

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

JOSÉ CARLOS TACZA ANAYA

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO
DURANTE TEMPO BOM E DISTÚRBIOS GEOFÍSICOS**

São Paulo
2019

JOSÉ CARLOS TACZA ANAYA

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO
DURANTE TEMPO BOM E DISTÚRBIOS GEOFÍSICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin

São Paulo
2019

T119a

Tacza Anaya, José Carlos

Análise da variabilidade do campo elétrico atmosférico durante tempo bom e distúrbios geofísicos. / José Carlos Tacza Anaya – São Paulo, 2019.

159 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2019.

Orientador: Jean-Pierre Raulin

Bibliografia: f. 122-131.

1. Campo elétrico atmosférico. 2. Curva de Carnegie. 3. Tempestades elétricas. 4. Circuito elétrico atmosférico global. 5. Aerossóis. 6. Explosão solar. 7. Evento de prótons solares. 8. Tempestade geomagnética. 9. Decréscimo Forbush. I. Raulin, Jean-Pierre, *orientador*. II. Título.

CDD 523.72

Bibliotecária Responsável: Marta Luciane Toyoda – CRB 8/ 8234

José Carlos Tacza Anaya

**ANALISE DA VARIABILIDADE DO CAMPO ELETRICO ATMOSFERICO
DURANTE TEMPO BOM E DISTURBIOS GEOFISICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin - Orientador
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Sergio Szpigel
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Marcos Stefanelli
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodrigues
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Vladimir S. Makhmutov
Lebedev Physical Institute

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Jean-Pierre Raulin, pela paciência e dedicação que mostrou ao me orientar durante a realização do meu mestrado e doutorado.

À memória do Professor Pierre Kaufmann, coordenador do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), minha gratidão por me dar a oportunidade de trabalhar neste centro durante esses anos.

Aos professores do programa de pós-graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

A todos aqueles ligados ao CRAAM pela ajuda, incentivo e acolhimento, que sem dúvida foram de grande importância.

Aos professores membros da banca, meu agradecimento por ser parte da banca examinadora e pela avaliação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Morales por providenciar os dados da rede STARNET.

Aos colaboradores da rede AFINSA pelo seu importante apoio em manter a rede de sensores de campo elétrico: Adolfo e Germán (CASLEO), Walter, Jorge e Fernanda (CONIDA), Fernando (Universidade Estadual de Paraíba), Gilmar (Universidade Federal de Roraima), Yovanny e aos estudantes da Universidade Nacional San Luis Gonzaga de Ica.

Um agradecimento muito especial para Lilian por sua paciência para me ajudar a manipular o software IDL, apoio e companheirismo em todos esses anos.

Aos meus colegas de curso, pelas diversas discussões que proporcionaram um melhor desenvolvimento da tese e pelo apoio nas horas fáceis e difíceis.

A meus pais e familiares pelo apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Adicionalmente, este trabalho foi financiado em parte pelo Fundo Mackenzie de Pesquisa.

RESUMO

O monitoramento do campo elétrico atmosférico é importante para estudar a dinâmica do circuito elétrico atmosférico global e o possível acoplamento do clima espacial com o clima troposférico. Nesta tese investiga-se a variação diária do campo elétrico atmosférico em diferentes locais na América do Sul, utilizando-se uma nova rede de sensores de campo elétrico instalados na Argentina, Brasil e Peru, a qual foi estabelecida durante o decorrer do projeto. O objetivo principal foi obter a curva diária do campo elétrico atmosférico em dias de tempo bom para cada uma das estações da rede, a qual foi chamada de curva padrão, através de médias mensais, sazonais e anuais. As curvas padrão anuais foram comparadas com a curva característica em tempo universal, conhecida como a curva de Carnegie, a qual está relacionada com as correntes fluindo no circuito elétrico atmosférico global. Para todas as estações encontrou-se que a variação diária do campo elétrico atmosférico apresentava a contribuição de efeitos locais (por exemplo, radioatividade natural do solo e poluição) e globais (boa correlação com a curva de Carnegie). Adicionalmente, para a estação localizada na Argentina, comparou-se a variação mensal do campo elétrico atmosférico com a variação mensal global do número de ocorrências de raios. Os resultados mostram uma boa similitude na variação mensal depois de remover efeitos locais (aerossóis). Além disso, foram analisados desvios da curva padrão do campo elétrico durante explosões solares, eventos de prótons solares e decréscimos Forbush, utilizando-se o método de épocas superpostas. Os resultados mostram que não ocorre nenhum efeito na variação do campo elétrico depois de explosões solares, porém se observa excessos de $\sim 10\text{V/m}$ depois de intensos eventos de prótons solares. O último resultado indica efeitos de ionização acima de regiões de tempo perturbado alterando o circuito elétrico global. Por outro lado, não se observa efeitos significantes depois de decréscimos Forbush ($>4\%$). No entanto, durante dois eventos muito intensos, $>10\%$ e $>8\%$, se observa um incremento no campo elétrico atmosférico, o qual indica efeitos de ionização em regiões de tempo bom.

Palavras-chave: Campo Elétrico Atmosférico, Curva de Carnegie, Tempestades elétricas, Circuito Elétrico Atmosférico Global, Aerossóis, Explosão Solar, Evento de Prótons Solar, Tempestade Geomagnética, Decréscimo Forbush.

ABSTRACT

The monitoring of the atmospheric electric field is important to study the dynamics of the global atmospheric electric circuit and the possible coupling of the space weather with the tropospheric climate. In this thesis, we investigate the daily variation of the atmospheric electric field at different locations in South America, using a new network of electric field sensors installed in Argentina, Brazil and Peru, which was established during the course of the project. The main objective was to obtain the daily curve of the atmospheric electric field in fair weather conditions, for each station of the network, which was called standard curve, through monthly, seasonal and annual averages. The annual standard curves were compared with the universal time curve, known as the Carnegie curve, which is related to the currents flowing in the global atmospheric electric circuit. For all stations, the daily variation of the atmospheric electric field was found to have the contribution of local effects (e.g. natural radioactivity of the soil and pollution) and global effects (good correlation with the Carnegie curve). Additionally, for the station located in Argentina, we compared the monthly variation of the atmospheric electric field with the monthly global variation of the number of lightning. The results show a good similarity in the monthly variation after removing local effects (aerosols). In addition, deviations of the standard curve of the electric field were analyzed during solar flares, solar proton events and Forbush decreases, using the superposed epoch analysis. The results show no effects on the electric field variation after solar flares, but excess of $\sim 10\text{V/m}$ are observed after intense solar proton events. The latter result indicates ionization effects above disturbed regions perturbing the global electric circuit. On the other hand, no significant effects were observed after Forbush decreases ($> 4\%$). However, during two very intense events, $> 10\%$ and $> 8\%$, an increase in the atmospheric electric field is observed, which indicates ionization effects in fair weather regions.

Keywords: Atmospheric Electric Field, Carnegie Curve, Thunderstorms, Global Atmospheric Electric Circuit, Aerosol, Solar Flare, Solar Proton Event, Geomagnetic Storm, Forbush Decrease.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1 | Distribuição de perfis da temperatura, densidade eletrônica e condutividade elétrica da atmosfera terrestre..... | 26 |
| Figura 2 | Variação média diária do campo elétrico atmosférico em condições de tempo bom registrada nos oceanos do mundo inteiro, conhecida como a curva de Carnegie..... | 27 |
| Figura 3 | Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para diferentes localidades em termos do percentual da média para o ano 2016. Algumas localidades apresentam um pico máximo (a) e outras dois picos (b). (a) Carnegie (vermelho), CAS2 - Argentina (azul), Graciosa - Portugal (roxa), Halley - Antártida (laranja), Montanha Hermon - Israel (preto), Aragats - Armenia (cinza). (b) Carnegie (vermelho), Studenec - República Tcheca (preto), Reading - UK (Azul), Panska - República Tcheca (roxa), Xanthi - Grécia (cinza), Tripura - India (ciano), Swider – Polônia (laranja), Evora - Portugal (rosa), Bristol Langford - UK (verde), Mitzpe Ramon – Israel (cinza tracejado), Nagycenk - Hungria (azul tracejado) | 28 |
| Figura 4 | Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para duas diferentes localidades na Antártida. (a) Comparação entre as curvas médias de Carnegie (linha sólida) e Vostok (78.5°S , 107°E , linha tracejada) para os anos entre 1998-2001, em termos do percentual da média. (Fonte: Adaptado de Burns et al., 2012) (b) Comparação entre as curvas médias de Carnegie (vermelho) e Maitri (70.76°S , 11.74°E , preto) para os anos entre 2005-2014. As barras de erro representam um desvio padrão para Maitri..... | 28 |
| Figura 5 | Esquema de uma tempestade de uma única célula normal típica em três estágios de seu ciclo de vida mostrando (a) fase cumulus, (b) fase de maturidade, e (c) fase de dissipação. A escala horizontal é comprimida em cerca de 30% em relação à escala vertical na figura. As isotérmicas 0°C e -40°C são indicados em vermelho..... | 30 |
| Figura 6 | Diagrama esquemático mostrando a estrutura básica de carga no modelo multipolar. Quatro regiões de carga são mostradas perto das correntes ascendentes, e seis regiões de carga são mostradas fora das correntes ascendentes..... | 31 |
| Figura 7 | Distribuição anual da atividade de relâmpagos (ou do inglês <i>flashes</i>) para os anos entre 1995 até 2000 (a). O ciclo anual da taxa global de relâmpagos calculado | |

| | | |
|---|---|----|
| com uma média móvel de 55 dias para as contribuições continentais e oceânicas (b), e contribuição do Hemisfério Norte e Sul (c) | 33 | |
| Figura 8 | Esquema básico do Circuito Elétrico Atmosférico Global..... | 34 |
| Figura 9 | Modelo de capacitor terra-ionosfera (a) e modelo de capacitor terra-atmosfera (b) | 36 |
| Figura 10 | Comparação entre área total global de tempestades elétricas na Terra (linha sólida preta), com suas contribuições regionais (linhas tracejadas), e a curva de Carnegie (linha sólida vermelha) | 37 |
| Figura 11 | Variação da amplitude relativa entre a curva de Carnegie (linha solida cinza) comparada com os gera-dores do circuito elétrico global. Relâmpagos (linha laranja, Whipple, 1929), relâmpagos detectados pelo OTD/LIS (linha vermelha, Cecil et al., 2014), ESCs (linha tracejada azul, Liu et al., 2010), ESCs e tempestades elétricas (linha azul, Liu et al., 2010) e relâmpagos e ESCs x3 (linha preta, Mach et al., 2011) | 38 |
| Figura 12 | Distribuição por longitude da corrente total (linha sólida) e atividade de relâmpagos registrada pelo OTD/LIS (linha tracejada) | 39 |
| Figura 13 | Variação mensal do campo elétrico atmosférico em estações no hemisfério norte (a - g), hemisfério sul (h - i) e nos trópicos (j - k). Nome da estação, latitude e período de medidas são indicados..... | 40 |
| Figura 14 | Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom, em termos do percentual da média, registrado em quatro diferentes localidades (Hermon-Israel, Aragats e Nor Amberd-Armênia e Davos-Suíça) comparadas com a curva de Carnegie..... | 43 |
| Figura 15 | Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para as localidades de Hermon (Israel) e Aragats e Nor-Amberd (Armênia), separado para as estações de verão e inverno..... | 43 |
| Figura 16 | Variação mensal do número de manchas solares durante o ciclo de atividade solar. A linha vermelha representa uma média móvel a cada 13 pontos..... | 46 |
| Figura 17 | Imagen de uma explosão solar (margem direita do Sol) na faixa UV ocorrida em 4 de novembro de 2003 (a). Evolução temporal do fluxo de raios X do 29 de outubro de 2013 (b) | 47 |
| Figura 18 | Fluxo de prótons energéticos em três canais de energia para o evento de 17 de maio de 2012 (a). Variação na taxa de contagem do monitor de nêutrons para duas estações durante o GLE em 17 de maio de 2012 (b) | 47 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 19 | Ejeção de massa coronal tipo halo ocorrida em 14 de julho de 2000, registrada pelo coronógrafo LASCO/C2 da SOHO. Os eventos de halo são CMEs dirigidos para (ou longe) da Terra. À medida que se tornam maiores e maiores, eles parecem envolver o Sol, formando um halo ao redor dele..... | 48 |
| Figura 20 | Variação do índice Kp (a) e índice Dst (b), durante uma intensa tempestade geomagnética ocorrida durante 22-24 de junho de 2015..... | 49 |
| Figura 21 | Variação na intensidade dos monitores de nêutrons para as estações de Roma (diamante) e Moscow (+). Variação do fluxo de raios cósmicos detectado pelo CARPET para dados não corregidos pela temperatura (curva preta tracejada) e para dados corregidos pela temperatura utilizando quatro métodos (curva cinza com quadrados, curva cinza com triângulos, curva cinza com asteriscos e curva preta com cruzes) entre 2006 e 2010. Os histogramas e a curva pontilhada mostram a variação média mensal e a média móvel de 13 meses do número de manchas solares, respectivamente..... | 50 |
| Figura 22 | Decréscimo Forbush ocorrido em julho de 1982 registrado em três estações de monitores de nêutrons: Deep river, Mt. Wellington e Kerguelen..... | 51 |
| Figura 23 | Agrupamento de médias horárias de E (em %) em torno de dias de explosão solar durante três anos de baixa atividade solar (1964-1967), medido na estação Zugspitze..... | 54 |
| Figura 24 | Variações transitórias do CEA (Parte inferior) associadas ao aumento de fluxo de raios cósmicos secundários em todos os canais do sensor CARPET (Parte superior). Observa-se entre 22:00 e 23:30 UT variações do CEA mais rápidas devido à presença de raios..... | 55 |
| Figura 25 | Sensor EFM (a) e seu diagrama de blocos (b) | 57 |
| Figura 26 | Localização dos sensores EFM já instalados (triângulos), e a serem instalados (estrelas) | 59 |
| Figura 27 | Frequência Absoluta (a) e Frequência Cumulativa (b), para os valores do CEA, para a estação de HYO, durante o período de estudo..... | 64 |
| Figura 28 | Comparação entre as médias anuais das variações do CEA em dias de tempo bom para o critério utilizado no presente trabalho (linha vermelha) e o critério utilizando-se as variáveis meteorológicas (linha preta). As barras de erros são de 1σ | 66 |
| Figura 29 | Variações diárias do CEA em dias de tempo bom para as estações CAS1 (13/04/2014), CAS2 (15/04/2014), ROR (08/11/2016), HYO (22/09/2016), | |

