistemas convectivos. Os sistemas isolados possuem escala espacial menor do que os multicelulares, justamente

por serem compostos por um único núcleo convectivo. Dessa forma, é possível observar a característica concêntrica do campo elétrico gerado por esses sistemas quando estão sobre o centro da rede de sensores EFM, possibilitando também se registrar gradientes mais intensos. Por outro lado, nos sistemas multicelulares, como o próprio nome diz, surgem vários núcleos convectivos de forma simultânea, cada um com seus respectivos centros de carga. Essa sobreposição de efeitos dos diferentes núcleos convectivos resulta muitas vezes no cancelamento e/ou intensificação das contribuições aos valores de campo elétrico atmosférico observados pela rede de sensores EFM na superfície, produzindo assim padrões espaciais mais complexos, caracterizados por gradientes mais fracos e conformações mais espaçadas. Além disso, os sistemas multicelulares, devido ao seu deslocamento, geram assimetrias nas medidas dos valores de campo, cujo resultado são padrões de campo não tão bem definidos gerados pela interpolação nas extremidades da rede de sensores EFM.

Figura 4.7 – EOF para os casos de sistemas convectivos multicelular sem incidência de descargas atmosféricas.

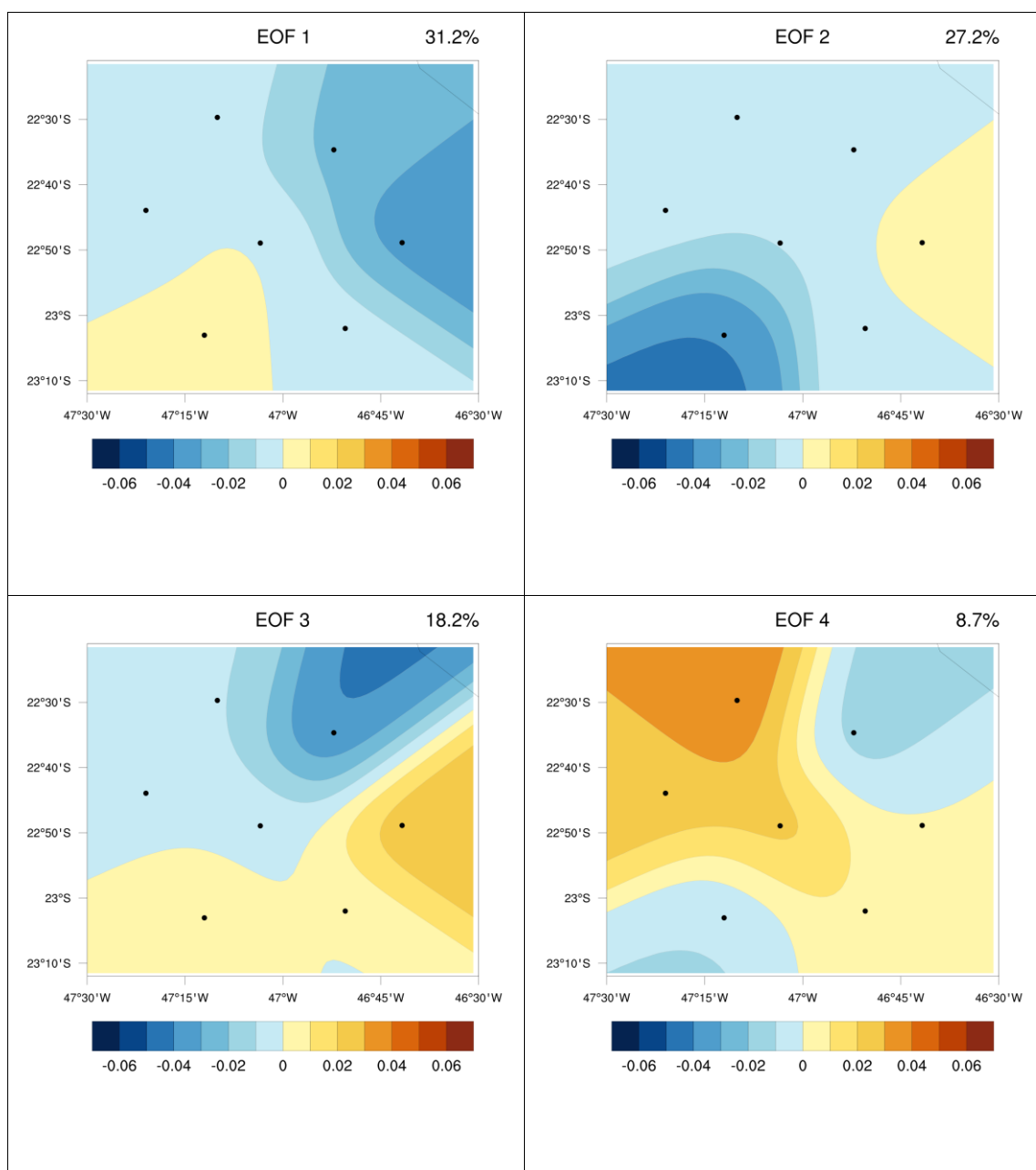
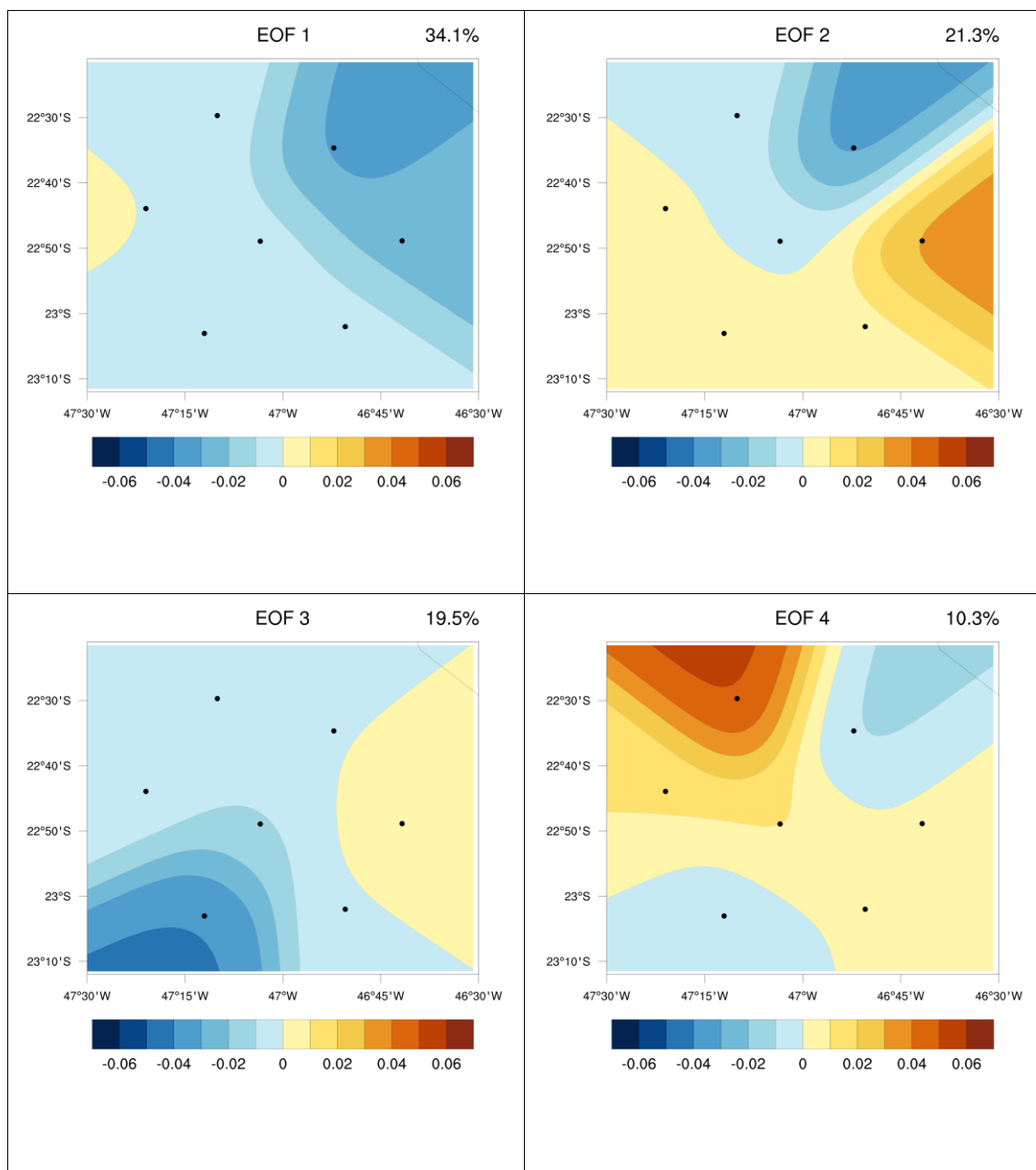


Figura 4.8 – EOF para os casos de sistemas convectivos multicelular com incidência de descargas atmosféricas.