| | | |
|------------------|---|----|
| | CGR1 (22/02/2017), CGR2(LSA, 02/09/2017) e SPA (15/05/2017) | 69 |
| Figura 30 | Variação diária média mensal do CEA na estação CAS1 durante dez anos (2008 - 2017). As barras de erro representam valores médios 1σ para os dez anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda) | 70 |
| Figura 31 | Como na figura 30 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação do ano..... | 71 |
| Figura 32 | Variação diária do campo elétrico atmosférico para a estação CAS1 (painel superior) e a estação CAS2 (painel do meio) comparado com a variação da espessura óptica de aerossóis registrado pela AERONET (painel inferior). As cores representam os diferentes comprimentos de onda..... | 73 |
| Figura 33 | Variação temporal da cobertura de nuvens (painel superior) e o campo elétrico para CGR (painel inferior) durante os dias 4 e 5 de setembro de 2018..... | 75 |
| Figura 34 | Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de CAS1 (2008-2017), CAS2 (2010-2018) e HYO (2016-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas acima dos 2400 metros acima do nível do mar..... | 77 |
| Figura 35 | Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de ROR (2014-2018), CGR1 (2016-2017) e CGR2 (2017-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas no norte do Brasil..... | 78 |
| Figura 36 | Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de SPA (2017-2018), PLO (2011-2018) e ICA (2011-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas nas cidades de São Paulo, Ica e Lima, respectivamente..... | 79 |
| Figura 37 | Variação diária do CEA para dias de tempo bom para CAS1 (na parte superior: média para as 00-24 UT, segundo painel: média para as 00-08 UT, terceiro painel: média para as 08-16 UT e na parte inferior: média para as 16-24 UT), para o período entre 01 de janeiro de 2008 até 18 de junho de 2017. A curva vermelha é uma média móvel de 31 dias. As linhas tracejadas verticais de cor vermelha indicam o início de cada ano..... | 81 |
| Figura 38 | Como na figura 37 apenas para a estação CAS2 para o período entre 01 de janeiro de 2010 até 31 de julho de 2018..... | 82 |
| Figura 39 | Parte superior: Variação média mensal do CEA em dias de tempo bom para | |

| | |
|--|----|
| CAS1 para o período entre janeiro 2008 até junho 2017. A curva grossa representa o valor médio para cada mês. Parte Inferior: Série temporal das médias mensais do CEA para CAS1 para o mesmo período. As linhas tracejadas verticais de cor vermelha indicam o início de cada ano. As barras de erro são de 1σ | 84 |
| Figura 40 Como na figura 39 apenas para a estação CAS2 para o período entre janeiro de 2010 até julho de 2018..... | 85 |
| Figura 41 Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para todas as estações da rede AFINSA (curva preta) comparada com a curva de Carnegie (curva vermelha) em termos do percentual da média. As linhas tracejadas verticais azuis indicam o nascer e pôr do sol, respectivamente..... | 86 |
| Figura 42 Comparação entre a variação do campo elétrico atmosférico (curva preta), espessura óptica de aerossóis (AOT, comprimento de onda 440 nm, curva azul) e temperatura (curva vermelha) para os dias 31 de janeiro (a) e 23 de junho de 2011 (b) | 89 |
| Figura 43 Painel superior: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico para fevereiro de 2012. Painel do meio: Variação diária média mensal do número de ocorrências de raios para o mesmo mês para distâncias entre 0 até 10 000 km. Painel inferior: Coeficiente de correlação linear entre ambas as curvas médias para todas as distâncias..... | 90 |
| Figura 44 Como na figura 43 apenas para o mês de julho de 2012..... | 91 |
| Figura 45 Coeficiente de correlação linear entre as curvas médias do campo elétrico atmosférico e o número de raios (distância maior que 3000 km) | 93 |
| Figura 46 Variação diária média sazonal do campo elétrico atmosférico (curva contínua) comparada com a curva de Carnegie (curva tracejada) em termos do percentual da média..... | 93 |
| Figura 47 Variação diária média anual normalizada para o CEA de dias de tempo bom para as estações da rede AFINSA (linha preta) comparando com a curva de Carnegie (linha vermelha). O horário local para cada estação é indicado no eixo vertical superior. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol, respectivamente..... | 95 |
| Figura 48 Variação diária do campo elétrico atmosférico para uma média de 10 dias de tempo bom (curva preta, escolhendo dias durante fim de semana), e durante três dias de terça feira (curvas vermelha, verde e azul). As barras de erro | |

| | | |
|------------------|---|-----|
| | correspondem 1σ (a). Variação diária média do material particulado (10 micrômetros) para um período de 11 dias (b) | 98 |
| Figura 49 | Variação diária do monóxido de carbono (primeiro painel), dióxido de nitrogênio (segundo painel) e material particulado (10 micrômetros, terceiro painel). No painel inferior mostra-se a variação diária do campo elétrico atmosférico para a estação SPA. O período de tempo corresponde a 11 de maio até 04 de junho de 2018..... | 99 |
| Figura 50 | Como mostrado na figura 47 para a curva chamada REGIONAL sem as estações SPA e HYO | 99 |
| Figura 51 | Variação média mensal da Espessura Óptica de Aerossóis para diferentes comprimentos de onda registrados em CASLEO (período janeiro 2011 – julho 2014). Também mostra-se a variação média mensal do campo elétrico atmosférico de tempo bom para CAS1 (curva tracejada) | 101 |
| Figura 52 | Valores diários do CEA (CAS1) versus EOA em condições de tempo bom, para diferentes comprimentos de onda..... | 101 |
| Figura 53 | Correlação linear entre as médias diárias do CEA (CAS1) e a EOA (500 nm) para condições de tempo bom..... | 102 |
| Figura 54 | Valores médios mensais do CEA (CAS1) corregidos pela influência de aerossóis (linha tracejada) para cada um dos comprimentos de onda. A linha contínua é uma média móvel de 3 meses..... | 103 |
| Figura 55 | Variação média mensal do número de raios (NR), registradas para uma área entre 3000 até 18000 km afastada de CAS1 (período entre janeiro de 2008 até dezembro de 2013, cor azul) com uma média móvel de 3 pontos. A curva preta é a variação média mensal do CEA de tempo (média móvel de 3 pontos). Ambas as curvas foram normalizadas [0,1]..... | 104 |
| Figura 56 | Parte Superior: Fluxo de raios X nas faixas de 0,5- 4 Å (linha pontilhada de cor vermelha) e 1-8 Å (linha sólida de cor preta), com médias cada 10 minutos. No meio: A curva de cor preta representa a variação diária do CEA para o dia da explosão solar. A curva de cor vermelha representa a curva média mensal de dias de tempo bom com suas respectivas barras de erro de 1σ . Ambas as curvas foram feitas com médias cada 10 minutos. Parte Inferior: Como mostrado no gráfico do meio apenas para a estação CAS2..... | 106 |
| Figura 57 | Parte Superior: Fluxo de prótons energéticos nos canais ≥ 10 MeV (cor vermelha), ≥ 50 MeV (cor azul) e ≥ 100 MeV (cor vede), com médias cada 10 minutos. No | |

| | |
|---|-----|
| meio: A curva de cor preta representa a variação diária do CEA para o dia do evento. A curva de cor vermelha representa a curva média mensal de dias de tempo bom com suas respectivas barras de erro de 1σ . Ambas as curvas foram feitas com médias cada 10 minutos. Parte Inferior: Como mostrado no gráfico do meio apenas para CAS2..... | 107 |
| Figura 58 Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a explosões solares (curva preta) e a períodos aleatórios de tempo bom (curva vermelha). O tempo zero é a hora de início da explosão solar. As barras de erro indicam dois erros padrão da média..... | 109 |
| Figura 59 Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a eventos de prótons solares (curva preta), sem GLE (curva azul) e a períodos aleatórios de tempo bom (curva vermelha). O tempo zero é a hora de início do evento de prótons. As barras de erro indicam dois erros padrão da média..... | 109 |
| Figura 60 Painel superior: fluxo de prótons energéticos nos canais ≥ 100 MeV (curva verde), ≥ 50 MeV (curva azul) e ≥ 10 MeV (curva vermelha). Segundo painel: Aumento na taxa de contagem do monitor de nêutrons nas estações do Pólo Sul (curva preta) e Oulu (curva azul). Terceiro painel: valores horários do CEA para CAS1 no dia do evento (curva preta) e a curva padrão mensal (curva vermelha) com suas respectivas barras de erro de um desvio padrão (1σ). Painel inferior: Igual ao terceiro painel, apenas para dados da estação CAS2..... | 112 |
| Figura 61 A evolução do campo elétrico atmosférico, atividade geomagnética e meteorológica em 17 de maio de 2012. Painel superior: o mesmo que o terceiro painel da figura 60. Painel do meio: o índice Kp (linha roxa) e a velocidade do vento (linha laranja). Painel inferior: a umidade relativa (linha azul) e a chuva (linha marrom) | 113 |
| Figura 62 Variação horária do índice DST (painel superior), o campo elétrico atmosférico para CAS1 (painel do meio) e para CAS2 (painel inferior) para o período entre 19 até 30 de junho de 2015. A linha vermelha representa as médias diárias para cada uma das variáveis..... | 116 |
| Figura 63 Como na figura 62 apenas para o período 10 até 21 de julho de 2012..... | 117 |
| Figura 64 Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a decréscimo Forbush (curva preta) e sem os dois DF muito intensos (curva azul). O tempo zero é o dia do início do DF. As barras de erro indicam | |

dois erros padrão da média..... 118

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Quadro 1 | Descrição das estações de sensores de EFM da rede AFINSA..... | 58 |
|-----------------|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------------|--|-----|
| Tabela 1 | Variação de parâmetros elétricos em tempo bom realizadas em Lerwick (1978-1985) entre o máximo e mínimo de raios cósmicos..... | 52 |
| Tabela 2 | Intervalo de valores de amplitude de campo elétrico atmosférico em dias de tempo bom para todas as estações..... | 65 |
| Tabela 3 | Coeficiente de regressão linear, r , entre as curvas anuais para cada estação da rede AFINSA e a curva de Carnegie..... | 94 |
| Tabela A1 | Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por mês, para todas as estações..... | 132 |
| Tabela A2 | Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por estação, para todas as estações..... | 136 |
| Tabela C1 | Lista das explosões solares..... | 155 |
| Tabela C2 | Lista de eventos de prótons solares..... | 158 |
| Tabela C3 | Lista de Decréscimos Forbush..... | 159 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|--|
| AERONET | Aerosol Robotic Network |
| AFINSA | Atmospheric electric Field Network in South America |
| AES | Análise de Épocas Superpostas |
| CASLEO | Complejo Astronómico El Leoncito |
| CEA | Campo Elétrico Atmosférico |
| CEAG | Círculo Elétrico Atmosférico Global |
| CIR | Co-rotating Interaction Region |
| CLP | Camada Limite Planetária |
| CME | Coronal Mass Ejection |
| DST | Disturbance Storm Time |
| DF | Decréscimo Forbush |
| EFM | Electric Field Mill |
| ESC | Electric Shower Cloud |
| EPS | Eventos de Prótons Solares |
| GOES | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| GLE | Ground Level Enhancement |
| GLOCAEM | Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements |
| IDL | Interactive Data Language |
| IZMIRAN | Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation |
| LASCO | Large Angle Spectrometric Coronagraph |
| LIS | Lightning Imaging Sensor |
| LT | Local Time |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NR | Número de Raios |
| OTD | Optical Transient Detector |
| RC | Raios Cósmicos |
| SOHO | Solar and Heliospheric Observatory |
| STARNET | Sferics Timing and Ranging Network |
| TRMM | Tropical Rainfall Measuring Mission |
| UK | United Kingdom |
| UT | Universal Time |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 21 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 23 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 25 |
| 2.1 ESTRUTURA ELÉTRICA DA ATMOSFERA..... | 25 |
| 2.2 CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO DE TEMPO BOM..... | 26 |
| 2.3 TEMPESTADES ELÉTRICAS..... | 29 |
| 2.4 CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL..... | 33 |
| 2.5 VARIAÇÃO TEMPORAL DO CAMPO ELÉTRICO AMOSFÉRICO EM DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS..... | 39 |
| 2.6 INFLUÊNCIA DE EFEITOS LOCAIS NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO (AEROSSÓIS) | 41 |
| 2.7 INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE SOLAR NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO..... | 45 |
| 2.7.1 O SOL E OS FENÔMENOS SOLARES..... | 45 |
| 2.7.2 RAIOS CÓSMICOS..... | 49 |
| 2.7.3 EFEITOS DOS EVENTOS SOLARES NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO..... | 51 |
| 2.7.3.1 EFEITOS DE LONGO PRAZO..... | 51 |
| 2.7.3.2 EFEITOS DE CURTO PRAZO..... | 53 |
| 3. INSTRUMENTAÇÃO..... | 56 |
| 3.1 A REDE AFINSA | 56 |
| 3.1.1 SENSORES EFM..... | 56 |
| 3.1.2 A REDE DE SENSORES..... | 57 |
| 3.2 OUTROS INSTRUMENTOS..... | 59 |
| 3.2.1 A REDE STARNET..... | 60 |
| 3.2.2 A REDE AERONET..... | 60 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.3 DADOS DE EVENTOS SOLARES..... | 61 |
| 4. METODOLOGIA..... | 63 |
| 4.1 CORREÇÃO DOS VALORES DE AMPLITUDE DO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO..... | 63 |
| 4.2 OBTENÇÃO DE DIAS DE TEMPO BOM E CURVAS PADRÃO..... | 63 |
| 4.3 ANÁLISE DE ÉPOCAS SUPERPOSTAS..... | 66 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 68 |
| 5.1 MÉDIAS MENSAIS, SAZONAIS E ANUAIS..... | 68 |
| 5.2 COMPARAÇÃO COM A CURVA DE CARNEGIE..... | 86 |
| 5.3 EFEITOS DE AEROSSÓIS..... | 100 |
| 5.4 EFEITOS SOLARES TERRESTRES..... | 105 |
| 5.4.1 EXPLOSÕES SOLARES..... | 108 |
| 5.4.2 PARTÍCULAS ENÉRGETICAS (EVENTOS DE PRÓTONS SOLARES) | 108 |
| 5.4.3 DECRÉSCIMO FORBUSH..... | 115 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 119 |
| 6.1 TRABALHOS FUTUROS..... | 121 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**APÊNDICE A: NÚMERO DE DIAS DE TEMPO BOM ESCOLHIDOS PARA
TODAS AS ESTAÇÕES.**

**APÊNDICE B: CURVAS MÉDIAS MENSAIS/SAZONAIS PARA AS ESTA-
ÇÕES CAS2, ICA, PLO, ROR, HYO, CGR1, CGR2 E SPA.**

**APENDICE C: TABELA DE EVENTOS SOLARES E DECRÉSCIMOS FOR-
BUSH**

1 INTRODUÇÃO

Desde as medidas realizadas no século XVIII por G. Beccaria, confirmou-se a existência de um campo elétrico atmosférico vertical (doravante chamado só campo elétrico atmosférico, CEA) em céu limpo, sem presença de tempestades elétricas, as quais apresentavam uma variação temporal diária típica (Canton, 1753; Parsons e Mazeas, 1753; Bennet e Harrison, 2007). No século XX o Instituto Carnegie de Washington fez medições do CEA nos oceanos do mundo (livres de poluição), os quais mostraram em condições de tempo bom¹ uma variação diária característica independentemente da posição do navio, em horário universal. A curva média dessas medições do CEA foi conhecida como a Curva de Carnegie (Harrison, 2013). Uma pergunta frequente foi a origem do CEA e como era mantido. Lord Kelvin (1860) foi o primeiro a propor que o CEA é originado pela existência de um capacitor Terra-Ionosfera, onde a Terra tem uma carga negativa e a base da ionosfera uma carga positiva. A atmosfera terrestre se comporta como um dielétrico com fugas, devido à pequena condutividade elétrica, causando uma corrente elétrica que descarrega o capacitor. Para manter carregado o capacitor, Wilson (1903, 1921) propôs que as tempestades elétricas e nuvens de chuva eletrificadas se comportam como “baterias elétricas”, as quais mantêm carregadas as placas do capacitor. A conexão entre as variações do campo elétrico atmosférico e as tempestades elétricas (e nuvens de chuva eletrificadas) forma parte do Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG).

O CEAG relaciona separação de cargas em regiões de tempo perturbado com fluxo de corrente em regiões de tempo bom. O circuito está formado entre a superfície da Terra (condutor), e a ionosfera (plasma fracamente ionizado). Entre estas duas camadas está a atmosfera (isolante elétrico). As tempestades elétricas e as nuvens de chuva atuam como “baterias elétricas” em regiões de tempo perturbado, fazendo com que uma corrente elétrica flua até a ionosfera e, nesta camada a corrente flui livremente devido à alta condutividade. Em regiões de tempo bom existem correntes descendentes. O circuito é fechado por correntes que fluem através das rochas e os oceanos na superfície da Terra (Rycroft et al., 2000; Rycroft et al., 2008). A correlação temporal entre o campo elétrico atmosférico e as tempestades elétricas e nuvens de chuva foi confirmada posteriormente na similaridade entre a variação diária, em horário universal, do CEA de tempo bom e a variação diária global das tempestades elétricas e nuvens de chuva

¹ Condições de tempo bom para aquela época foram consideradas aquelas em que não ocorriam processos de eletrificação local e sem nuvens convectivas (Harrison et al., 2013).

eletrofificadas (Whipple, 1929; Liu et al., 2010; Mach et al., 2011; Cecil et al., 2014; Blakeslee et al., 2014; Peterson et al., 2017; Peterson et al., 2018). Além disso, numa escala sazonal também existe uma boa correlação entre ambos os parâmetros (Adlerman e Williams, 1996; Markson, 2007; Burns et al., 2012), mencionada por vários autores (Rycroft et al., 2000; Rycroft et al., 2008; Williams, 2009; Harrison, 2013). No entanto, o monitoramento contínuo do campo elétrico atmosférico em diferentes áreas geográficas é necessário para ajudar na interpretação da dinâmica do circuito elétrico atmosférico global (Rycroft et al., 2012).

Diversos autores tentaram reproduzir a curva de Carnegie com medições de campo elétrico atmosférico em continente com a finalidade de estudar variações globais no circuito elétrico atmosférico. Entre elas, as que apresentam uma boa correlação quando comparadas com a curva de Carnegie, são as medições do CEA na Antártida devido à baixa radioatividade do solo e ausência de poluição (Burns et al., 2012; Jeeva et al., 2016). Por outro lado, desvios significativos são encontrados em medições realizadas em outros lugares devido a diversos fatores, tais como radioatividade natural do solo, aerossóis (por exemplo poluição e fumaça), atividade vulcânica, entre outros (Harrison e Aplin, 2002; Harrison, 2006; Markson, 2007; Silva et al., 2014; Gurmani et al., 2018; Nicoll et al., 2019). Para tentar minimizar esses efeitos, medições do campo elétrico são realizadas em sítios afastados de áreas urbanas (Cobb, 1968; Reiter, 1969; Reiter, 1971; Tacza et al., 2014; Kamogawa et al., 2015; Lopes et al., 2017; Yaniv et al., 2017). A obtenção de curvas padrão diárias confiáveis do CEA em condições de tempo bom é importante para estudar os desvios do CEA durante fenômenos solares ou qualquer outro fenômeno geofísico (por exemplo atividade sísmica).

Um tópico amplamente estudado e ainda não muito bem compreendido são os mecanismos envolvidos na relação entre os fenômenos solares (e extragalácticos) e o circuito elétrico atmosférico global. O CEAG é afetado por fenômenos solares (por exemplo partículas energéticas) principalmente em altas latitudes, e em menor escala em médias e baixas latitudes (Rycroft et al., 2012). Os efeitos solares, tais como explosões solares, eventos de prótons energéticos e ejeções de massa coronal, no circuito elétrico podem ser estudados observando as variações do campo elétrico atmosférico, em condições de tempo bom, em longa (Harrison e Usoskin, 2010; Harrison et al., 2013) e curta escala temporal (Cobb, 1967; Reiter, 1969; Reiter, 1971; Märcz 1997; Farrell e Desch, 2002; Nicoll e Harrison, 2014). Porém, os mecanismos do acoplamento entre esses fenômenos são pouco compreendidos. Markson (1978) propôs que partículas energéticas podem aumentar a taxa de ionização acima das tempestades elétricas, o

que produz um incremento na condutividade elétrica nessa região causando uma diminuição na resistência entre o topo da tempestade e a ionosfera. Isso permite que mais corrente flua para cima e, portanto, através do circuito elétrico global. Consequentemente, temos um incremento na carga elétrica no limite superior do circuito elétrico global, gerando um aumento do potencial elétrico em regiões de tempo bom e, assim, aumentando o campo elétrico atmosférico. Diversos trabalhos mostraram esse incremento no CEA depois de explosões solares (Cobb, 1967; Reiter, 1969; Reiter, 1971; Sartor, 1980; Sheftel et al., 1994). Porém, o período de tempo analisado incluiu muitos fenômenos solares, interplanetários e geomagnéticos, como explosões solares, eventos de prótons solares, ejeções de massa coronal, decréscimo Forbush e intensas tempestades geomagnéticas. Portanto, para entender melhor o papel desses fenômenos no circuito elétrico global, é necessário isolar e estudar separadamente cada um deles.

1.1 OBJETIVOS

A presente tese tem foco no estudo da variação do campo elétrico atmosférico em condições de tempo bom e durante alguns fenômenos solares. Para isso foram utilizados dados de uma rede de sensores de campo elétrico instalados em diferentes lugares na América do Sul chamada “*the AFINSA network*” (The Atmospheric electric Field Network in South America).

Os objetivos gerais da tese são:

- Obter curvas de variação diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom (curvas padrão) em diferentes escalas temporais (mensais, sazonais e anuais) para todas as estações.
- Comparar as médias anuais da variação diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom com a curva universal de Carnegie para estudar efeitos globais e locais, para cada estação.
- Manutenção da rede de sensores do campo elétrico e implementação de novos sensores.

Os objetivos específicos da tese são:

- Remover a contribuição dos aerossóis no campo elétrico atmosférico de tempo bom, para a estação localizada no CASLEO (CAS), com a finalidade de obter uma variação global, a qual será comparada com a ocorrência de raios.
- Analisar os desvios fora das curvas padrão, para a estação CAS, em relação à ocorrência de fenômenos externos, tais como eventos solares (explosões solares e eventos de prótons) e decréscimos Forbush.

2 ANTECEDENTES

Neste capítulo são descritos alguns conceitos básicos da estrutura elétrica da atmosfera, o campo elétrico atmosférico (CEA) de tempo bom, formação das cargas e estrutura elétrica nas nuvens de tempestades elétricas, o circuito elétrico atmosférico global (CEAG) e sua correlação temporal com a curva de Carnegie. Além disso, são mencionados alguns trabalhos sobre a variação do CEA em diferentes escalas temporais, a influência dos aerossóis no CEA e os possíveis efeitos solares no CEA.

2.1 ESTRUTURA ELÉTRICA DA ATMOSFERA

A estrutura elétrica do sistema atmosfera – terra pode ser dividida em três partes: baixa atmosfera, média atmosfera e alta atmosfera. Na baixa atmosfera está a troposfera e a baixa estratosfera (aprox. 30 km), e a camada limite planetária (CLP). Na CLP a eletricidade é fortemente afetada por processos turbulentos produzindo uma forte variação na velocidade de produção de íons, assim como também em suas propriedades físicas. As principais fontes de ionização na baixa atmosfera são os raios cósmicos, gases radioativos e a radioatividade natural do solo (aprox. 1 km) (Pierce e Withson, 1964).

A atmosfera média compreende a estratosfera superior e a mesosfera, encontrando seu limite superior em torno dos 85 km de altitude. As fontes de ionização são múltiplas: os raios cósmicos (principalmente na estratosfera), a radiação solar intensa em Lyman Alfa (na mesosfera), os raios X solares (no limite superior da atmosfera média) e os prótons solares (principalmente em altas latitudes) (Reid, 1986).

Na alta atmosfera está a termosfera e a exosfera (tem início no final da mesosfera e vai até 800 km acima do solo). A termosfera está incluída na ionosfera. A ionosfera começa acima da mesopausa (limite superior da mesosfera) e se estende a uma altura de cerca de 500 km. Nesta região, as espécies ionizadas não se recombina necessariamente rapidamente, e há uma população permanente de íons e elétrons livres. As principais fontes de ionização são a radiação ultravioleta, os raios X solares e a precipitação de partículas energéticas da magnetosfera para

altas latitudes. O meio ionizado afeta as ondas de rádio e, como plasma, pode suportar e gerar uma variedade de ondas, interações e instabilidades que não são encontradas em um gás neutro (Singh et al., 2004).

A figura 1 mostra o perfil de condutividade elétrica para a atmosfera terrestre. Além disso mostra-se os perfis de temperatura e densidade eletrônica.

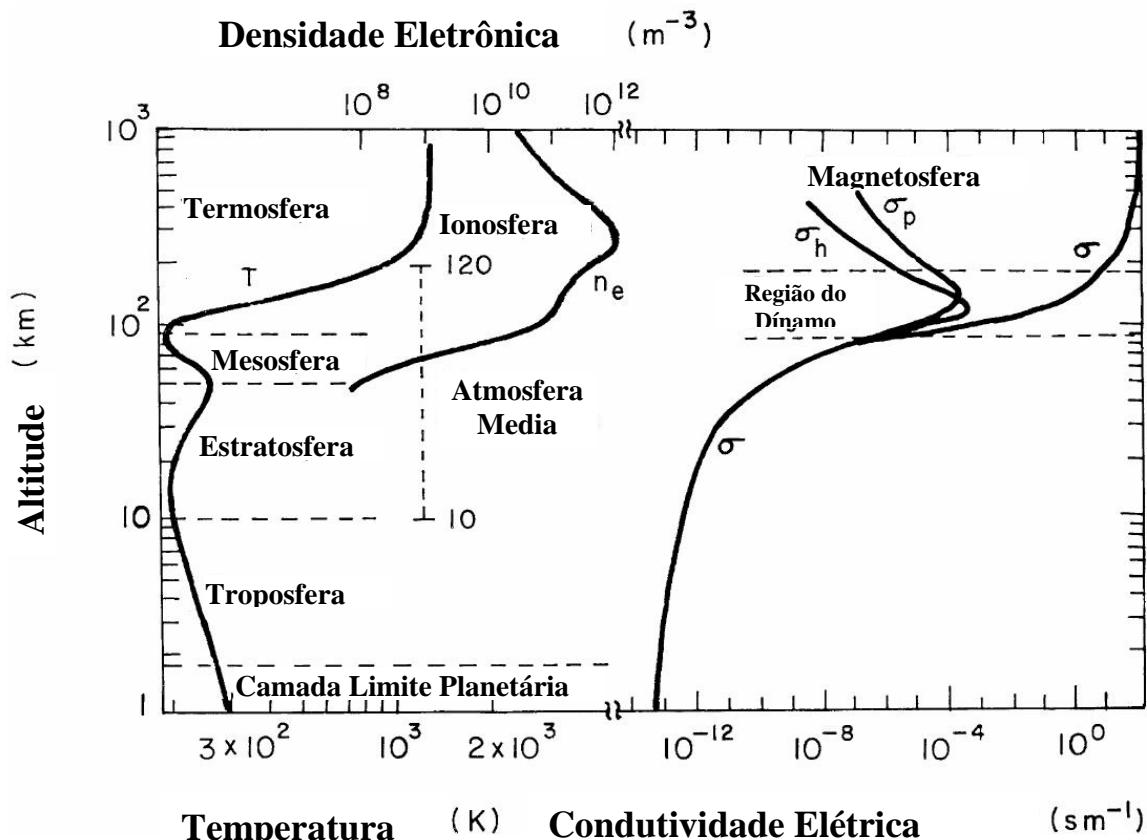


Figura 1: Distribuição de perfis da temperatura, densidade eletrônica e condutividade elétrica da atmosfera terrestre. (Fonte: Adaptado de Singh et al., 2004)

2.2 CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO DE TEMPO BOM

O campo elétrico atmosférico (CEA) persiste na atmosfera terrestre e têm uma variação diária típica que se repete em condições de tempo bom². Medições do CEA de tempo bom realizadas

² A necessidade de identificar as condições de tempo bom meteorologicamente é amplamente reconhecida. Por exemplo, a partir de 1 de maio de 1964, a oficina de meteorologia do Reino Unido estabeleceu as condições meteorológicas de tempo bom, como aqueles sem hidrometeoros (por exemplo chuva, neve, granizo, etc), sem nuvens estratos baixas, com nuvens cumulonimbus inferior a três oitavos e uma velocidade média horária do vento de menos de 8 m/s (Harrison, 2013).

nos oceanos do mundo (livres de poluição) mostraram que essa variação diária se mantinha em horário universal (UT – do inglês, Universal Time) independentemente da posição do navio. A variação média encontrada, para um total de 82 dias, foi conhecida como a curva de Carnegie e apresenta um mínimo às 3 UT e um máximo às 19 UT (figura 2). Em condições de tempo bom, a intensidade do CEA é da ordem de $E \sim -130$ V/m, onde o sinal negativo indica que o vetor campo elétrico está apontando para a superfície terrestre. Ao longo do texto só será considerada a magnitude do CEA e curva média para os 82 dias (Harrison, 2013).