4.2.2 Análise da EOF para diferentes taxas de descargas atmosféricas

Considerando agora todos os casos de sistemas convectivos isolados e multicelulares com incidência de descargas atmosféricas, calculou-se a taxa de descargas atmosféricas para cada um desses sistemas. Nesse sentido, os

valores de campo elétrico atmosférico foram registrados a cada 5 minutos enquanto os dados de descargas atmosféricas foram acumulados nos mesmos 5 minutos, conforme detalhado na metodologia. Como a quantidade de casos que registraram taxa de descargas atmosféricas média e alta, optou-se por combinar todos esses casos na análise, atribuindo-lhes uma taxa média/alta.

Na Figura 4.9, são apresentadas as EOFs para a taxa baixa de descargas atmosféricas de todos os sistemas convectivos isolados e multicelulares. Os quatro modos da EOF representam 85,3% da variação total dos dados, sendo que o primeiro modo representa 34,8%, o segundo 21,1%, o terceiro 19,3% e o quarto 10,1%. Observa-se que o padrão espacial do campo elétrico atmosférico apresentado é bastante semelhante ao padrão espacial encontrado na análise anterior dos sistemas multicelulares. Isso mostra a predominância do padrão de campo elétrico atmosférico dos sistemas multicelulares sobre o padrão dos sistemas isolados. Além disso, uma vez que as análises anteriores mostraram não haver diferenças significativas entre os padrões espaciais do campo elétrico para sistemas com e sem descargas atmosféricas, então espera-se que efetivamente não haja nenhuma relação entre o padrão observado e a taxa de ocorrência de descargas atmosféricas.

A Figura 4.10 apresenta a análise da EOF para todos os sistemas com taxa média/alta de descargas atmosféricas. Os quatro modos da EOF representam 83,6% da variação total dos dados, onde o primeiro modo representa 31,5% da variação, o segundo 21,7%, o terceiro 19,3% e o quarto 11,1%. Conforme esperado, observa-se que os padrões espaciais do campo elétrico atmosféricos são muito semelhantes aos padrões encontrados para sistemas com baixa taxa de descargas atmosféricas, os quais, por sua vez, são dominados pelos padrões dos sistemas multicelulares.

A Figura 4.11 apresenta a análise da EOF para os sistemas isolados e multicelulares sem a incidência de descargas atmosféricas. Os quatro modos da EOF representam 82,7% da variação total dos dados, onde o primeiro modo representa 29,4% da variação, o segundo 25,7%, o terceiro 17,1% e o quarto

10,5%. Observa-se novamente a semelhança desses padrões com aqueles mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, confirmando que padrão do campo elétrico atmosférico independe da incidência de descargas atmosféricas.

Com base nos resultados das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, a predominância dos padrões de campo elétrico atmosférico dos sistemas multicelulares ocorre pois eles são mais frequentes que os sistemas isolados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo observados ao longo de todo o ano (MINUZZI et al., 2010; MOTA, 2003; ZIPSER et al., 2006). Além disso, por apresentarem vários núcleos convectivos, sua estrutura elétrica torna-se muito mais complexa, produzindo assim padrões de campo elétrico mais irregulares, conforme já discutido anteriormente.

Figura 4.9 – EOF para os casos de taxa baixa de descargas atmosféricas.

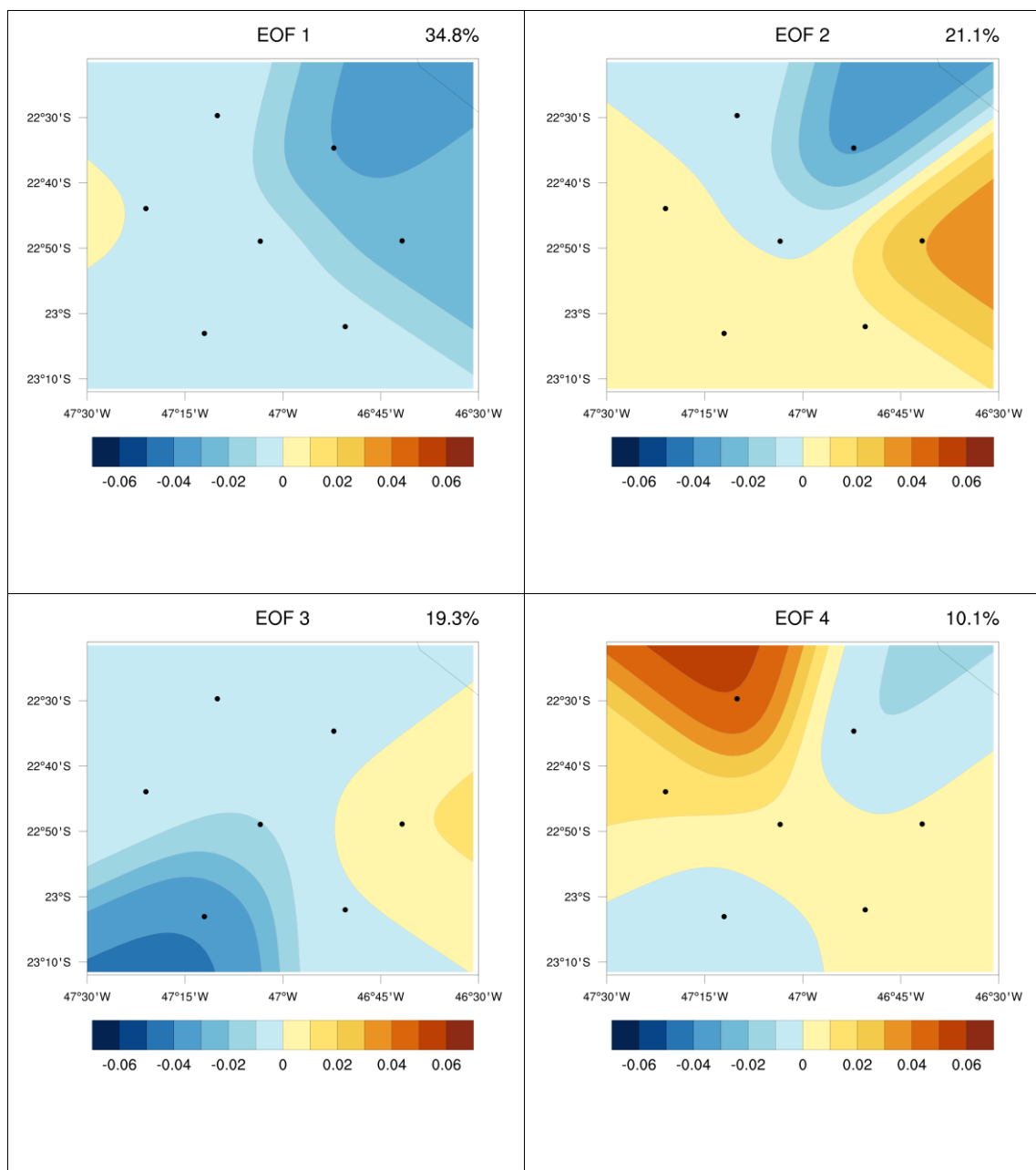


Figura 4.10 – EOF para os casos de taxa média/alta de descargas atmosféricas.