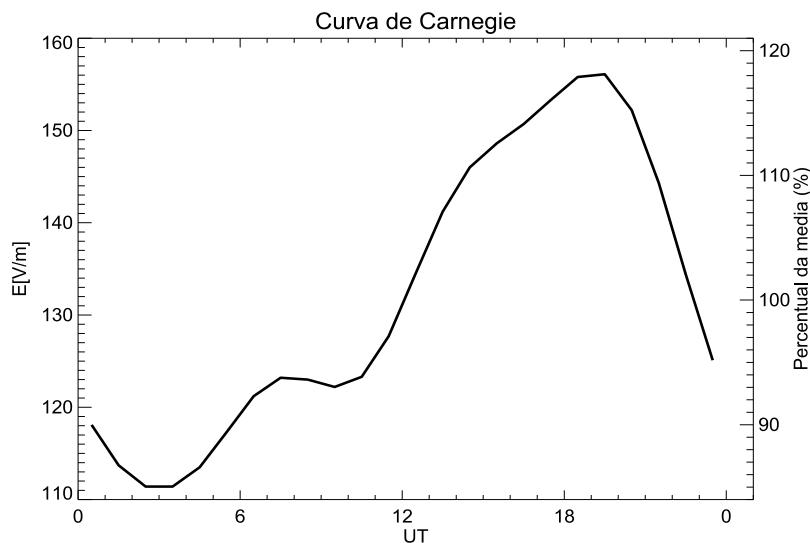


Figura 2: Variação média diária do campo elétrico atmosférico em condições de tempo bom registrada nos oceanos do mundo inteiro, conhecida como a curva de Carnegie. (Fonte: Adaptado de Harrison, 2013)

Diversos trabalhos tentaram reproduzir a ‘curva clássica de Carnegie’, porém medidas do CEA de tempo bom na superfície terrestre apresentam diferenças na amplitude e na forma quando comparadas com a curva de Carnegie devido a efeitos locais, tais como a radioatividade natural da superfície terrestre, poluição, fumaça, etc. (Harrison e Aplin, 2002; Harrison, 2006; Tammet et al., 2009; Silva et al., 2014; Kamogawa et al., 2015; Yaniv et al., 2016; Yaniv et al., 2017; Gurmani et al., 2018; Nicoll et al., 2019). Na subseção 2.6 será discutido um pouco mais sobre os efeitos locais. A figura 3 mostra as curvas típicas do CEA de tempo bom na superfície terrestre para diferentes localidades comparadas com a curva de Carnegie. Pode-se observar claramente as diferenças na amplitude e forma entre as curvas devido a efeitos locais. Adicionalmente, algumas localidades apresentam um pico máximo (figura 3a) e outras até dois picos máximos (figura 3b), isso devido principalmente a efeitos de poluição local. Por outro lado, medições do campo elétrico de tempo bom feitas na Antártida (figura 4), região livre de poluição e com baixa radioatividade natural do solo, mostram uma boa correlação na amplitude e forma quando comparadas com a curva de Carnegie (Burns et al., 2012; Jeeva et al., 2016).

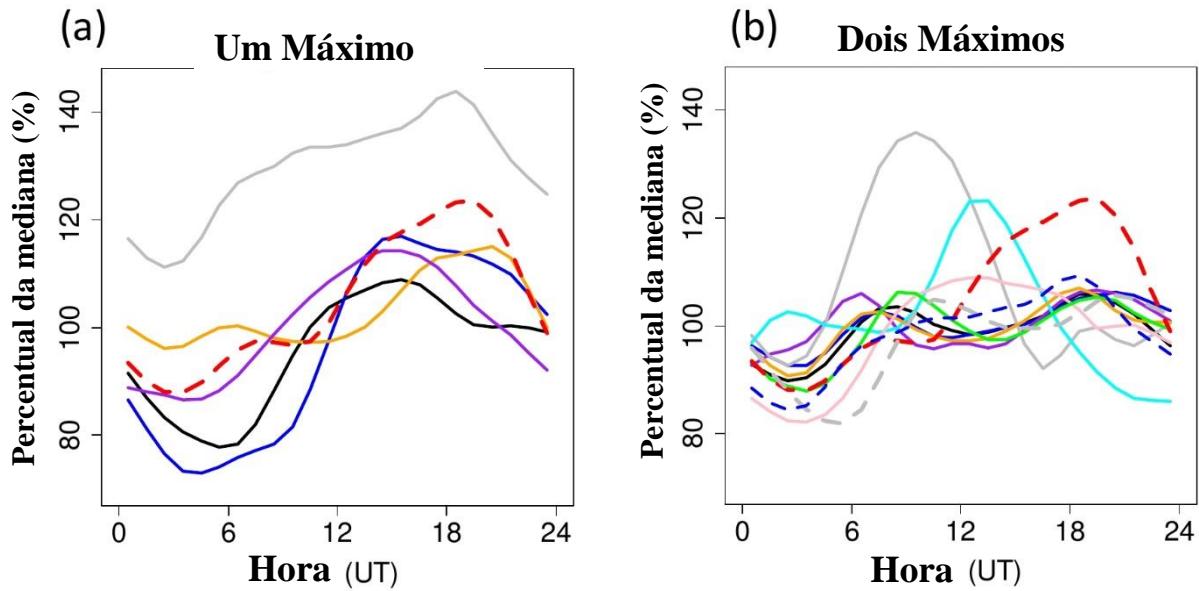


Figura 3: Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para diferentes localidades em termos do percentual da média para o ano 2016. Algumas localidades apresentam um pico máximo (a) e outras dois picos (b). (a) Carnegie (vermelho), CAS2 - Argentina (azul), Graciosa - Portugal (roxa), Halley - Antártida (laranja), Montanha Hermon - Israel (preto), Aragats - Armenia (cinza). (b) Carnegie (vermelho), Studenec - República Tcheca (preto), Reading - UK (Azul), Panska - República Tcheca (roxa), Xanthi - Grécia (cinza), Tripura - Índia (ciano), Swider – Polônia (laranja), Evora - Portugal (rosa), Bristol Langford - UK (verde), Mitzpe Ramon – Israel (cinza tracejado), Nagycenk - Hungria (azul tracejado). (Fonte: Adaptado de Nicoll et al., 2019)

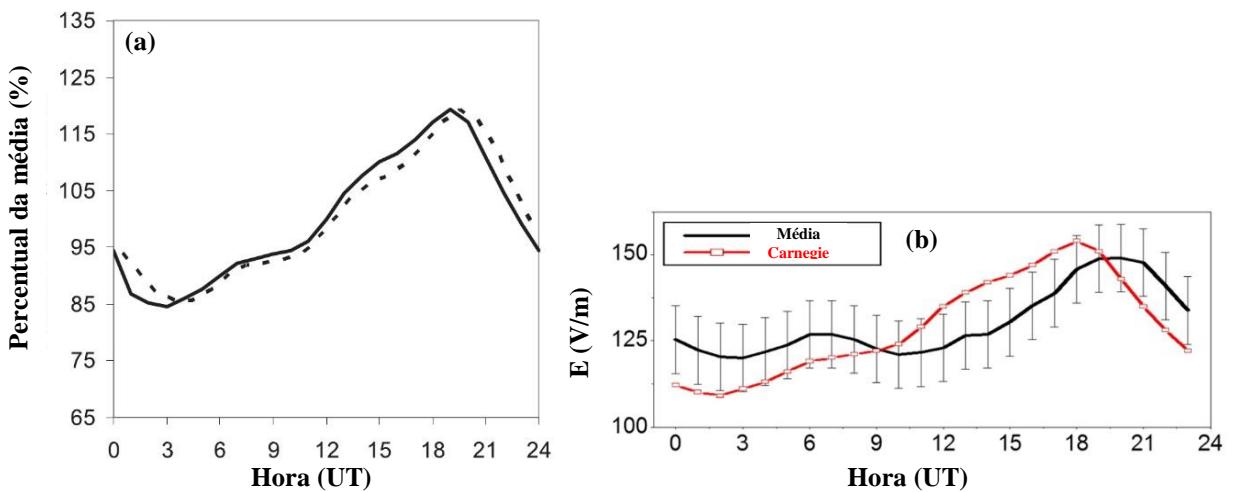


Figura 4: Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para duas diferentes localidades na Antártida. (a) Comparação entre as curvas médias de Carnegie (linha sólida) e Vostok (78.5°S , 107°E , linha tracejada) para os anos entre 1998-2001, em termos do percentual da média. (Fonte: Adaptado de Burns et al., 2012) (b) Comparação entre as curvas médias de Carnegie (vermelho) e Maitri (70.76°S , 11.74°E , preto) para os anos entre 2005-2014. As barras de erro representam um desvio padrão para Maitri. (Fonte: Adaptado de Jeeva et al., 2016)

2.3 TEMPESTADES ELÉTRICAS

Nuvens se formam quando o ar torna-se supersaturado com respeito à água no estado líquido (ou em alguns casos, com respeito ao gelo). O processo de formação das nuvens de tempestade na atmosfera depende basicamente de três fatores: da umidade do ar, do grau de instabilidade vertical da atmosfera, e aos mecanismos dinâmicos forçantes (Wallace e Hobbs, 1977). O tipo de nuvem capaz de produzir um significativo número de raios, relâmpagos e trovões é definido como nuvem de tempestade, também conhecida como Cumulonimbus (Cotton e Anthes, 1989). Nuvens de tempestade podem se apresentar de dois modos: isoladas, também conhecidas como tempestades locais, ou em grupos, formando tempestades organizadas. Uma tempestade isolada pode ser formada por uma única célula³, por várias células ou por uma supercélula (Wallace e Hobbs, 2006).

Dados sobre um grande número de tempestades foram compostos em conjunto para construir um modelo idealizado do ciclo de vida de uma típica tempestade unicelular. Neste modelo, ver figura 5, o ciclo de vida de uma única célula dentro de uma tempestade multicelular é mostrado em termos de três estágios: cumulus, maduro e dissipação. Tempestades multicelulares consistem de várias destas células, que crescem e decaem em sucessão, cada uma tendo um tempo de vida de cerca de meia hora (Wallace e Hobbs, 2006).

Tempestades organizadas também conhecidas como Sistemas Convectivos de Mesoescala, são aglomerados de nuvens convectivas profundas e mais largas que tempestades individuais. Estão frequentemente caracterizadas por extensas nuvens estratiformes, localizadas na média e alta troposfera, em forma de bigorna com centenas de quilômetros na dimensão horizontal. Estes sistemas possuem períodos típicos de vida em torno de 6 a 12 horas e as tempestades embebidas em seu interior frequentemente são fontes de intensa precipitação, fortes ventos, tornados, granizo e intensa atividade elétrica (Cotton e Anthes, 1989).

No início do século XX, foi proposto o primeiro modelo da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade através de medidas do componente vertical do campo elétrico no solo. Neste modelo

³ Célula: Uma célula, neste contexto, é uma entidade dinâmica caracterizada por uma região compacta de movimentos de ar verticais relativamente fortes, que podem ser identificadas por meio de radar a partir do seu volume associado de precipitação relativamente intensa (Browning, 1977).

a nuvem pode ser considerada como um dipolo elétrico positivo, composta por dois centros de cargas representando uma região carregada positivamente acima de uma região carregada negativamente (Wilson, 1921). Estudos recentes têm evidenciado a existência de uma estrutura mais complexa, denominada “estrutura multipolar” (figura 6). Neste modelo, quatro regiões de carga são mostradas perto das correntes ascendentes, e seis regiões de carga são mostradas fora das correntes ascendentes dentro da região de precipitação convectiva (Stolzenburg et al., 1998).

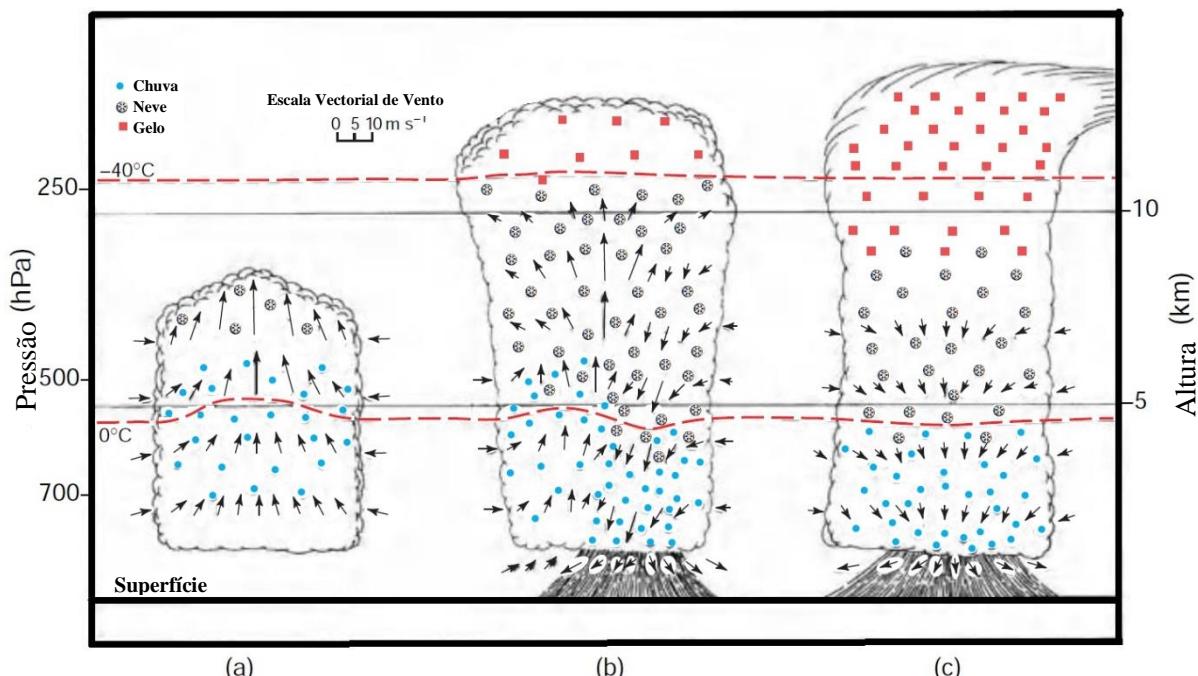


Figura 5: Esquema de uma tempestade de uma única célula normal típica em três estágios de seu ciclo de vida mostrando (a) fase cumulus, (b) fase de maturidade, e (c) fase de dissipação. A escala horizontal é comprimida em cerca de 30% em relação à escala vertical na figura. As isotérmicas 0°C e -40°C são indicados em vermelho. (Fonte: Adaptado de Wallace e Hobbs, 2006)

Estudos observacionais do campo elétrico e vários experimentos de laboratório tentam explicar como funciona a eletrificação das nuvens de tempestades. Embora não exista uma caracterização geral sobre os processos de eletrificação, a literatura sugere algumas teorias na tentativa de explicar esses processos. As teorias de eletrificação de nuvem podem ser divididas em duas grandes categorias: a teoria da convecção e a teoria da precipitação.

A teoria da convecção supõe que as cargas elétricas na nuvem são fornecidas inicialmente por duas fontes externas. A primeira fonte são os raios cósmicos, os quais ionizam as moléculas de ar acima da nuvem (separa as cargas positivas e negativas). A segunda fonte é o forte campo elétrico em torno de objetos pontiagudos na superfície da terra, que produz uma "descarga de corona" de íons positivos. Estes íons positivos são transportados para cima pelo ar quente,

levantando-se por convecção. Depois de alcançar as regiões superiores da nuvem, estes íons positivos atraem os íons negativos, que foram formados pelos raios cósmicos acima da nuvem. Os íons negativos entram para a nuvem e rapidamente se ligam às gotas de água e cristais de gelo, formando assim uma camada de blindagem carregada negativamente. Por hipótese as correntes descendentes na periferia da nuvem, em seguida, transportam as partículas carregadas negativamente da camada de blindagem para baixo (Williams, 1989).

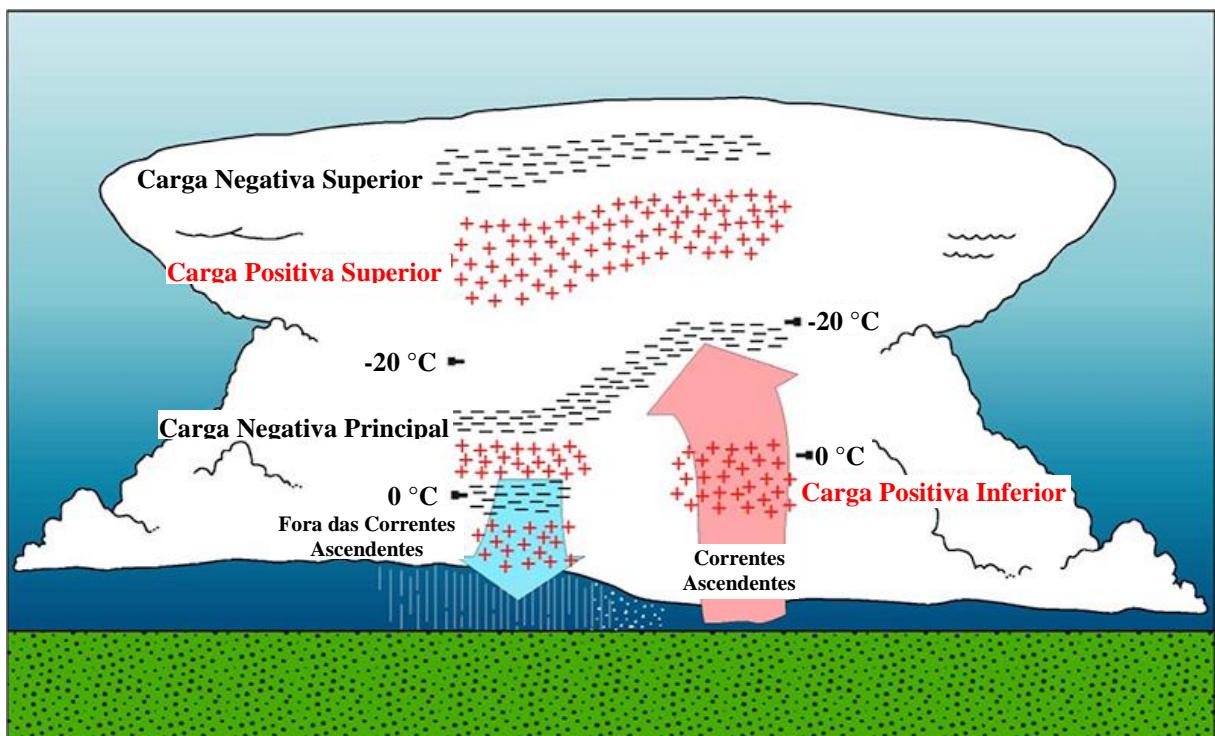


Figura 6: Diagrama esquemático mostrando a estrutura básica de carga no modelo multipolar. Quatro regiões de carga são mostradas perto das correntes ascendentes, e seis regiões de carga são mostradas fora das correntes ascendentes. (Fonte: Adaptado de Stolzenburg et al., 1998)

A teoria da precipitação supõe que gotas de chuva, granizo e graupel em uma nuvem de tempestade são levados para baixo pelo efeito da gravidade através do ar passando por pequenas gotículas de água e cristais de gelo, as quais permanecem em suspensão. As colisões entre as partículas grandes de precipitação e a neblina de gotículas de água e cristais de gelo são supostas para transferir carga negativa para as partículas de precipitação e, por conservação de carga, carga positiva para a neblina. Devido a isso, se as partículas de precipitação ficam carregadas negativamente, a parte inferior da nuvem irá acumular carga negativa e a parte superior carga positiva (Williams, 1989).

Os mecanismos para a separação de cargas na teoria da precipitação podem ser divididos em dois tipos: os mecanismos que requerem um campo elétrico preexistentes chamados “mecanismos indutivos” e os que não requerem um campo elétrico chamados “mecanismos não-indutivos”. O carregamento indutivo pode ser dividido em mecanismo íon-partícula e mecanismo partícula-partícula. No mecanismo íon-partícula os hidrometeoros precipitando são polarizados pelo campo elétrico existente. Se o hidrometeoro polarizado cai em relação aos íons que se movem sob a influência do vento e do campo elétrico, íons do mesmo sinal com a parte baixa do hidrometeoro são repelidos, e os íons do sinal oposto são atraídos e capturados (MacGorman e Rust, 1998). No mecanismo partícula-partícula, uma partícula de precipitação e uma partícula de nuvem são polarizadas pelo campo elétrico ambiente. Quando a partícula precipitando colide com uma partícula de nuvem, uma parte da carga na parte baixa da partícula de precipitação é transferida para a partícula de nuvem. Se a partícula de nuvem se afasta, ela carregará a carga que ganhou e deixará para trás um excesso do sinal de carga que está no topo das partículas (MacGorman e Rust, 1998). Dos vários tipos de mecanismos não indutivos o mecanismo graupel⁴-gelo é o único até agora que estudos detalhados de laboratório e modelagem sugeriram ser capaz de fazer com que as nuvens se tornem eletrificadas o suficiente para serem tempestades, embora outros mecanismos também possam fazer contribuições significativas (MacGorman e Rust, 1998). Nesse mecanismo as colisões entre o graupel e os cristais de gelo分离 as cargas elétricas durante o tempo de contato entre as duas partículas, as partículas com cargas opostas podem ser levadas em diferentes regiões da nuvem devido à força gravitacional e correntes convectivas.

A maioria das tempestades elétricas ocorre dentro das regiões tropicais entre a latitude de $\pm 30^\circ$ do equador ($\sim 50\%$ da área da superfície da Terra). Isso se deve ao aquecimento solar máximo nos trópicos e aos padrões gerais de circulação atmosférica entre os trópicos e os subtrópicos (Circulação de Hadley). Ao longo do equador térmico, que migra com as estações do ano, as massas de ar dos hemisférios norte e sul convergem ao longo da zona de convergência intertropical (ZCIT). Esta é a posição latitudinal da maioria das atividades de chuvas e tempestades elétricas. No entanto, nos trópicos, as tempestades concentram-se principalmente sobre as regiões continentais (Américas, África e sudeste da Ásia), com pouca atividade de tempestades elétricas observada sobre os oceanos (figura 7a e 7b). A razão para a preferência de tempestades para regiões continentais provavelmente está relacionada ao maior aquecimento da superfície

⁴ Graupel é o nome dado a precipitação de neve que cai na forma de pequenos esferoides de gelo.

diária sobre a terra em comparação com os oceanos, e por consequência, numa escala global as tempestades são maiores no verão do hemisfério Norte, ver figura 7c (Christian et al., 2003; Price, 2006; Cecil et al., 2014).

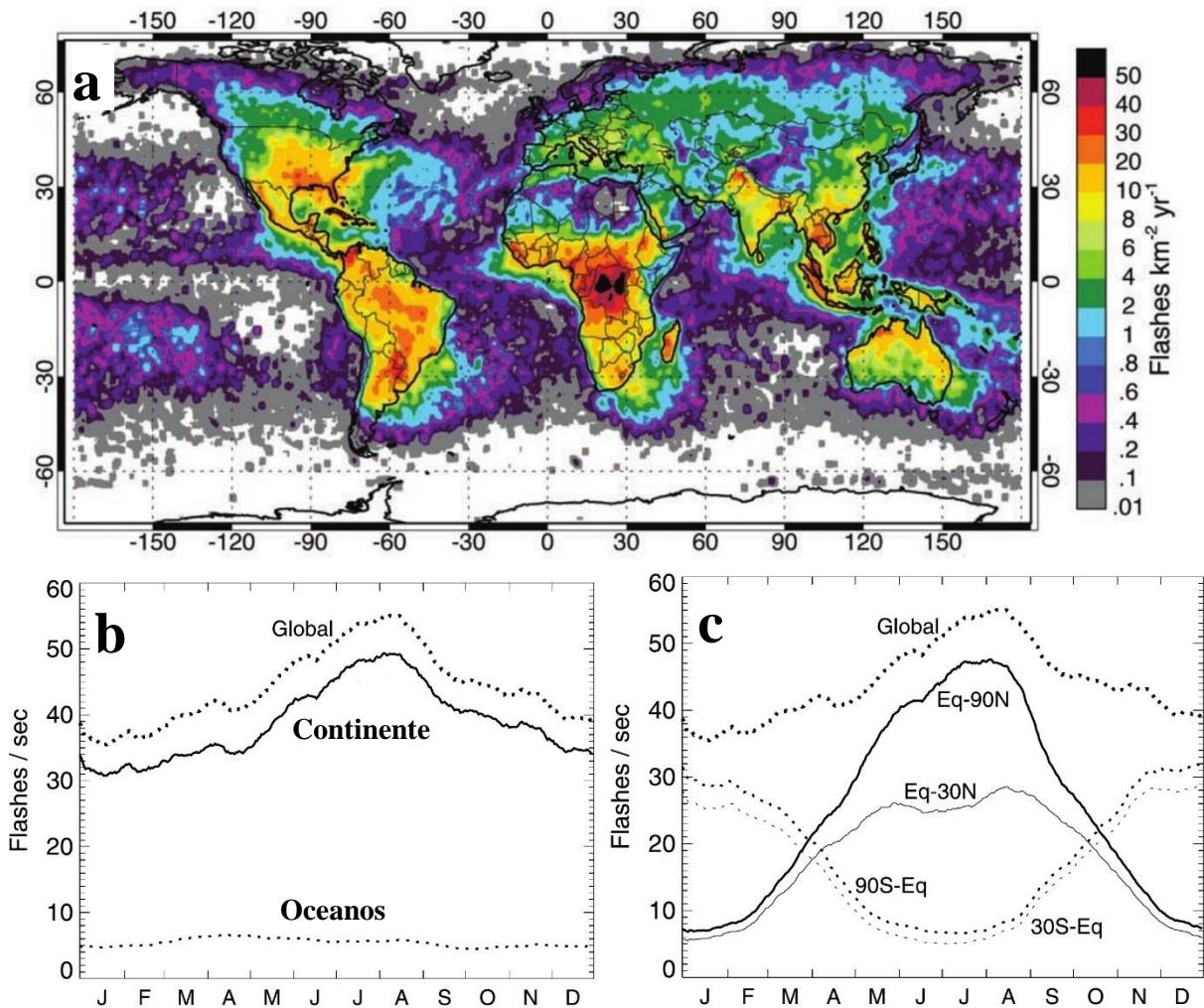


Figura 7: Distribuição anual da atividade de relâmpagos (ou do inglês *flashes*) para os anos entre 1995 até 2000 (a). O ciclo anual da taxa global de relâmpagos calculado com uma média móvel de 55 dias para as contribuições continentais e oceânicas (b), e contribuição do Hemisfério Norte e Sul (c). (Fonte: Adaptado de Christian et al., 2003)

2.4 CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL

Como explicado anteriormente, em condições de tempo bom, existe um campo elétrico atmosférico entre uma camada de carga positiva e outra de carga negativa, que aponta em direção ao centro da Terra (Roble e Tzur, 1986). A explicação para a existência deste campo elétrico foi apresentada primeiro por Lord Kelvin (1860) e, depois desenvolvida por C. T. R.

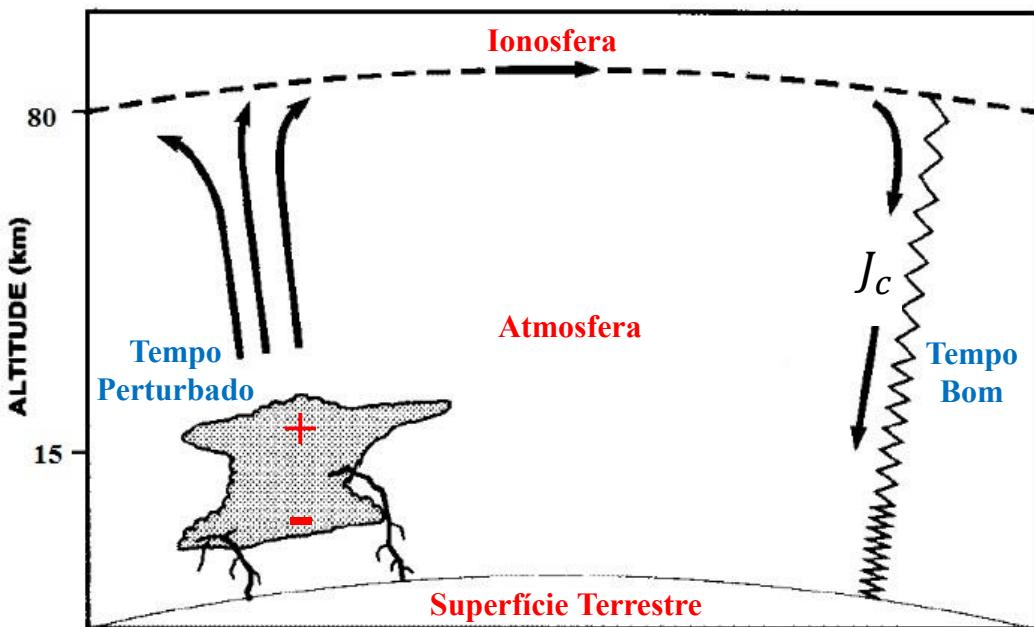


Figura 8: Esquema básico do Circuito Elétrico Atmosférico Global. (Fonte: Adaptado de MacGorman e Rust, 1998)

Wilson em 1921, que considerou a Terra como um capacitor esférico. A placa inferior do capacitor é a superfície da Terra, e a ionosfera, em um princípio, foi considerada a placa superior⁵. O dielétrico deste capacitor é o ar, cuja condutividade é muito baixa quando comparada com as condutividades do solo e da ionosfera (Rycroft et al., 2000). O ar não é um isolante perfeito, portanto existe uma densidade de corrente de fuga $j = 2 \times 10^{-12} A/m^2$ (Rycroft et al., 2000). Integrando esta densidade de corrente em todas as áreas de tempo bom da Terra, obtém-se $J = 1000A$, considerando a superfície da Terra $s \sim 5 \times 10^{14} m^2$. Essa corrente é suficiente para descarregar o capacitor Terra-Ionosfera em menos de uma hora. Este fato ficou conhecido como um problema fundamental na eletricidade atmosférica, pois não se sabia como esta corrente se mantinha (Rakov e Uman, 2003). Para resolver esta questão, foi proposto que as tempestades elétricas e seus raios atuam como geradores de corrente, trazendo cargas negativas para a superfície da Terra e levando uma carga positiva equivalente para a ionosfera na mesma taxa de 1000 A. Estima-se que existem simultaneamente cerca de 1000 tempestades com raios ocorrendo sobre cerca de 10 % da superfície da Terra, cada uma gerando uma corrente média de 1 A. No fim os dois efeitos se compensam e o capacitor se mantém carregado. As cargas positivas fluem livremente através da altamente condutora ionosfera, e as negativas

⁵ O capacitor Terra-Ionosfera fornece a estrutura natural para os circuitos globais DC (Direct Current) e AC (Alternating Current). O circuito DC (estudado na presente tese) envolve uma queda de voltagem de 250 kV/m entre a superfície terrestre e a ionosfera. O circuito AC envolve um fenômeno de onda eletromagnética conhecido como Ressonância Shumann (Williams, 2015).

através da superfície da Terra em direção às regiões de tempo bom. Nestas regiões, as cargas positivas se deslocam da ionosfera em direção à superfície da Terra, fechando o circuito (figura 8). O circuito descrito é conhecido como o Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG).