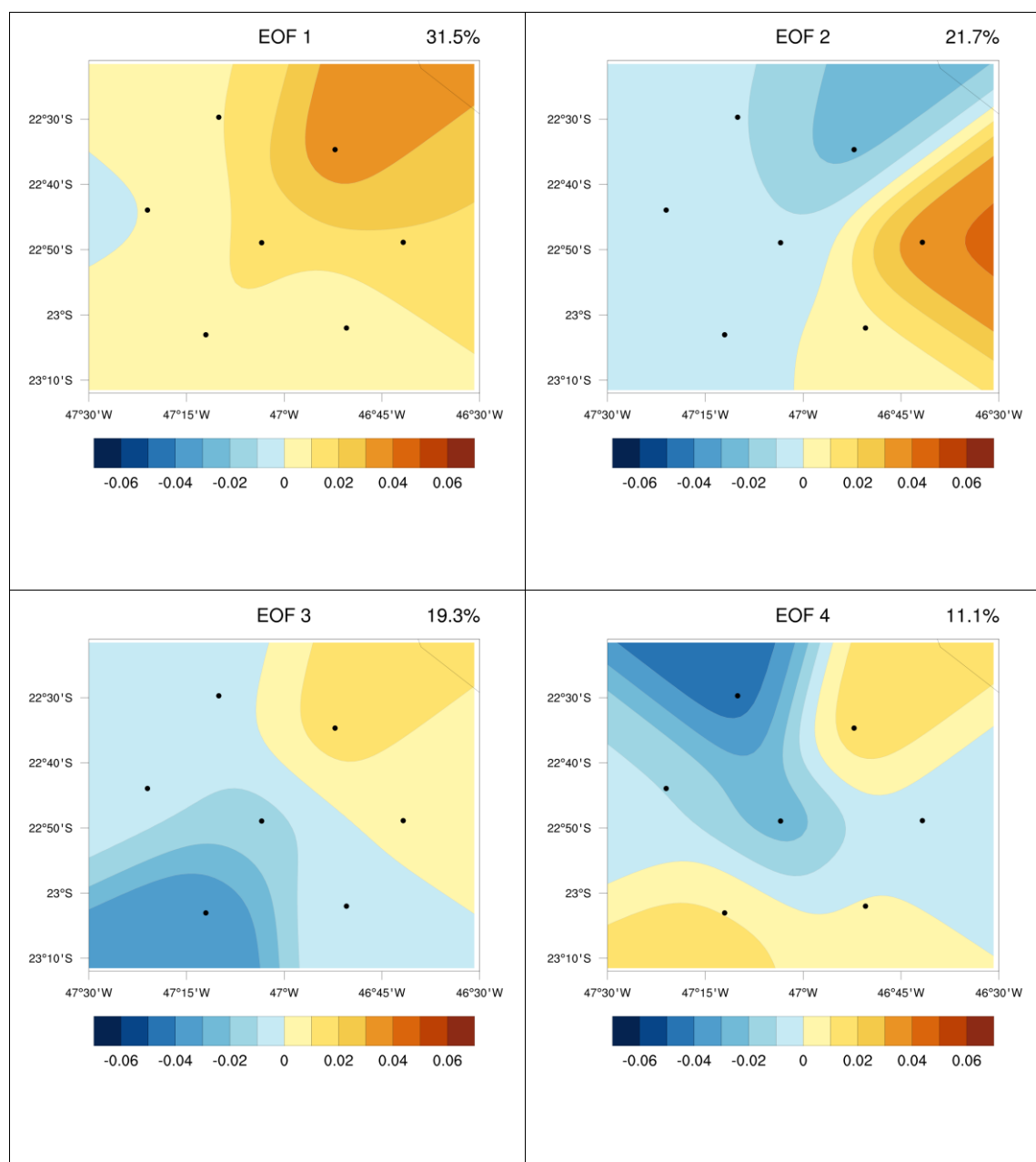
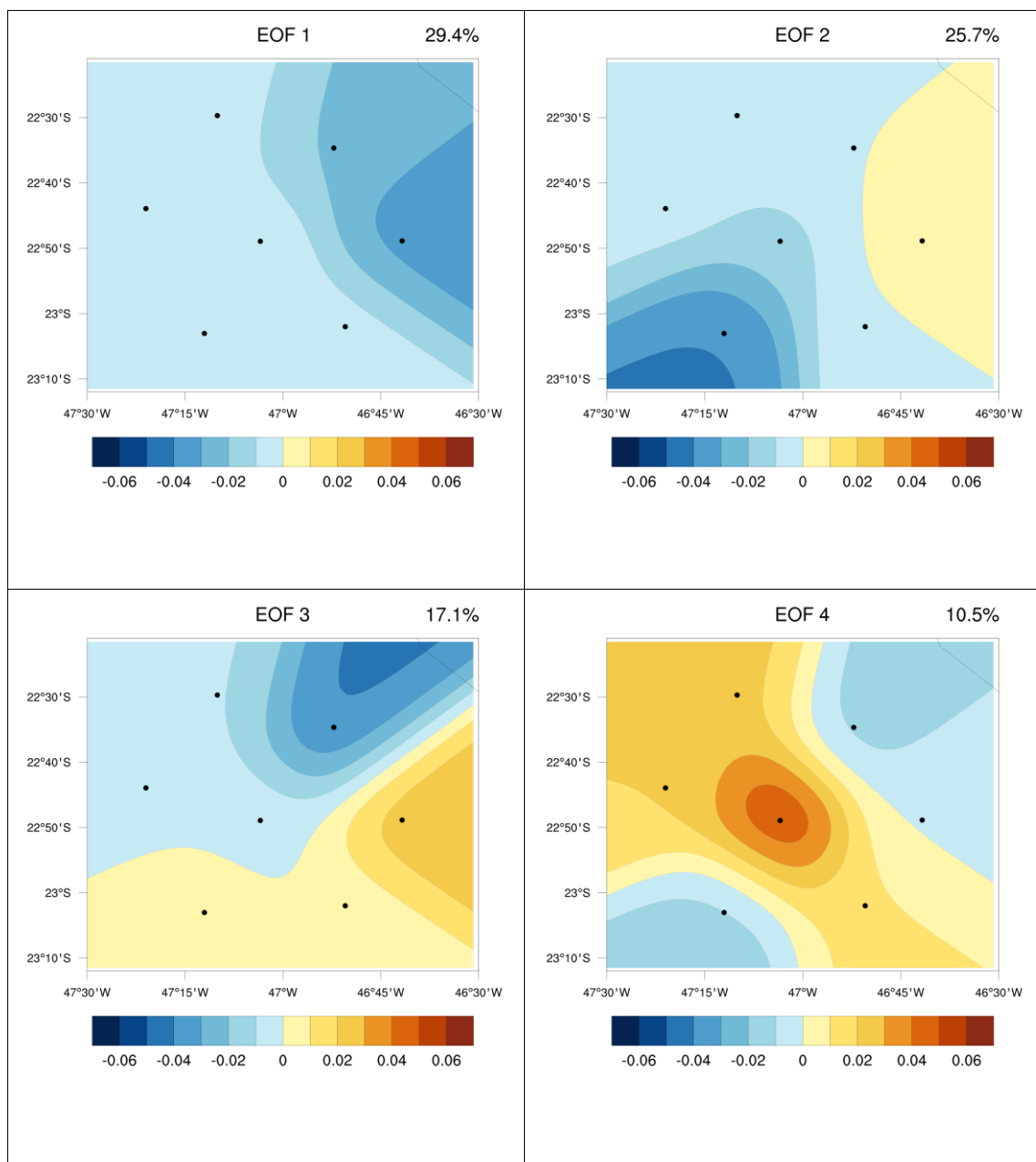


Figura 4.11 – EOF para os casos sem incidência de descargas atmosféricas.



4.2.3 Análise da EOF para estações chuvosa e seca

Nesta análise, todos os casos de sistemas convectivos isolados e multicelulares foram separados em duas categorias: ocorrência durante a estação chuvosa (meses de outubro à março), sem e com incidência de

descargas atmosféricas, e ocorrência durante a estação seca (meses de abril à setembro), sem e com incidência de descargas atmosféricas.

A Figura 4.12 apresenta os quatro primeiros modos da EOF na estação chuvosa sem incidência de descargas atmosféricas, os quais representam 81,2% da variação total dos dados. O primeiro modo representa 32% da variabilidade, o segundo modo 20,7%, terceiro modo 17,7% e quarto modo 10,8%. Já a Figura 4.13 apresenta os quatro primeiros modos da EOF na estação chuvosa com incidência de descargas atmosféricas, que representam 81,8% da variação total dos dados. O primeiro modo representa 35,3% da variabilidade, o segundo 18,3%, o terceiro 16,9% e o quarto 11,3%.

Ao analisar os modos da EOF na estação chuvosa, com ou sem incidência de descargas atmosféricas, observa-se padrões de campo elétrico atmosférico relacionados ao deslocamento de leste para oeste dos sistemas, de forma semelhante ao que já foi observado na Seção 4.2.1. Considerando agora cada um dos modos, observa-se que os padrões de campo com ocorrência de descargas atmosféricas diferem dos padrões sem ocorrência de descargas, tanto com relação à configuração espacial quanto ao sinal da EOF. Algumas características são comuns, porém várias outras não. Isso mostra que a dinâmica desses sistemas é complexa, o que dificulta a identificação de padrões de campo elétrico atmosférico, especialmente na estação chuvosa. Embora a formação destes sistemas convectivos na região Sudeste do Brasil ocorra ao longo de todo o ano, a maior frequência ocorre nos meses de primavera e verão (MINUZZI et al., 2010). Zipser et al. (2006) também demonstraram que essa atividade convectiva é mais intensa nos meses quentes, de outubro a março. Mattos (2009) avaliou um total de 8.158 Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no Estado de São Paulo e encontrou a maior frequência durante o verão (49%), seguida pela primavera (26%), outono (21%) e inverno (3%). Mota (2003) constatou que a contribuição percentual dos SCMs para a precipitação total revelou valores extremamente altos, chegando

a 80% de todos os perfis de precipitação associados a esses sistemas na região.

Figura 4.12 – EOF dos casos na estação chuvosa sem incidência de descargas atmosféricas.

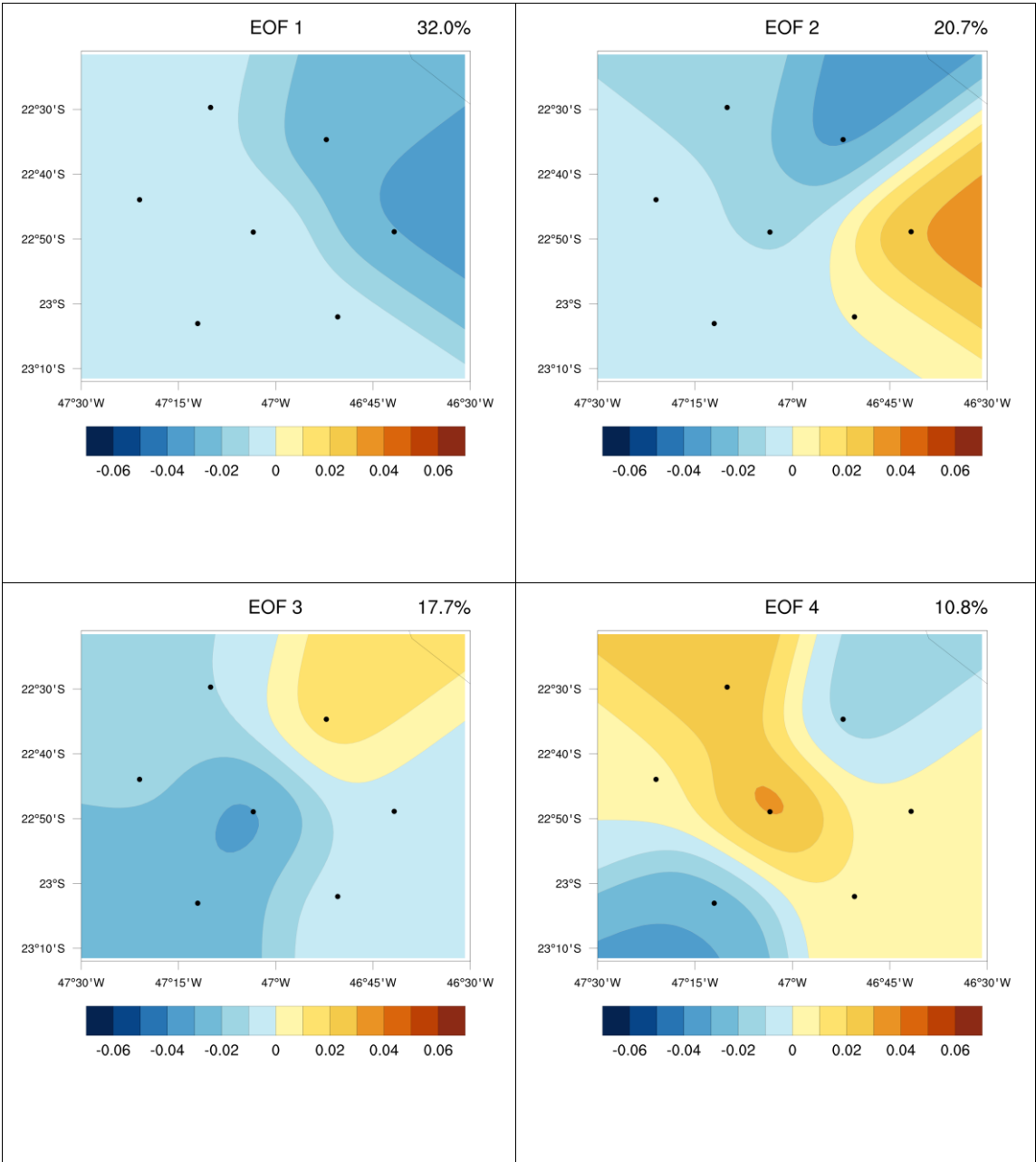
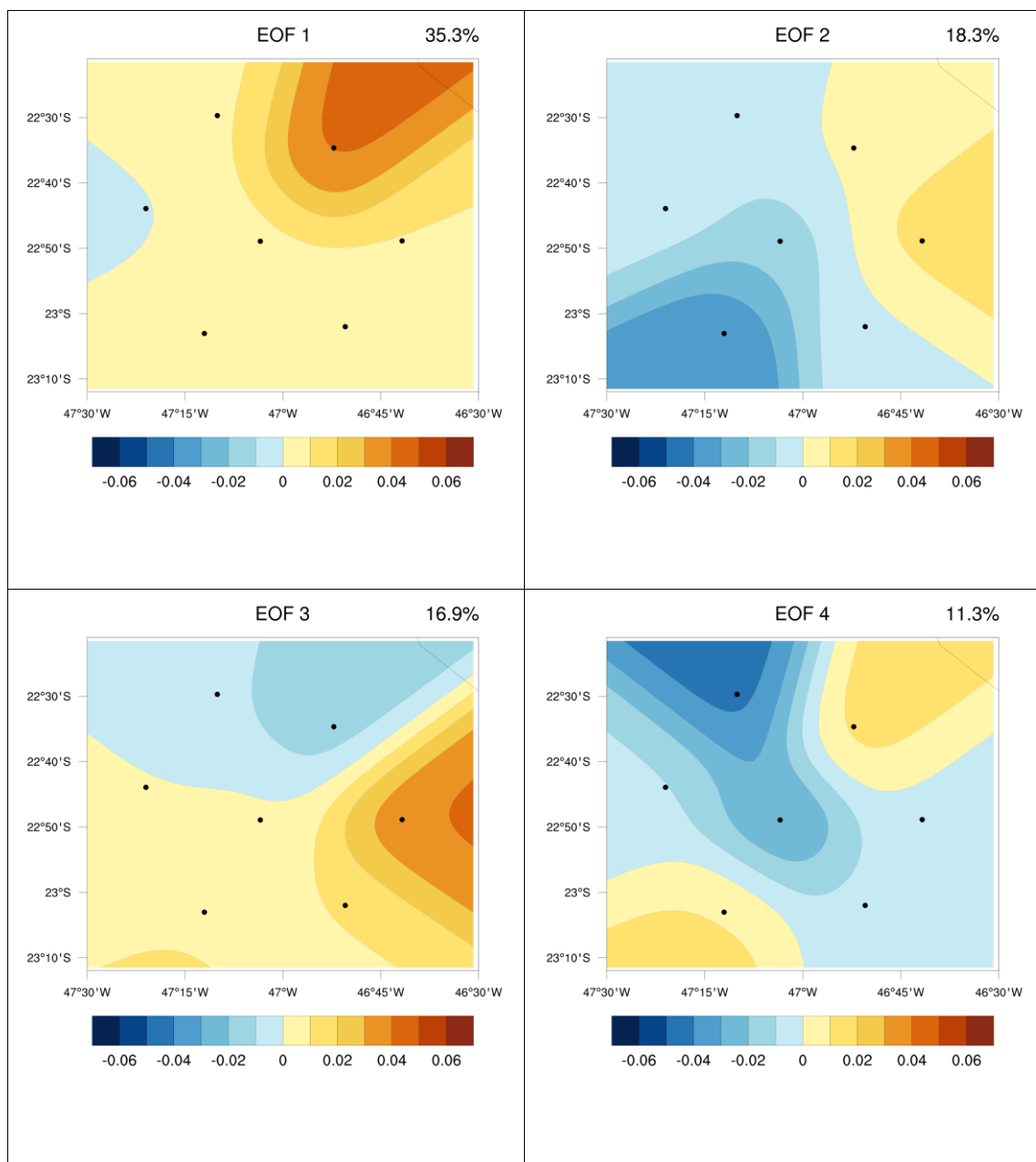


Figura 4.13 – EOF dos casos na estação chuvosa com incidência de descargas atmosféricas.



A Figura 4.14 mostra os quatro modos da EOF para os sistemas convectivos que ocorreram na estação seca sem a incidência de descargas atmosféricas. Eles representam 86,3% da variação total dos dados. O primeiro modo representa 40,8% da variação, o segundo 28,5%, o terceiro 11,7% e o quarto 7,3%. A Figura 4.15 mostra os quatro modos da EOF para os sistemas

multicelulares que ocorreram na estação seca com a incidência de descargas atmosféricas. Eles representam 89,5% da variabilidade dos dados. O primeiro modo representa 31,8% da variação, o segundo 26,8%, o terceiro 21,2% e o quarto 9,7%.

Novamente, para a estação seca, da mesma forma que para a estação chuvosa, não se observa um padrão predominante. Cada modo apresenta um padrão espacial distinto no campo elétrico atmosférico. Comparando-se com os padrões da estação chuvosa, também não há uma similaridade entre os modos, exceto por alguns poucos aspectos.

Figura 4.14 – EOF dos casos na estação seca sem incidência de descargas atmosféricas.