No entanto, o modelo do CEAG apresenta algumas inconsistências. Por um lado, o modelo de capacitor terra-ionosfera (figura 9a) não é compatível quando comparado com medidas experimentais (Haldoupis et al., 2017). Por exemplo, pela lei de Gauss da eletrostática, a magnitude do campo elétrico em qualquer ponto no capacitor é dada por:

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1)$$

onde: Q é a carga negativa da superfície terrestre, r é o rádio de uma esfera concêntrica entre as placas do capacitor e $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$ é a permitividade elétrica do vácuo. Agora, se $r = 6370 km$ e sabe-se que o campo elétrico na superfície terrestre em condições de tempo bom é $E \sim -130 V/m$, substituindo na equação 1 temos $Q \sim -5 \times 10^5 C$. Porém, condições de tempo bom não prevalecem em toda a Terra, por isso um valor global mais representativo é $Q \sim -2,5 \times 10^5 C$.

Adicionalmente, o valor de potencial elétrico V é:

$$E(r) = -\frac{dV}{dr} \quad (2)$$

Integrando é obtido:

$$\Delta V = V_I - V_T = V_I = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{h}{R(R+h)} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{h}{R^2} \quad (3)$$

onde: V_I e V_T é o potencial ionosférico e o potencial na superfície terrestre, respectivamente, R é o rádio da Terra e h à altura da ionosfera. Substituindo na equação 3 os valores de $R = 6370 km$ e $h = 70 km$ então $V_I \sim 3,1 \times 10^6 V$. O valor encontrado é muito maior que o valor medido $V_I \sim 2,5 \times 10^5 V$ (Markson, 2007). Além disso, a equação 1 mostra que para alturas de 10 e 20 km o campo E reduz um ~0,3% e ~0,6%, respectivamente. Porém, esses valores são muito pequenos quando comparados com as grandes reduções de ~95% e ~99%, respectivamente,

encontradas nas medições com balões (Markson et al., 1999; Holzworth et al., 2005).

Haldoupis et al. (2017) propõem um modelo de capacitor terra-atmosfera (figura 9b), onde uma das placas é a superfície da Terra (carga negativa), enquanto que a outra placa é a atmosfera terrestre (carga positiva). O modelo é baseado no fato que a condutividade elétrica da atmosfera incrementa com a altitude devido a ionização de raios cósmicos (figura 1). A continuidade da densidade de corrente elétrica vertical j através da atmosfera da Terra requer que o produto da condutividade elétrica, σ , e do campo elétrico, E , seja constante com a altitude (lei de Ohm):

$$j = \sigma E \quad (4)$$

Assim, se a condutividade incrementa com à altitude o campo elétrico diminuirá com à altitude, desde que a continuidade da densidade da corrente vertical prevalece, um fato aproximadamente válido mostrado por medidas experimentais (ver por exemplo Grigel et al., 1986 e Byrne et al., 1991).

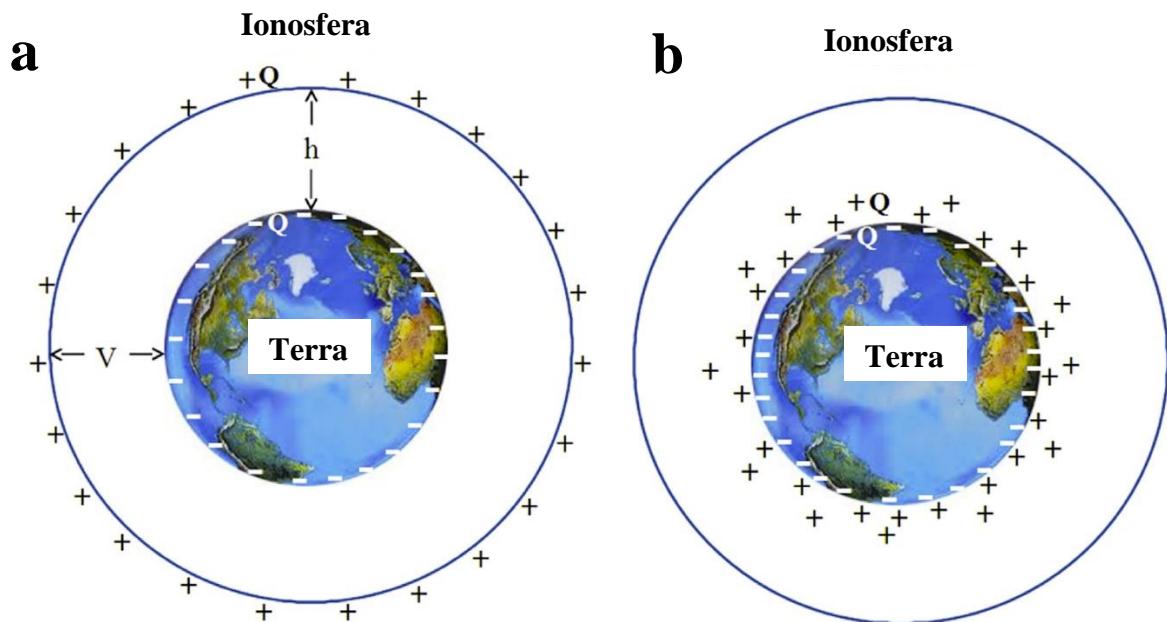


Figura 9: Modelo de capacitor terra-ionosfera (a) e modelo de capacitor terra-atmosfera (b) (Fonte: Adaptado de Haldoupis et al., 2017)

Por outro lado, o modelo do CEAG propõe que as tempestades elétricas são as principais "baterias" que mantêm o circuito. Isto foi mostrado no estudo de Whipple (1929), onde comparou-se a curva de Carnegie com a variação da área total global de tempestades do mundo e mostrou uma grande semelhança entre ambas as curvas (figura 10). No entanto, elas são

diferentes quantitativamente em dois aspectos fundamentais: a) a variação da amplitude relativa das áreas de tempestade sobre a terra é mais que o dobro do observado na curva de Carnegie, e b) o tempo de máxima atividade global de tempestade corresponde a horários locais da tarde na África, enquanto que a curva de Carnegie maximiza nas horas locais da tarde na América do Sul (Liu et al., 2010).

A fim de tentar entender essas discrepâncias, Kartalev et al. (2006) utilizou um modelo teórico para estimar os efeitos das correntes ascendentes de uma tempestade elétrica para a ionosfera. Os autores mostraram que a curva de Carnegie reflete preferencialmente a distribuição longitudinal de tempestades dentro de uma faixa de 22° de latitude ($\pm 11^\circ$) em torno do Equador magnético. Tempestades na América do Sul ocorrem perto do equador, enquanto a maioria das tempestades africanas ocorrem sobre o Congo em latitudes maiores entre 12°S e 20°S . Assim, fontes de tempestades na América do Sul parecem ter uma maior influência sobre a curva de Carnegie.

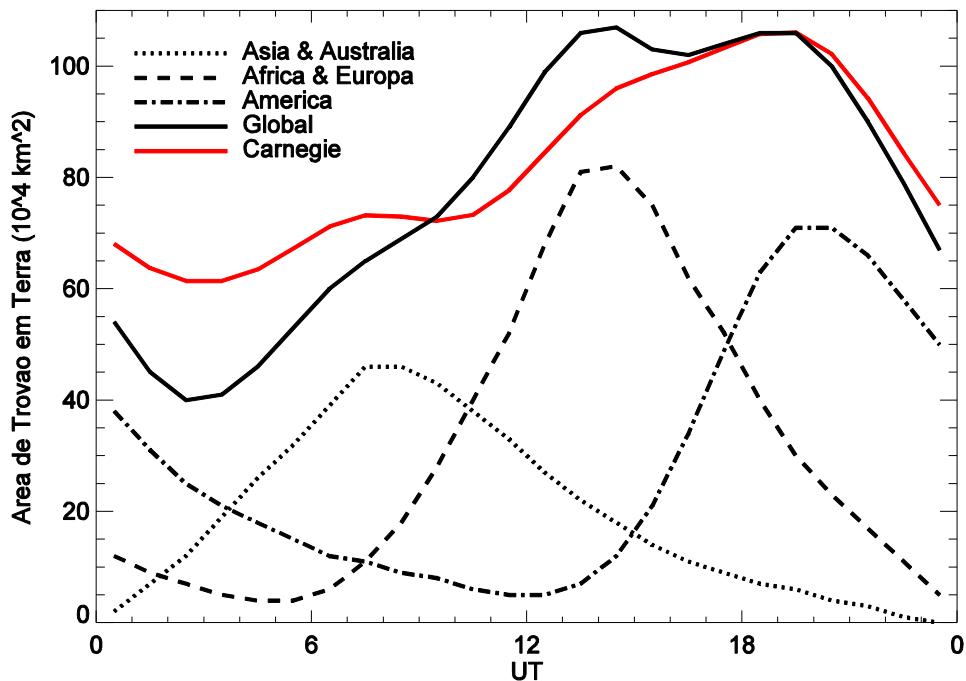


Figura 10: Comparação entre área total global de tempestades elétricas na Terra (linha sólida preta), com suas contribuições regionais (linhas tracejadas), e a curva de Carnegie (linha sólida vermelha). (Fonte: Adaptado de Whipple, 1929)

Adicionalmente, Liu et al. (2010) compararam a curva de Carnegie com a variação diária de precipitação, das tempestades e das nuvens de chuva eletrificadas (ESCs - do inglês, *Electric Shower Clouds*) utilizando-se um banco de dados de 10 anos da missão Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Os autores concluem que não só tempestades elétricas contribuem

para a curva de Carnegie, regiões de precipitação fora das tempestades também são importantes. Blakeslee et al. (2014), utilizando dados obtidos dos satélites Optical Transient Detector (OTD) e Lightning Imaging Sensor (LIS), junto com observações elétricas de missões de aviões voando em grande altitude, descobriram que a corrente global total é distribuída da seguinte forma: tempestades elétricas terrestres (52%), tempestades oceânicas (31%), ESCs oceânicas não produzindo raios (15%) e ESCs terrestres (2%). Estudos recentes encontraram que as tempestades elétricas contribuem com 61 % da corrente global e ESCs contribuem com 39 % (Peterson et al., 2018). A figura 11 mostra que a variação da amplitude relativa é melhor comparando a curva de Carnegie com a variação das tempestades elétricas e ESCs do que comparando só com a variação dos relâmpagos. Estes resultados são consistentes com as previsões de Wilson (1903), as quais estabelecem que a carga negativa é levada para o solo pela chuva (precipitação) atuando como um gerador de corrente importante na manutenção do circuito elétrico atmosférico global. Da mesma forma, Wilson (1921) especulou que tempestades e ESCs são responsáveis pela precipitação da carga negativa. Apesar do domínio da África na ocorrência de raios, sua contribuição para a variação diária do CEAG é menos importante do que das Américas, devido à maior contribuição de ESCs nesta região. Isso pode ser evidenciado na figura 12, onde mostra-se a distribuição por longitude da variação global de relâmpagos (linha tracejada) e a variação da corrente total (linha sólida). A produção da corrente é maior nas Américas, seguida por Ásia e depois por África em contraste ao domínio dos relâmpagos em África.

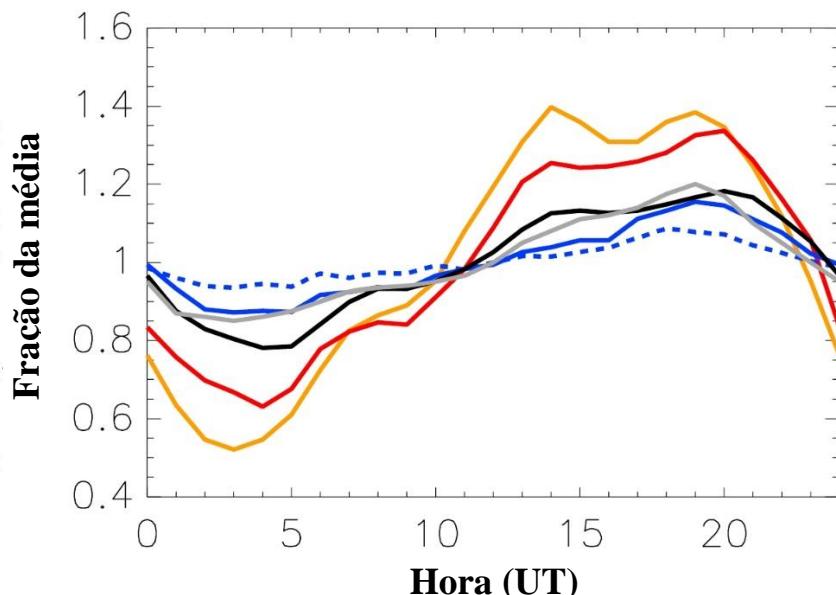


Figura 11: Variação da amplitude relativa entre a curva de Carnegie (linha solida cinza) comparada com os geradores do circuito elétrico global. Relâmpagos (linha laranja, Whipple, 1929), relâmpagos detectados pelo OTD/LIS (linha vermelha, Cecil et al., 2014), ESCs (linha tracejada azul, Liu et al., 2010), ESCs e tempestades elétricas (linha azul, Liu et al., 2010) e relâmpagos e ESCs x3 (linha preta, Mach et al., 2011). (Fonte: Adaptado de Peterson et al., 2017)

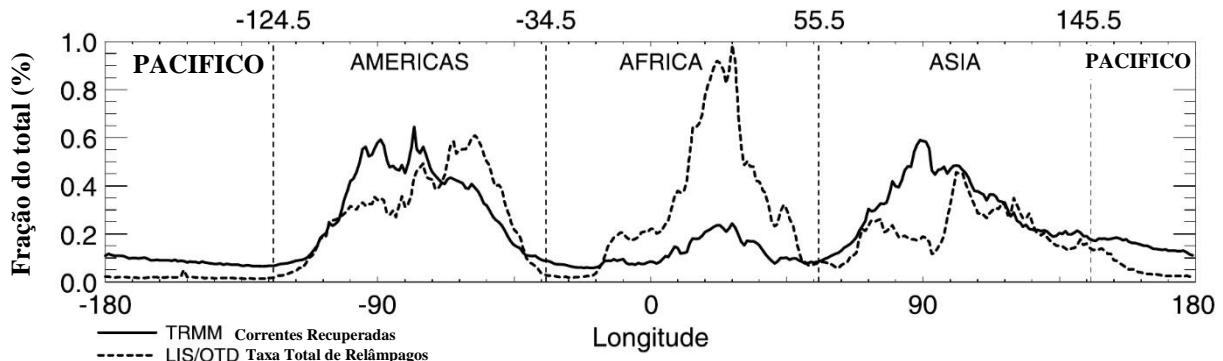


Figura 12: Distribuição por longitude da corrente total (linha sólida) e atividade de relâmpagos registrada pelo OTD/LIS (linha tracejada). (Fonte: Adaptado de Peterson et al. 2018)

Atualmente sabe-se que o circuito elétrico atmosférico global é impulsionado por tempestades, ESCs, e também é influenciado por partículas energéticas carregadas do espaço (Rycroft et al., 2012). No entanto, mais estudos observacionais em diferentes regiões geográficas são necessários para investigar esse problema em detalhe.