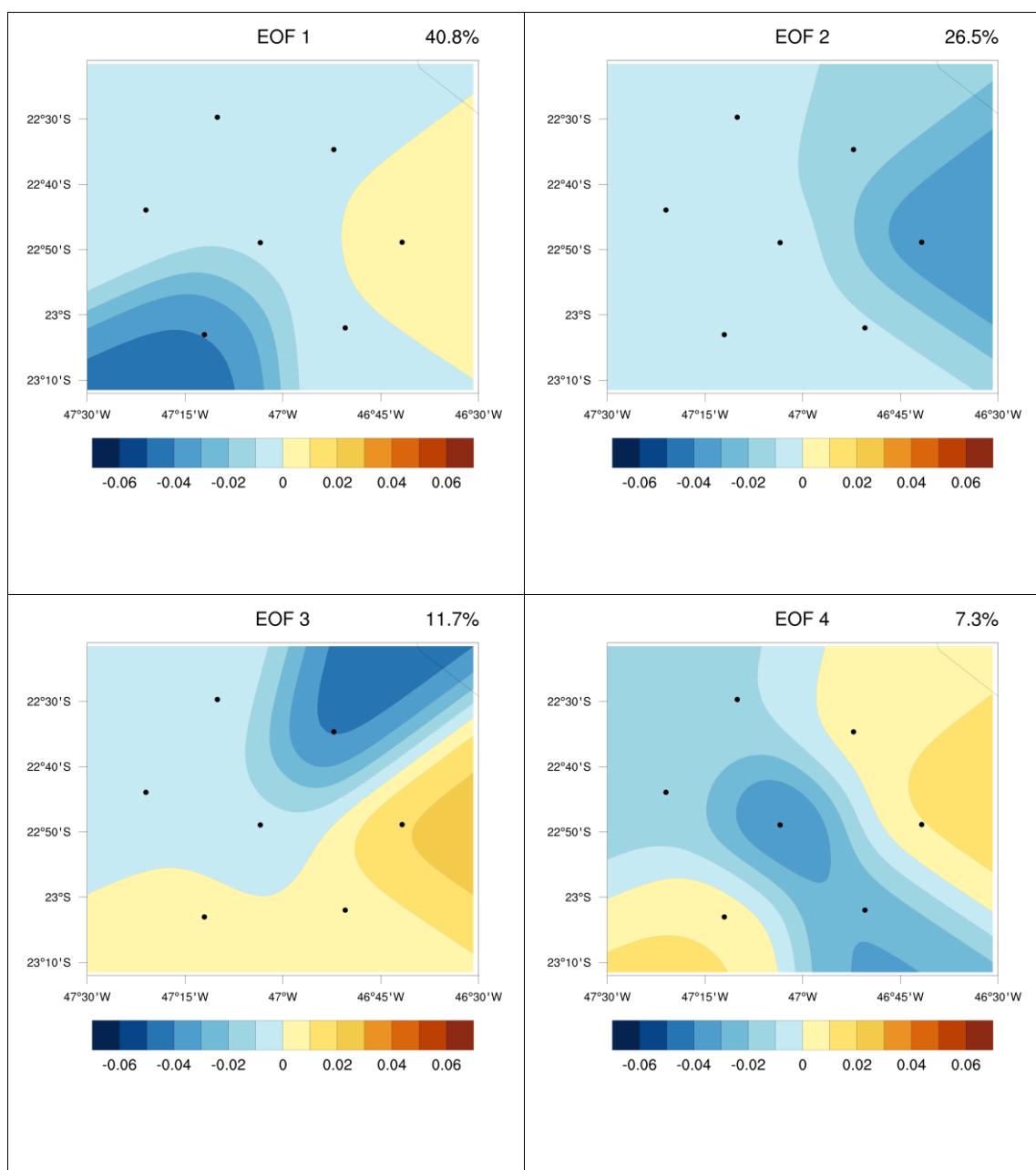
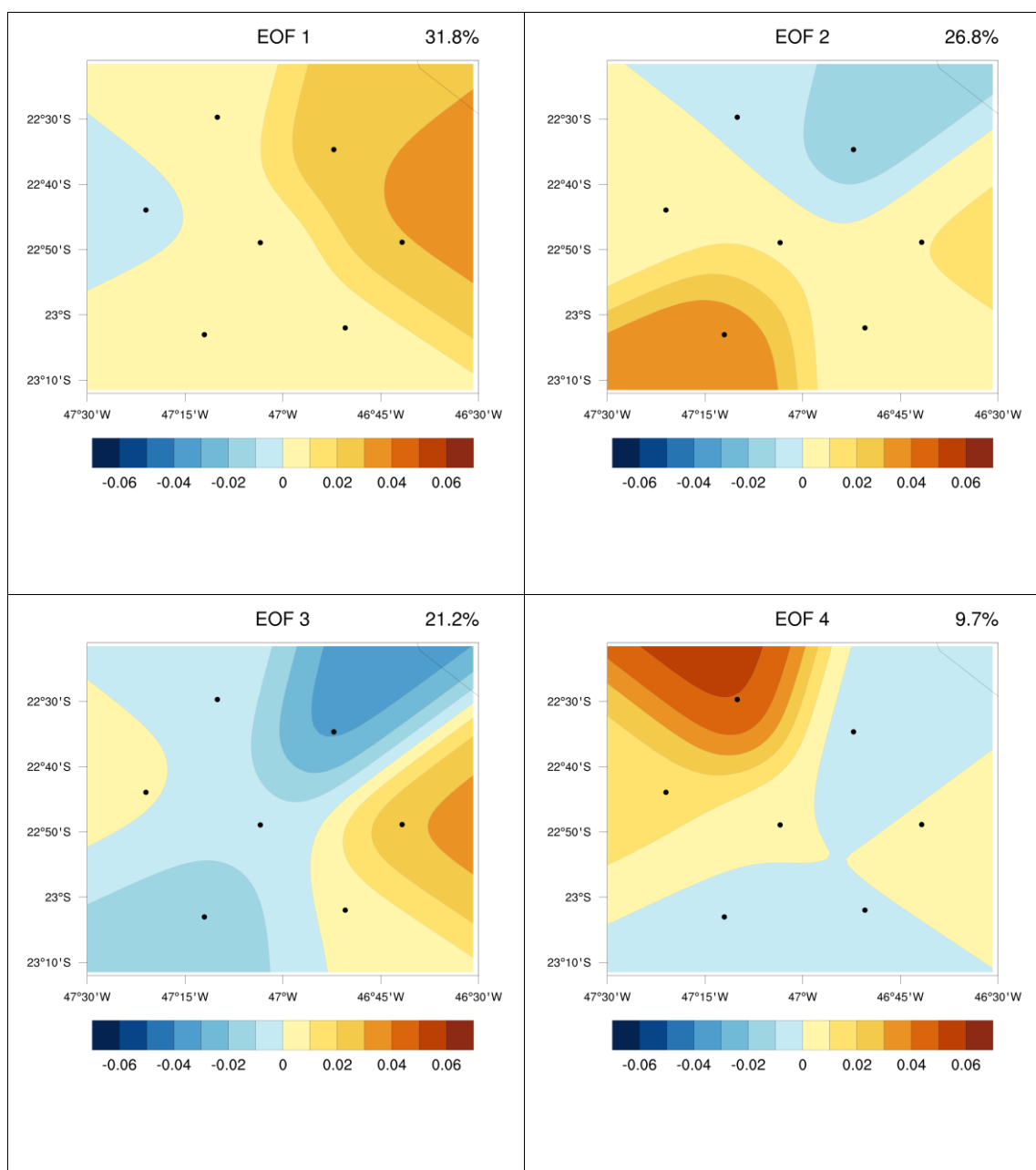


Figura 4.15 – EOF dos casos na estação seca com incidência de descargas atmosféricas.



5 CONCLUSÕES

Este trabalho, utilizando dados do Projeto SOS-CHUVA, no período de dezembro de 2016 a junho de 2018, buscou identificar padrões na variabilidade espacial e temporal do campo elétrico atmosférico produzido por sistemas convectivos isolados e multicelulares. Para identificar esses padrões, dados interpolados de campo elétrico atmosférico obtidos a partir de uma rede com sete sensores EFM foram analisados em conjunto com dados de radar e descargas atmosféricas. Foram selecionados 412 dias nos quais todos os sensores EFM estiveram ativos em que houve registro de Sistemas Convectivos, os quais foram classificados e agrupados em 72 casos de Sistemas Convectivos Isolados e 286 casos de Sistemas Convectivos Multicelulares.

Durante a análise dos casos, foram identificadas duas situações distintas. A primeira situação correspondeu aos sistemas convectivos em que não houve incidência de descargas atmosféricas, mas houve perturbação no campo elétrico. A segunda situação correspondeu aos sistemas convectivos em que ocorreu tanto a incidência de descargas atmosféricas quanto a perturbação no campo elétrico. Essas situações foram observadas tanto nos casos isolados quanto nos multicelulares. Os casos em que não ocorreram descargas atmosféricas confirmam que um sistema convectivo pode perturbar o campo elétrico atmosférico sem gerar descargas atmosféricas justamente por conta da formação dos centros de carga dentro das nuvens de tempestade.

Ao analisar individualmente todos os sistemas convectivos utilizando mapas interpolados de campo elétrico atmosférico, imagens de radar e descargas atmosféricas, observou-se alguns padrões distintos. Nos casos isolados de maneira geral, aqueles que se formaram em Campinas, localizada no centro da rede de sensores EFM, produziram linhas circulares fechadas de campo elétrico atmosférico. Já aqueles que ocorreram nas extremidades da rede não exibiram esse comportamento, principalmente devido à assimetria das observações. Para que o campo elétrico assuma uma configuração circular, os

centros de carga devem estar localizados no centro da rede de sensores EFM. Nos casos dos sistemas convectivos multicelulares, observou-se uma grande semelhança entre eles, com padrões de campo elétrico intenso e distribuição espacial não organizada. Essa diversidade de padrões é resultado da formação de múltiplos centros de carga no interior dos vários núcleos convectivos. Essas estruturas multipolares geram campos elétricos que se sobrepõem na superfície, resultando em configurações complexas. Além disso, devido a maior extensão horizontal dos sistemas multicelulares, eles acabam extrapolando os limites da rede de sensores EFM, causando assimetrias frequentes na interpolação, dificultando a identificação de padrões. Por fim, tanto nos casos de sistemas isolados quanto em multicelulares, observou-se que a intensidade dos campos elétricos atmosféricos são proporcionais à refletividade do radar. Esse é um comportamento previsível, pois altos valores de refletividade do radar indicam a presença de gelo dentro da nuvem. O gelo desempenha um papel fundamental nos processos de eletrificação das nuvens. Essas observações reforçam a importância de se utilizar dados de campo elétrico atmosférico em conjunto com refletividades do radar para uma melhor compreensão dos comportamentos desses fenômenos meteorológicos.

A análise utilizando a EOF teve como objetivo identificar padrões espaciais do campo elétrico atmosférico produzido pelos diferentes tipos de sistemas convectivos. Observou-se que os quatro primeiros modos da EOF representaram, em média, 84,4% da variação do campo elétrico atmosférico produzido por todos os sistemas convectivos. Apesar dos quatro primeiros modos da EOF serem os mais significativos, em nenhum caso se representou 100% da variabilidade espacial dos dados.

Por outro lado, cerca de 41% dos casos de sistemas isolados, independentemente da ocorrência de descargas atmosféricas, apresentaram um padrão com linhas concêntricas de campo elétrico atmosférico no centro da rede de sensores EFM, caracterizado por elevado gradiente e abrangendo uma área de aproximadamente 100km x 100km. O segundo modo, por sua vez,

indicou os casos em que o núcleo convectivo isolado ocorreu nas extremidades da rede de sensores, causando assimetria da interpolação. Esse resultados sugerem que, para os sistemas convectivos isolados, os primeiros dois modos da EOF são consistentes, indicando dois padrões de perturbação no campo elétrico atmosférico.

No caso dos sistemas multicelulares, identificou-se que as perturbações do campo elétrico atmosférico independem da incidência de descargas atmosféricas, estendendo-se por uma área de aproximadamente 150km x 150km. Os modos da EOF para ambos os casos (com e sem incidência de descargas atmosféricas) indicam padrões que parecem estar relacionados muito mais com o deslocamento do sistema do que com a produção de descargas atmosféricas em si. Nas análises individuais, observou-se que a maioria desses sistemas teve início na região de relevo elevado a leste da área de estudo, deslocando-se para oeste, conforme o padrão de escoamento predominante. Com isso, o deslocamento leste-oeste geraria padrões de campo opostos (identificados nos diferentes modos) devido passagem sobre a rede de EFM causando assimetrias na interpolação.

Para os sistemas convectivos com média/alta e baixa taxa de descargas atmosféricas, não se observou padrões espaciais de campo elétrico atmosférico, de maneira bastante semelhante aos resultados da análise dos sistemas convectivo multicelulares. Isso mostra a predominância do padrão de campo elétrico atmosférico dos sistemas multicelulares sobre o padrão dos sistemas isolados. Além disso, uma vez que não houve diferenças significativas entre os padrões espaciais do campo elétrico atmosférico para sistemas com e sem descargas atmosféricas, não se esperava nenhuma relação entre os padrões de campo e a taxa de ocorrência de descargas atmosféricas.

Ao analisar os sistemas convectivos multicelulares que ocorreram tanto na estação chuvosa quanto na estação seca, com ou sem descargas atmosféricas, observou-se um padrão espacial em que o campo elétrico apresenta maior perturbação na parte leste, com deslocamento em direção ao

oeste. Essa observação foi comprovada pela análise individual dos casos de sistemas convectivos, em que a maioria desses sistemas, especialmente os multicelulares, adentraram a região leste com grande intensidade. Observou-se que os padrões de campo com ocorrência de descargas atmosféricas diferem dos padrões sem ocorrência de descargas, tanto com relação à configuração espacial quanto ao sinal da EOF. Algumas características são comuns, porém várias outras não. Isso mostra que a dinâmica desses sistemas é complexa, o que dificulta a identificação de padrões de campo elétrico atmosférico, especialmente na estação chuvosa.

Embora os dados de campo elétrico atmosférico proporcionem um estudo mais detalhado dos sistemas convectivos, eles possuem várias limitações como a pequena área de cobertura dos sensores EFM, que interferem diretamente nos resultados da interpolação causando assimetrias nas extremidades da rede. Além disso, as complexas configurações dos centros de cargas dentro dos sistemas convectivos multicelulares geram campos elétricos muito diversos na superfície, impossibilitando a identificação de padrões espaciais, conforme mostrou as análises da EOF. Dessa forma, estudos futuros requerem uma quantidade maior de casos de sistemas de convectivos e redes de sensores EFM com maior área de cobertura na tentativa de melhor caracterizar os padrões de campo elétrico atmosférico dos diferentes tipos de sistemas convectivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R. I. et al. Thunderstorm characteristics of summer precipitating systems during CHUVA-GLM Vale do Paraíba field campaign. In: INTERNATIONAL CONFERENCE CLOUD AND PRECIPITATION, 16., 2012, Leipzig. **Proceedings...** Leipzig: ICCP, 2012.

APLIN, K. L.; HARRISON, R. G.; RYCROFT, M. J. Investigating Earth's atmospheric electricity: a role model for planetary studies. **Space Science Review**, v. 137, p. 11-27, 2008.

ARANGUREN, D. et al. Design, construction and calibration of two e-field machines used to measure tropical thundercloud e-field on the ground and aloft. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 8., 2005. São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: USP, 2005. p. 184-189.

ARANGUREN, D. et al. Operational analysis of electric field mills as lightning warning systems in Colombia. **Revista Ingeniería e Investigación**, v. 31, Supl.2, p. 51-57, 2011. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000500008&script=sci_arttext. Acesso em: out. 2019.

BABA, Y.; RAKOV, V. A. **Electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies**. [S.l.]: Wiley, 2016.

BARNES, S. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. **Journal of Applied Meteorology**, v.9, n. 3, p. 369-409, 1964.

BLOEMINK, H. **Static electricity measurements for lightning warnings: an exploration**. De Bilt: RNMI, 2013. (Internal Report IR-2013-01).

BROWNING, K. A. **Thunderstorm morphology and dynamics**: general circulation of middle-latitude thunderstorms. Norman, OK: University of Oklahoma, 1986. p.133-152.

BRUNING, E. C.; MACGORMAN, D. R. Theory and observations of controls on lightningflash size spectra. **Journal of Atmospheric Science**, v. 70, n. 12, p.4012–4029, 2013. Doi:10.1175/JAS-D-12-0289.1.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. Integração do radar meteorológico Doppler do Simepar e uma rede pluviométrica para a estimativa da precipitação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1137-1144.

CALHEIROS, A. J. P. et al. **Sistema de previsão imediata: descrição dos produtos**. Cachoeira Paulista: CPTEC, 2017.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CS110 electric field meter**: intruction manual - revision: 11/11. Logan, Utah, 2012.

COLEMAN, L. M. et al. Effects of charge and electrostatic potential on lightning propagation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. 9, p. 1–27, 2003.

DWYER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, v. 534, n. 4, p. 147–241, 2014.

FERRO, M. A. D. S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam multiplos canais**. 2008. 245p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

FERRO, M. A. S. et al. Cloud-to-ground lightning warnings based on electric field-mill measurements in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 30., 2010. **Proceedings...** 2010.

FERRO, M. A. S. et al. Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in Brazil. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 3, n. 3, p. 301-310, 2012. Disponível em: http://radiometrics.com/data/uploads/2015/01/Ferro_JATM_2011.pdf. Acesso em: jun. 2019.

GERMANN, U.; ZAWADZKI, I.; TURNER, B. Predictability of precipitation from continental radar images. part iv: limits to prediction. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, p. 2092–2108, 2006.

HOPPEL, W. A.; ANDERSON, R. V.; WILLETT, J. C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer. In: _____. **The earth's electrical environment**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1986. p. 149-165. Disponível em: http://www.nap.edu/download.php?record_id=898#. Acesso em: nov.2019.

HOUZE, R. A. Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 115, n. 487, p. 425–461, 1989.

JAYARANTE, R. Thunderstorm electrification mechanisms. In: COORAY, V. (Ed.). **The lightning flash**. London: IEE, 2003. p. 17-40.

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: KRIDER, E. P.; ROBLE, R. G. (Ed.). **The earth's electrical environment**. Washington DC: National Academy Press, 1986. p. 90–113.

LAKSHMANAN, V.; SMITH, T. An objective method of evaluating and devising storm-tracking algorithms. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 701–709, 2010.

LÓPEZ, J. et al. Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP). 31., 2012, Vienna. **Proceedings...** 2012. p.1-6.

MACHADO, L. A. T. et al. The CHUVA project—How does convection vary across the Brazil? **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2014. Doi:10.1175/BAMS-D-13-00084.1.