2.5 VARIAÇÃO TEMPORAL DO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO EM DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS

O campo elétrico atmosférico muda constantemente no tempo em três escalas temporais: escala diária, sazonal e anual. Na escala diária, o CEA de tempo bom apresenta uma curva típica característica a qual pode mostrar uma boa correlação com a curva de Carnegie e, portanto, dar informação de um efeito global ou a curva típica pode ser influenciada por efeitos locais, tais como radioatividade natural do solo ou poluição, o qual representa uma característica própria do local de medição.

Numa escala sazonal, acredita-se que o CEA deve seguir a mesma variação global das tempestades elétricas (figura 7b, 7c), isto é, valores altos entre os meses de junho e agosto, e valores baixos entre os meses de dezembro e fevereiro. Isso é evidenciado nas medições do campo elétrico efetuadas nos oceanos (curva de Carnegie) e na Antártida, onde a característica típica desses locais é a baixa radioatividade do solo e ausência de poluição (Adlerman e Williams, 1996; Burns et al., 2012; Jeeva et al., 2016). Porém, medições do CEA na superfície do solo em diferentes locais, ao redor da Terra, mostram diferentes sazonalidades. A figura 13 mostra as médias mensais do campo elétrico para diferentes lugares. Pode-se observar que para

as estações do hemisfério norte apresentam valores altos entre os meses de novembro até fevereiro e valores baixos entre os meses de junho até agosto (figura 13a até figura 13g). Por outro lado, os locais do hemisfério sul apresentam médias mensais do CEA com valores altos entre junho e agosto e valores baixos entre novembro e fevereiro (figura 13h e figura 13i). Já as localidades perto dos trópicos não apresentam uma clara sazonalidade (figura 13j e figura 13k). Adlerman e Williams (1996) propõem que aerossóis influenciam no local de medida afetando o campo elétrico atmosférico de tempo bom.

Com respeito a variação do CEA ao longo dos anos diferentes autores propuseram diversos efeitos, entre eles: variação com o ciclo de raios cósmicos (Harrison e Usoskin, 2010) e variação com o fenômeno de “El Niño” (Harrison et al., 2011). Porém, é preciso mais análises de séries temporais longas do CEA em diferentes localidades ao redor do mundo para confirmar tais evidências.

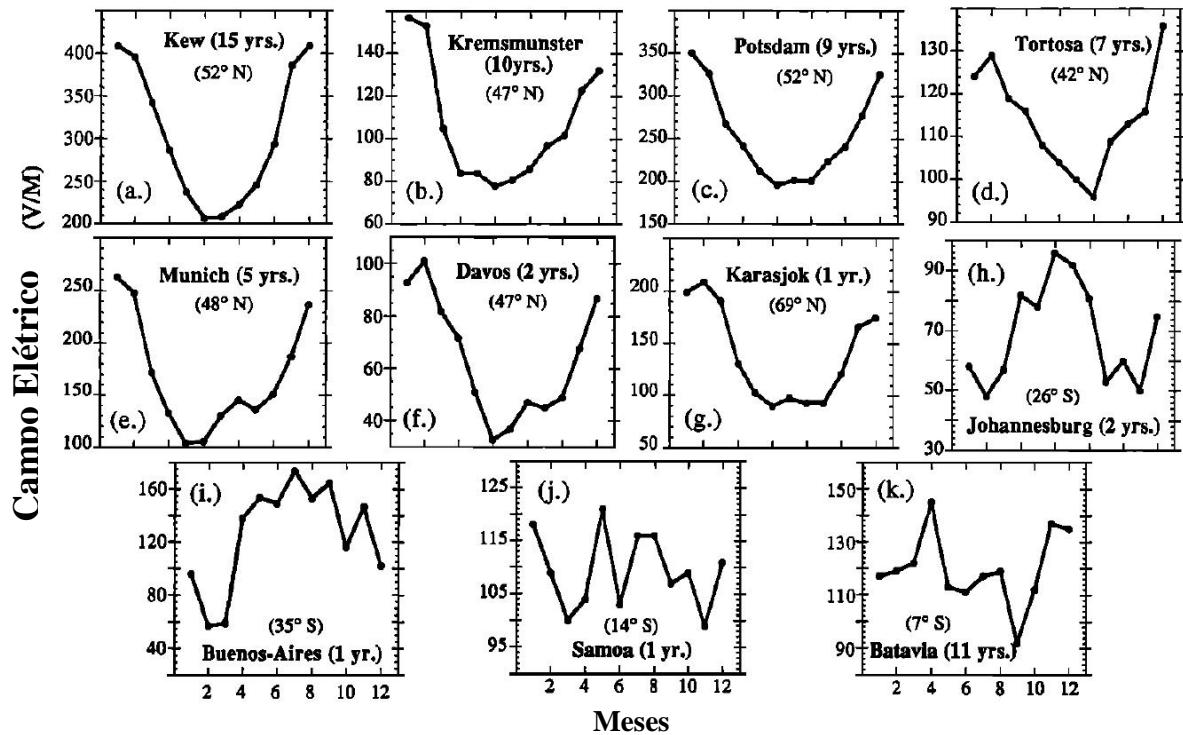


Figura 13: Variação mensal do campo elétrico atmosférico em estações no hemisfério norte (a - g), hemisfério sul (h - i) e nos trópicos (j - k). Nome da estação, latitude e período de medidas são indicados. (Fonte: Adaptado de Adlerman e Williams, 1996)

2.6 INFLUÊNCIA DE EFEITOS LOCAIS NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO (AERROSSÓIS)

Medições do campo elétrico atmosférico na superfície terrestre são influenciadas por diversos fenômenos naturais e antropogênicos, tais como (i) aerossóis, que mudam a condutividade elétrica, (ii) o efeito eletrodo em sítios com baixas fontes de ionização, o qual cria uma carga elétrica positiva concentrada nos primeiros metros da superfície terrestre, e que através da turbulência produz entre 10 a 50 % de variações na intensidade do CEA, (iii) cargas elétricas emitidas por motores, incêndios e indústria, (iv) mudanças no CEA devido à baixa condutividade elétrica de nuvens, (v) eletrificação de nuvens, (vi) modulação do campo elétrico por objetos altos nas proximidades do sensor, (vii) variações da condutividade elétrica causada por mudanças na mobilidade de íons afetada por variações na umidade relativa, entre outros (Markson, 2007). Esses efeitos locais geram desvios no CEA de tempo bom quando comparados com a curva de Carnegie, como mostrado na figura 3.

Para tentar diminuir os efeitos locais, medições do CEA são realizadas em sítios remotos, por exemplo na Antártida (figura 4), conseguindo obter uma boa representação global do CEA. Adicionalmente, medições são realizadas em lugares afastados de centros urbanos, por exemplo montanhas ou ilhas, para evitar efeitos de poluição local (Cobb, 1968; Reiter 1969, 1971; Tacza et al., 2014; Kamogawa et al., 2015; Lopes et al., 2017; Yaniv et al. 2017). Porém, as medições do CEA ainda podem ser afetadas por fontes de ionização na superfície terrestre produzidas por a emanação de gases radioativos⁶ e a radioatividade natural do solo⁷ (sendo a taxa de ionização dependente do tipo do solo). Essas mudanças na taxa de ionização produzem câmbios na condutividade elétrica na superfície terrestre e, portanto, câmbios no campo elétrico atmosférico. Em horas da noite, em condições de velocidade de vento baixas e pouca turbulência, pode haver acumulação de cargas elétricas nos primeiros metros da superfície terrestre devido ao efeito eletrodo. Nas primeiras horas do amanhecer, a superfície do solo começa a esquentar produzindo convecção e turbulência, o qual produz um aumento no CEA. Isso pode ser interpretado da seguinte forma: no começo do amanhecer com os primeiros raios do Sol a temperatura incrementa gerando convecção e turbulência na superfície terrestre, isso produz um incremento na concentração de aerossóis devido a dois processos: ligação entre as

⁶ O decaimento do radônio é considerado uma das principais fontes de ionização devido aos gases radiativos.

⁷ Principalmente a radiação gama.

partículas ultrafinas do aerossol crescendo em tamanho e/ou à ligação dos pequenos íons atmosféricos com as partículas de aerossol, diminuindo sua concentração (Yaniv et al., 2016; Yaniv et al., 2017). A diminuição na porcentagem de íons pode ser aproximadamente de 33 %, dependendo, principalmente do tipo de solo (Kamsali et al., 2011). A diminuição na concentração dos íons produz uma diminuição na condutividade elétrica e incrementa o campo elétrico atmosférico (pela condição da lei de Ohm, equação 4). Adicionalmente, pode haver um incremento nas cargas elétricas espaciais (em inglês ‘*space charge*’⁸) que vão se acumulando no topo da camada limite planetária (Nicoll et al., 2018). Os processos mencionados fazem com que se observe um incremento no campo elétrico atmosférico de aproximadamente 10-100 V/m (Anisimov et al., 2018).

A figura 14 mostra a curva média diária do CEA de tempo bom, em termos do percentual da média, para quatro localidades: Monte Hermon (Israel, horário local (LT): horário universal (UT) + 2), Aragats e Nor Amberd (Armênia, LT: UT+4) e Davos (Suíça, LT: UT+1), comparadas com a curva de Carnegie. Observa-se um incremento muito significativo e diferente nas medições do CEA, das quatro localidades realizadas na superfície terrestre entre as 3-15 UT, quando comparadas com as medições da curva de Carnegie realizadas nos oceanos. Nota-se que esse horário corresponde ao amanhecer para essas localidades e os autores concluíram que os desvios no CEA são devidos a efeitos de convecção e/ou turbulência devido aos processos descritos anteriormente. Esses efeitos também são encontrados nas curvas médias diárias do CEA quando separados pelas estações de verão e inverno, como é esperado (figura 15). Pode-se observar que durante o verão o incremento no CEA se produz horas antes do que o incremento no inverno, desde que o amanhecer se produz horas antes durante o verão. Por outro lado, da figura 14 se observa um aumento entre as 17-20 UT o qual foi associado ao sistema gerador das tempestades elétricas na América do Sul. Pode-se inferir que o campo elétrico atmosférico registrado em qualquer localidade apresenta as contribuições dos efeitos locais e globais, isso pode ser representado como $E_T = E_0 + E_A$, sendo E_T o campo elétrico atmosférico total, E_0 o campo elétrico atmosférico de tempo bom sem a presença de aerossóis e E_A o campo elétrico atmosférico gerado pelos aerossóis. A contribuição dos efeitos locais irá depender de vários fatores, sendo as principais as condições meteorológicas, a taxa de ionização produzida pela superfície terrestre, concentração de aerossóis e poluição local.

⁸ Space charge: A carga espacial é um conceito em que o excesso de carga elétrica é tratado como uma carga contínua distribuída por uma região do espaço (um volume ou uma área) em vez de cargas pontuais distintas. O sinal da carga espacial pode ser negativo ou positivo.

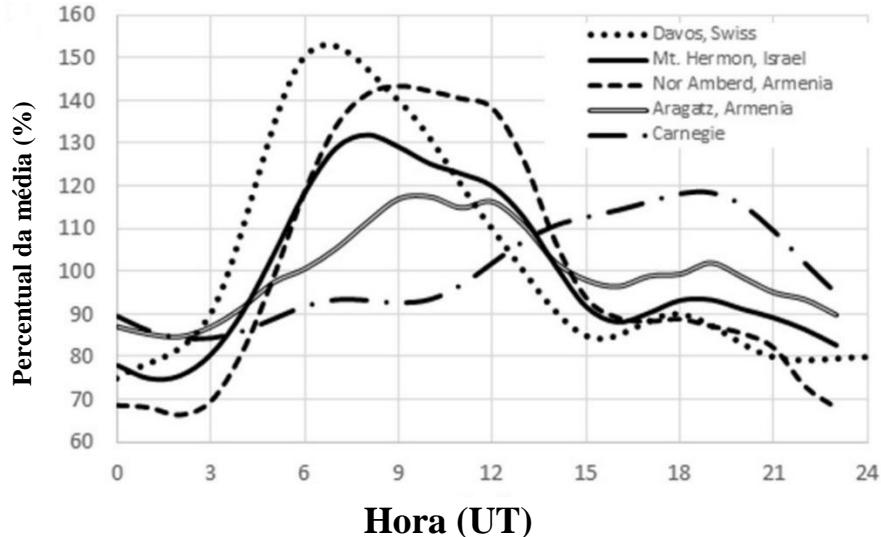


Figura 14: Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom, em termos do percentual da média, registrado em quatro diferentes localidades (Hermon-Israel, Aragats e Nor Amberd-Armênia e Davos-Suíça) comparadas com a curva de Carnegie. (Fonte: Adaptado de Yaniv et al., 2017)

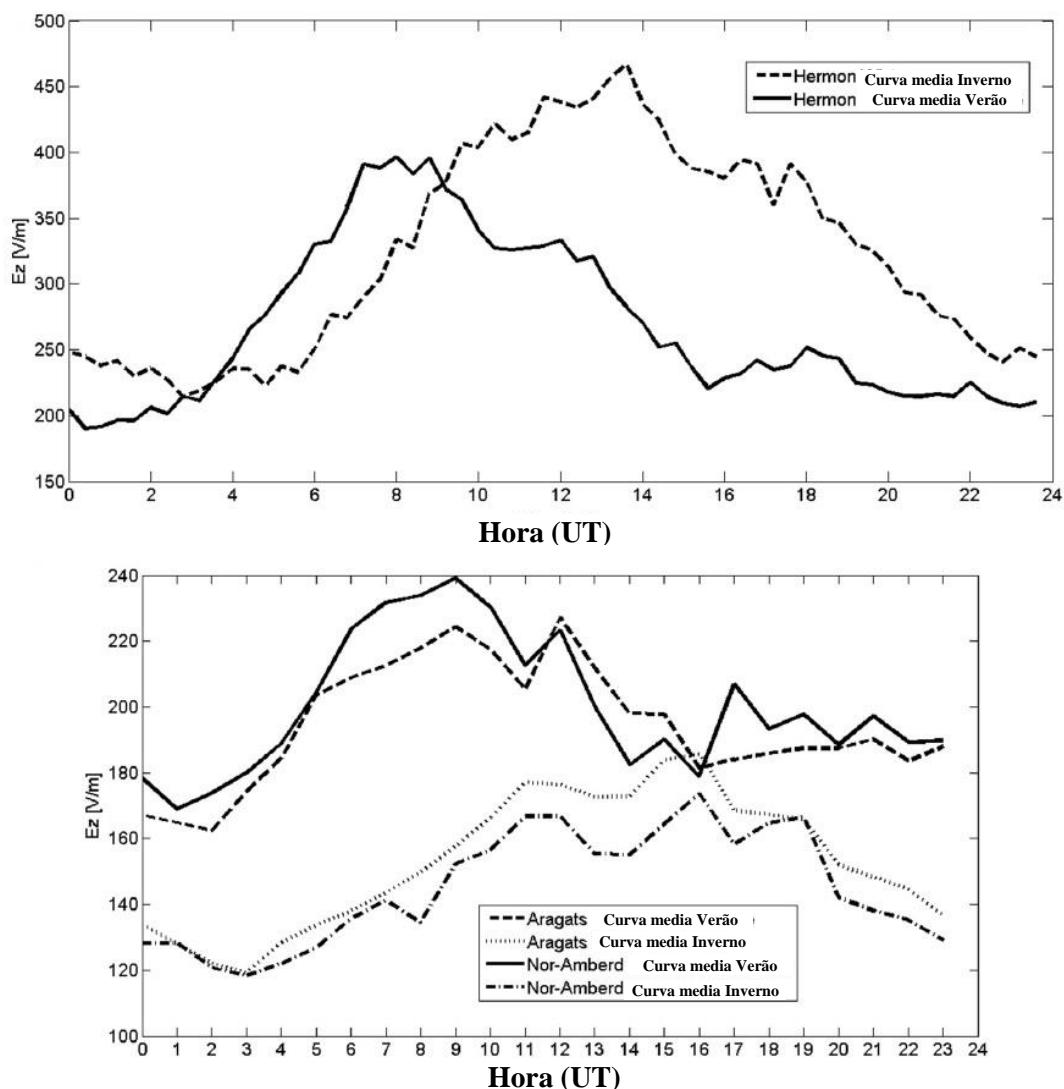


Figura 15: Variação média diária do campo elétrico atmosférico de tempo bom para as localidades de Hermon (Israel) e Aragats e Nor-Amberd (Armênia), separado para as estações de verão e inverno. (Fonte: Adaptado de Yaniv et al., 2017)