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

MAGINA, F. C. **Sistema de alerta de ocorrência de descargas atmosféricas utilizando rede de sensores de campo elétrico atmosférico**. 2016. 154 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3L6ACE5>. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

MENDES JUNIOR, O.; DOMINGUES, M. O. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 3-19, 2002.

MISSION INSTRUMENTS. **Electric field mill operation**. 2015. Disponível em: http://www.missioninstruments.com/pdf/fm_op_rev1d_0106.pdf.. Acesso em: abr. 2017.

MONTANYÀ, J.; BERGAS, J.; HERMOSO, B. Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning. **Journal of Electrostatics**, v. 60, n. 2, p.241-246, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388604000233>. Acesso em: abr. 2019

MURPHY, M. J. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tuckson, Arizona, USA. **Proceedings...** 2008.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 364f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O. The third generation relative detection efficiency model for the Brazilian Lightning Detection Network (BRASILDat). In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, Arizona. **Proceedings....** 2008.

NACCARATO, K. P. et al. First performance analysis of BrasilDAT total lightning network In southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 2012, Bonito, MS. **Proceedings...** 2012.

OGAWA, T. **Lightning currents**: Handbook of atmospheric electrodynamics. Boca Raton: CRC Press, 1995.

ORVILLE, R. E. et al. Enhancement of cloud-to-ground lightning over houston, texas. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 13, p. 2597–2600, 2001.

PINTO, I.; PINTO, O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 6, p. 733–737, 2003.

PINTO, P. J.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2000.

PINTO JUNIOR, O. **Lightning in the tropics**: from a source of fire to a monitoring system of climatic changes. New York: Nova Science, 2009.

RAKOV, V. A. **Fundamentals of Lightning**. New York: Cambridge University Press, 2016.

RYCROFT, M. J.; ISRAELSSON, S.; PRICE, C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.62, p.1563-1576, 2000.

RINEHART, R. E. **Radar formeteorologists**. 4.ed. Nevada: Rinehart, 2004.

SABA, M. M. F. et al. High speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 1–9, 2010.

SABA, M. M. et al. Upward lightning in Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 22., 2012. **Proceedings...** 2012. p. 2–5.

SAKURAGI, J. **Estudo da morfologia das tempestades severas em 3D e potencial aplicação em nowcasting**. 2018. 159 p. IBI:

<8JMKD3MGP3W34P/3Q8GLTE>. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

SAUNDERS, C. P. R.; KEITH, W. D.; MITZEVA, R. P. The effect of liquid water on thunderstorm charging. **Journal of Geophysical Research**, p.11007-11017, 1991.

SAUNDERS, C. P. R. Thunderstorms electrification laboratory experiments and charging mechanisms. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, D5, p.10.773-10.779, 1994.

SAUNDERS, C. P. R. et al. Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, p. 2653–2673, 2006. Doi:10.1256/qj.05.218.

SCHOEN, J. M.; ASHLEY, W. S. A climatology of fatal convective wind events by storm type. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 10, p. 109–121, 2011.

SCHULZ, W. et al. LLS data and correlated continuous E-field measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 2005, São Paulo. **Proceedings...** 2005.

SIDIK, M. A. B. et al. Development of wireless electric field mill for atmospheric electric field observation. **TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control**, v. 12, n. 4, p. 1113-1122, 2014.

SOS CHUVA. **Equipamentos e sítios do SOS CHUVA**. 2016. Disponível em: <http://soschuva.cptec.inpe.br/soschuva/instrumentosSitos.html>. Acesso em: set. 2018.

STOLZENBURG, M. et al. Electrical structure in thunderstorms convective regions: 1. mesoscale convective systems. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, e14,059, 1998.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. New York: Academic Press, 1987. 377p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Starnet**: Sferics Timing and Ranging Network. Disponível em: http://www.starnet.iaq.usp.br/chuvaonline/sobre_chuva.php. Acesso em: 25 jun. 2018.

VILA, D. A. et al. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233-245, 2008.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science**: an introductory survey. [S.l.]: Elsevier, 2006.

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, D11, p. 13141-13167, 1989.

WILLIAMSON, S. P. **Federal meteorological handbook**: doppler radar meteorological observations. Washington, DC: Department of Commerce, 2005. 219 p.

APÊNDICE A – SISTEMAS CONVECTIVOS ISOLADOS

Nesta seção será apresentada a listagem de todos os casos dos sistemas convectivos isolados analisados. Esses casos foram identificados e separados a partir da ferramenta FortraCC.

A.1 Sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas

Tabela A.1 - Casos analisados de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
22/12/16	01:00	01:40
10/01/17	18:50	19:20
11/01/17	09:00	09:30
12/01/17	07:40	08:20
14/01/17	19:10	20:10
15/01/17	14:00	15:40
16/01/17	09:00	10:00
17/01/17	18:05	18:30
27/02/17	17:50	18:55
27/02/17	21:20	22:00
17/03/17	23:55	01:00 (18/03)
08/04/17	20:00	21:10
10/04/17	21:00	21:50
21/04/17	11:20	11:50
16/05/17	11:30	12:30
18/05/17	12:00	13:00

continua

Tabela A.1 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
01/06/17	12:15	13:20
20/06/17	12:20	13:00
12/07/17	18:30	19:50
15/07/17	16:15	17:15
21/07/17	17:30	19:00
02/08/17	16:50	18:40
06/10/17	23:20	23:55
07/10/17	01:00	01:50
07/10/17	02:20	03:15
09/10/17	20:10	21:10
12/10/17	16:50	18:40
12/10/17	23:45	00:45 (13/10)
05/11/17	16:15	16:55
08/11/17	19:50	21:00
08/11/17	23:00	23:55
11/11/17	16:25	18:00
15/11/17	23:45	00:15 (16/11)
17/12/17	21:10	22:00
28/12/17	11:10	12:40
01/01/18	17:00	19:10
18/01/18	16:40	17:40
05/02/18	17:15	18:40
10/02/18	12:30	13:40
11/02/18	21:40	23:10
13/02/18	03:20	05:30
14/02/18	03:15	05:30

continua

Tabela A.1 – Conclusão.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
01/06/17	12:15	13:20
14/02/18	10:45	11:45
21/02/18	22:00	23:20
22/02/18	21:20	22:00
17/03/18	17:40	20:20
01/04/18	11:50	13:10
13/04/18	02:00	03:20
13/04/18	17:00	19:00
22/04/18	22:35	23:15
25/04/18	19:50	21:00
30/04/18	14:45	15:35
13/05/18	16:30	18:30
16/05/18	19:40	20:30
29/05/18	15:40	18:30
06/06/18	11:20	12:00

A.2 Sistemas convectivos isolados com incidência de descargas atmosféricas

Tabela A.2 - Casos analisados de sistemas convectivos isolados com incidência de descargas atmosféricas.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
25/12/16	17:00	18:55
27/12/16	21:00	23:55
08/01/17	20:00	22:00
15/01/17	14:00	15:40
25/03/17	19:00	20:30

continua

Tabela A.2 - Conclusão.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
28/09/17	21:00	23:00
10/10/17	21:40	23:35
18/11/17	20:25	21:05
16/12/17	16:00	18:25
10/02/18	12:30	13:40
12/02/18	18:20	22:00
15/02/18	21:10	22:50
17/02/18	20:10	21:00
19/02/18	14:30	16:30
05/03/18	20:30	22:35
14/03/18	16:05	18:20
17/03/18	17:30	20:20
23/03/18	21:15	21:50
16/05/18	19:40	20:30

APÊNDICE B – SISTEMAS CONVECTIVOS MULTICELULAR

Nesta seção será apresentada a listagem de todos os casos dos sistemas convectivos multicelular analisados. Esses casos foram identificados e separados a partir da ferramenta FortraCC.

B.1 Sistemas convectivos multicelular sem incidência de descargas atmosféricas

Tabela B.1 - Casos analisados de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
22/12/16	13:10	17:20
24/12/16	00:00	02:50
24/12/16	21:50	22:10
29/12/16	00:00	02:00
30/12/16	18:30	22:50
13/01/17	00:00	01:30
20/01/17	01:55	17:15
03/02/17	01:50	08:00
28/02/17	17:25	20:15
28/02/17	23:05	23:55
19/03/17	00:00	05:30
22/03/17	16:50	19:30
25/03/17	22:50	23:50
27/03/17	13:30	23:20
28/03/17	00:00	05:50
28/03/17	08:00	14:20

continua

Tabela B.1 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
11/04/17	11:00	13:20
12/04/17	02:35	05:00
17/04/17	10:00	13:45
21/04/17	06:30	11:00
22/04/17	00:00	02:50
27/04/17	00:00	05:30
02/05/17	09:55	12:50
09/05/17	12:50	14:15
14/05/17	10:00	16:00
16/05/17	03:30	05:00
18/05/17	13:00	23:55
20/05/17	00:00	06:30
06/06/17	04:05	15:50
13/06/17	06:30	23:55
14/06/17	00:00	00:30
14/06/17	02:50	07:30
20/06/17	15:30	19:00
03/08/17	12:30	15:55
11/08/17	12:00	14:00
15/08/17	13:20	23:55
16/08/17	00:00	08:20
16/08/17	11:45	19:50
17/08/17	09:00	21:10
18/08/17	07:00	19:20

continua

Tabela B.1 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
19/08/17	07:00	22:30
20/08/17	00:00	07:10
01/10/17	00:00	03:20
03/10/17	01:00	12:00
07/10/17	08:00	23:50
08/10/17	00:00	01:40
08/10/17	03:50	07:40
19/10/17	22:00	23:45
20/10/17	18:25	23:35
21/10/17	03:00	06:00
22/10/17	00:00	23:55
23/10/17	00:00	04:25
27/10/17	11:35	14:25
28/10/17	00:00	03:00
28/10/17	06:20	19:00
31/10/17	02:00	06:30
03/11/17	23:30	23:55
04/11/17	00:00	09:20
05/11/17	00:00	03:00
05/11/17	17:00	19:00
09/11/17	00:00	05:00
09/11/17	10:30	14:00
18/11/17	00:00	03:50
20/11/17	01:45	07:35

continua

Tabela B.1 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
20/11/17	10:00	17:00
20/11/17	20:00	23:00
21/11/17	06:00	08:00
21/11/17	12:00	13:30
21/11/17	16:50	18:45
08/12/17	00:00	03:00
10/12/17	21:00	21:55
20/12/17	00:00	03:00
23/12/17	00:00	02:00
27/12/17	00:00	01:20
27/12/17	18:00	20:20
28/12/17	21:00	23:55
29/12/17	00:00	02:10
29/12/17	23:30	23:55
03/01/18	04:50	08:25
15/01/18	04:00	11:40
17/01/18	00:00	02:00
20/01/18	00:00	08:40
20/01/18	09:20	11:00
21/01/18	00:00	07:00
22/01/18	00:00	04:05
05/02/18	20:20	21:40
08/02/18	11:50	12:40
14/02/18	01:00	03:15

continua

Tabela B.1 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
15/02/18	00:00	03:00
21/02/18	01:50	12:00
22/02/18	21:20	23:55
25/02/18	15:10	19:00
27/02/18	00:00	13:50
27/02/18	17:00	21:00
01/03/18	00:00	06:30
08/03/18	00:00	05:45
13/03/18	00:00	02:30
14/03/18	18:30	22:00
26/03/18	08:30	12:20
27/03/18	04:30	09:00
28/03/18	00:00	01:30
29/03/18	00:00	02:25
31/03/18	00:00	01:30
01/04/18	00:00	05:40
02/04/18	13:50	17:05
02/04/18	19:00	23:55
12/04/18	17:10	19:50
25/04/18	16:15	19:50
26/04/18	19:00	20:00
27/04/18	15:25	20:05
28/04/18	15:00	22:10
30/04/18	16:00	17:40

continua

Tabela B.1 – Conclusão.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
01/05/18	18:00	19:55
04/05/18	17:15	19:30
05/05/18	17:15	19:50
08/05/18	17:00	20:20
15/05/18	09:00	19:30
16/05/18	09:45	14:40
17/05/18	00:00	03:30
18/05/18	16:50	18:50
19/05/18	19:30	21:50
19/05/18	22:20	23:55
20/05/18	00:00	02:00
25/05/18	08:00	09:20
31/05/18	17:55	20:10
01/06/18	17:00	20:00
02/06/18	16:10	17:50
04/06/18	00:00	02:00
04/06/18	17:30	19:20
05/06/18	08:00	12:30

Tabela B.2 - Casos analisados de sistemas convectivos isolados sem incidência de descargas atmosféricas.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
23/12/16	18:00	23:55
25/12/16	16:15	23:50
26/12/16	21:30	23:10
27/12/16	20:00	23:10
28/12/16	18:00	23:50
29/12/16	16:50	20:00
30/12/16	01:25	02:55
31/12/16	14:30	23:55
01/01/17	15:20	21:50
08/01/17	19:50	23:50
09/01/17	17:00	23:55
10/01/17	00:00	03:30
11/01/17	19:00	23:55
12/01/17	00:00	02:50
12/01/17	12:30	23:55
13/01/17	16:00	21:30
14/01/17	21:20	23:55
15/01/17	00:00	04:50
15/01/17	19:20	23:55
16/01/17	00:00	07:30
16/01/17	13:25	16:25
16/01/17	18:10	23:55
17/01/17	00:00	23:55
18/01/17	00:00	23:50
19/01/17	12:10	23:55
20/01/17	19:00	23:55
21/01/17	00:00	05:00

continua

Tabela B.2 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
21/01/17	14:00	23:50
22/01/17	00:00	03:40
27/01/17	09:30	18:55
03/02/17	19:35	23:55
18/02/17	00:00	05:00
18/03/17	10:00	18:00
18/03/17	18:50	23:55
19/03/17	15:00	23:00
06/04/17	03:00	23:55
07/04/17	00:00	14:00
07/04/17	15:00	23:55
08/04/17	00:00	03:00
10/04/17	17:00	21:00
21/04/17	12:05	23:50
26/04/17	11:00	23:50
05/05/17	21:30	23:55
06/05/17	00:00	05:45
19/05/17	00:00	23:55
21/05/17	06:30	23:55
22/05/17	00:00	12:55
05/06/17	18:20	23:55
05/06/17	11:45	13:05
06/06/17	00:00	02:45
07/06/17	05:15	12:00
20/08/17	15:00	23:55
27/09/17	17:00	20:15
29/09/17	16:15	23:55

continua

Tabela B.2 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
02/10/17	08:40	17:55
03/10/17	01:00	12:00
06/10/17	17:00	21:15
07/10/17	03:15	06:30
08/10/17	16:20	17:50
10/10/17	18:10	20:50
11/10/17	15:10	23:55
12/10/17	00:00	02:00
13/10/17	16:10	23:55
25/10/17	20:00	23:55
26/10/17	00:00	21:40
27/10/17	06:20	08:40
27/10/17	16:30	23:55
30/10/17	03:10	11:30
30/10/17	12:10	21:30
04/11/17	20:15	23:55
10/11/17	17:00	23:55
11/11/17	00:00	11:30
15/11/17	17:15	23:55
16/11/17	15:00	23:50
17/11/17	05:55	12:20
17/11/17	17:00	23:55
18/11/17	15:00	23:55
19/11/17	00:00	05:00
19/11/17	10:00	22:15
08/12/17	16:30	21:30
18/12/17	00:40	06:00

continua

Tabela B.2 - Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
18/12/17	15:30	23:00
19/12/17	14:15	23:55
20/12/17	18:40	23:55
21/12/17	00:00	23:55
22/12/17	02:30	23:55
23/12/17	12:40	23:20
24/12/17	16:30	23:55
25/12/17	14:30	22:50
26/12/17	16:30	23:55
29/12/17	05:50	19:30
30/12/17	00:00	23:55
31/12/17	00:00	21:30
01/01/18	21:25	23:55
03/01/18	12:50	23:55
15/01/18	00:00	02:30
15/01/18	19:30	23:55
16/01/18	16:00	23:55
17/01/18	16:10	23:30
18/01/18	03:50	09:45
18/01/18	18:00	23:55
19/01/18	00:00	08:20
19/01/18	16:30	23:55
20/01/18	17:25	23:55
21/01/18	18:10	23:55
22/01/18	16:00	23:55
23/01/18	00:00	07:30
23/01/18	17:00	23:55

continua

Tabela B.2 – Continuação.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
06/02/18	16:40	23:50
10/02/18	12:50	20:10
11/02/18	13:20	18:40
12/02/18	08:30	12:15
13/02/18	15:00	18:30
14/02/18	11:00	23:55
16/02/18	14:00	23:55
17/02/18	15:25	23:55
18/02/18	00:00	23:00
19/02/18	16:35	23:55
20/02/18	00:00	05:15
20/02/18	13:30	23:55
26/02/18	14:00	23:55
28/02/18	16:30	23:55
01/03/18	16:30	23:55
02/03/18	16:00	23:55
03/03/18	00:00	04:00
04/03/18	17:00	22:30
06/03/18	16:20	23:55
07/03/18	19:00	23:55
10/03/18	14:55	23:45
15/03/18	00:00	07:00
15/03/18	17:30	23:00
16/03/18	00:00	07:00
16/03/18	13:20	23:10
19/03/18	15:30	21:20
20/03/18	16:00	23:55

continua

Tabela B.2 – Conclusão.

Dia	Início (hora UTC)	Término (hora UTC)
21/03/18	00:00	10:50
21/03/18	18:25	23:55
22/03/18	00:00	05:50
23/03/18	15:50	22:00
26/03/18	14:00	23:55
27/03/18	00:00	01:20
27/03/18	15:30	23:55
28/03/18	17:40	23:55
29/03/18	15:45	23:40
30/03/18	16:30	23:55
31/03/18	15:20	23:55
01/04/18	15:20	23:55
02/04/18	00:00	07:00
03/04/18	14:55	23:55
09/04/18	18:00	21:00
16/05/18	19:50	23:55
17/05/18	17:40	21:15
19/05/18	10:55	17:30
05/06/18	18:00	23:00
07/06/18	03:35	12:55
07/06/18	19:30	22:10