Com respeito à variação do campo elétrico atmosférico na presença de aerossóis, uma forma simples pode ser derivada da seguinte forma tendo em conta a equação de equilíbrio para os íons no estado estacionário:

$$q - \alpha n^2 - n\beta Z = 0 \quad (5)$$

onde: n é a concentração dos íons, q é a taxa de produção dos íons, α é a taxa de recombinação íon-íon, β é o coeficiente de ligação íon-aerossol e Z é o número de concentração do aerossol (Harrison e Aplin, 2002; Harrison, 2006; Silva et al., 2014). No caso de poluição pesada (alta), $n\beta Z \gg \alpha n^2$ (Harrison e Aplin, 2002), temos:

$$n = \frac{q}{\beta Z} \quad (6)$$

Por outro lado, da lei de Ohm: $J = \sigma E_z$, onde $\sigma = 2n\mu e$ (se as concentrações de íons bipolares, n_+ e n_- , são iguais), onde μ é a mobilidade dos íons e e é a carga do elétron. Substituindo na Lei de Ohm, temos:

$$E_z = \frac{\beta Z J}{2\mu e q} \quad (7)$$

Para um aerossol com concentração em massa M constituído por partículas de raio r com densidade ρ o equivalente número de concentração do aerossol é:

$$M = \frac{4}{3}\pi\rho r^3 Z \quad (8)$$

Das equações 7 e 8, uma relação linear é esperada entre E_z e M ,

$$E_A = \left[\frac{3}{8\pi\rho r^3} \frac{\beta}{\mu e} \left(\frac{J}{q} \right) \right] M \quad (9)$$

onde: E_A é a componente do campo elétrico atmosférico produzida pelos aerossóis.

É importante ter em conta que a taxa de produção dos íons (q) pode ser expressado como:

$$q = q_g + q_c + q_r + q_t \quad (10)$$

onde: q_g , q_c , q_r e q_t são as taxas de produção dos íons devido a radioatividade do solo, raios cósmicos, radônio (^{222}Rn) e tóron (^{220}Rn) (Anisimov et al., 2017).

2.7 INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE SOLAR NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO

Ao investigar se o clima espacial poderia influenciar significativamente as propriedades da baixa atmosfera, é preciso pesquisar uma complexa cadeia de interações físicas desde a propagação do vento solar até a precipitação de partículas carregadas de alta energia na magnetosfera, ionosfera, e baixa troposfera (Harrison et al., 2013). Embora a influência da variabilidade solar na baixa atmosfera é provavelmente fraca, a possibilidade de acoplamento do clima espacial com o clima troposférico tem sido reconhecida como sendo potencialmente importante para o ambiente humano (Dickinson, 1975). Este acoplamento poderia existir através do circuito elétrico atmosférico global, que inclui uma corrente de condução vertical fluindo para baixo entre a ionosfera e a superfície da Terra em regiões de tempo bom (Rycroft et al., 2000). Nesta subseção será discutido o Sol, e fenômenos solares que afetam a Terra, e seus possíveis efeitos no campo elétrico atmosférico de tempo bom de longo e curto prazo.

2.7.1 O SOL E OS FENÔMENOS SOLARES

O Sol é uma estrela localizada no centro do sistema solar e afastada aproximadamente $1,5 \times 10^{11} m$ da Terra. O Sol pode ser dividido em duas principais regiões: o interior (núcleo, camada radiativa e camada convectiva) e a atmosfera solar (OTOSFERA, CROMOSFERA e COROA SOLAR), e emite (i) radiação eletromagnética em uma ampla faixa espectral, (ii) fluxo contínuo de plasma e explosões de partículas energéticas (Hargreaves, 1992). A conexão e interação entre

o Sol e a Terra dirige as estações do ano, correntes oceânicas, tempo, clima, auroras, entre outros. A emissão solar muda em curtas e longas escalas temporais. Em longa escala, uma dessas variações apresenta um ciclo de aproximadamente 11 anos, chamado de ciclo solar, evidenciado na variação do número de manchas solares (figura 16), as quais são associadas com regiões de forte campo magnético.

Durante o ciclo solar a ocorrência de manchas solares e fenômenos energéticos transientes, tais como explosões solares e ejeções de massa coronal, são mais ocorrentes durante o máximo do ciclo solar. Uma explosão solar pode ser visualizada como um repentino abrillantamento localizado sobre uma região ativa, local onde há uma alta concentração do campo magnético, e se caracterizam pela liberação de grandes quantidades de energia que podem chegar até $10^{25} J$, com uma duração que varia entre alguns minutos até várias horas (figura 17a). Uma forma para classificar as explosões solares é baseada na energia liberada: A, B, C, M e X, sendo que uma explosão de classe X⁹ têm uma energia maior que $10^{-4} W/m^2$ (figura 17b). As explosões solares são importantes na relação Sol-Terra devido a que são as fontes de partículas solares energéticas esporádicas e emissões eletromagnéticas que afetam a atmosfera superior da Terra (Hargreaves, 1992).

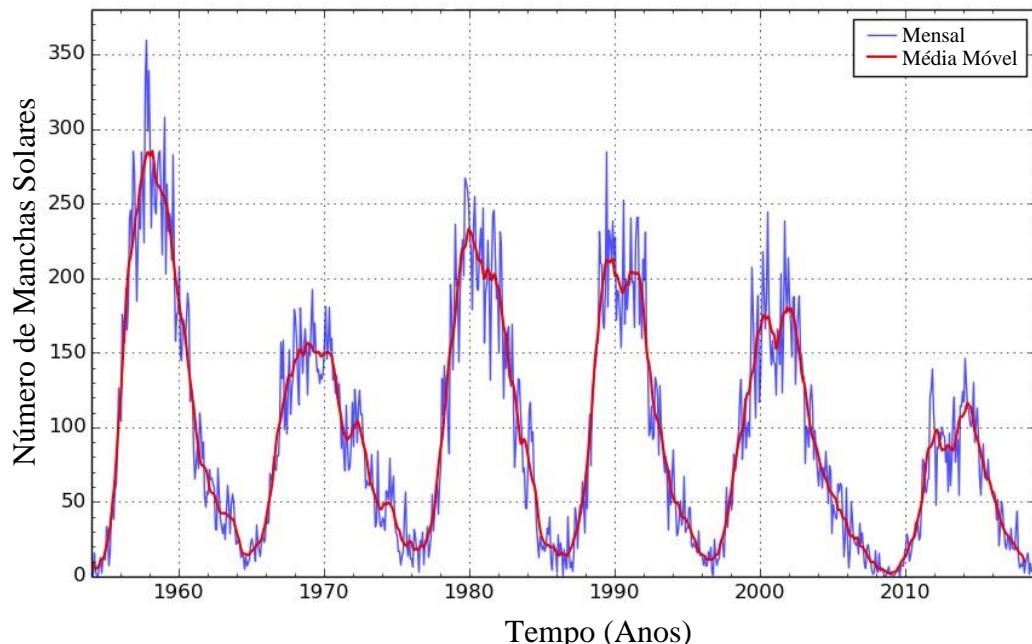


Figura 16: Variação mensal do número de manchas solares durante o ciclo de atividade solar. A linha vermelha representa uma média móvel a cada 13 pontos. (Fonte: Adaptado de <http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot>)

⁹ As explosões solares são monitoradas pelos sensores de raios X instalados nos satélites GOES (Geostationary Operational Environment Satellite), que orbitam a 35000 km de altitude. Os sensores de raios-X registram desde 1974 o fluxo emitido pelo disco solar completo em duas faixas de energia: 0,5-4 Å e 1-8 Å (Garcia, 1994).

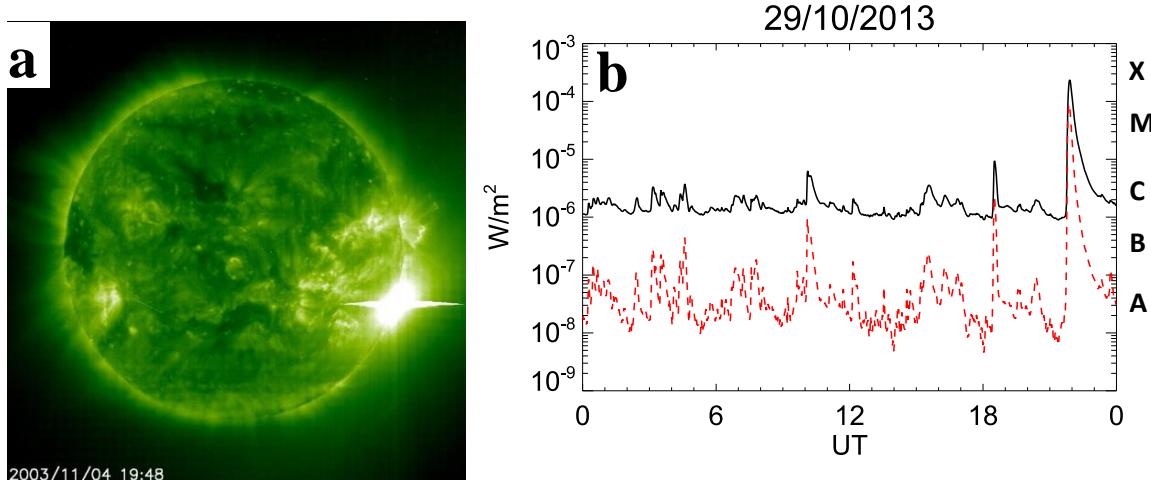


Figura 17: Imagem de uma explosão solar (margem direita do Sol) na faixa UV ocorrida em 4 de novembro de 2003 (a) (Fonte: NASA, http://www.nasa.gov/mission_pages/soho/soho_sunquake.html). Evolução temporal do fluxo de raios X do 29 de outubro de 2013 (b) (Fonte: Elaborado pelo autor).

As emissões de partículas energéticas solares podem ser observadas como um rápido aumento do fluxo de partículas carregadas no espaço próximo à Terra (figura 18a). Um evento pode durar de horas a dias, dependendo da energia da partícula e com um decaimento que normalmente é muito mais longo do que o seu crescimento. A maior parte das partículas energéticas solares são prótons, assim, às vezes são chamados de Eventos de Prótons Solares (EPS) (Bazilevskaya, 2005). Os prótons de alta energia que atingem a Terra perdem sua energia ao longo das interações com os núcleos de ar o qual produz partículas secundárias. Desta forma, eles iniciam cascatas nucleares e eletromagnéticas na atmosfera. Núcleos secundários, principalmente nêutrons, às vezes podem atingir o nível do solo e, portanto, ser observados por monitores de nêutrons (figura 18b). Tais eventos são chamados de Ground Level Enhancements (GLEs) (Bazilevskaya, 2005).

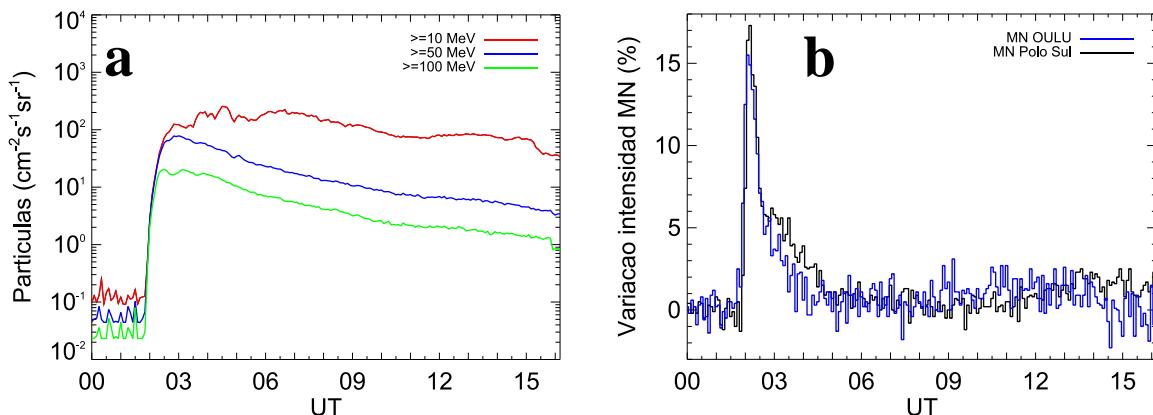


Figura 18: Fluxo de prótons energéticos em três canais de energia para o evento de 17 de maio de 2012 (a). Variação na taxa de contagem do monitor de nêutrons para duas estações durante o GLE em 17 de maio de 2012 (b) (Fonte: Elaborado pelo autor).

Outro fenômeno associado frequentemente às explosões solares, e que também têm maior ocorrência durante o máximo do ciclo solar, são as Ejeções de Massa Coronal (CME, pelas siglas em inglês de Coronal Mass Ejection). As CMEs consistem de nuvens de plasma, registradas pelo coronógrafo¹⁰, envoltos por um campo magnético emitidos pelo Sol e que podem ejetar entre 10^{12} e $10^{13} kg$ de plasma com uma velocidade de até 2500 km/s (figura 19). Elas são impulsionadas para fora por forças magnéticas associadas ao campo magnético coronal (Cargill e Harra, 2007). No meio interplanetário, elas podem ter uma estrutura magnética organizada e as CMEs rápidas são frequentemente acompanhadas por fortes ondas de choque. Quando a CME passa através da Terra ocorre uma interação entre seu campo magnético e o campo magnético terrestre, produzindo as vezes fortes perturbações na atmosfera superior da Terra, as quais são chamadas de tempestades geomagnéticas. A intensidade das tempestades geomagnéticas pode ser medida através dos índices Kp¹¹ e Dst¹² (Disturbance Storm Time). A figura 20 mostra as variações nesses índices durante uma intensa tempestade geomagnética ocorrida durante os dias 22-25 de junho de 2015.

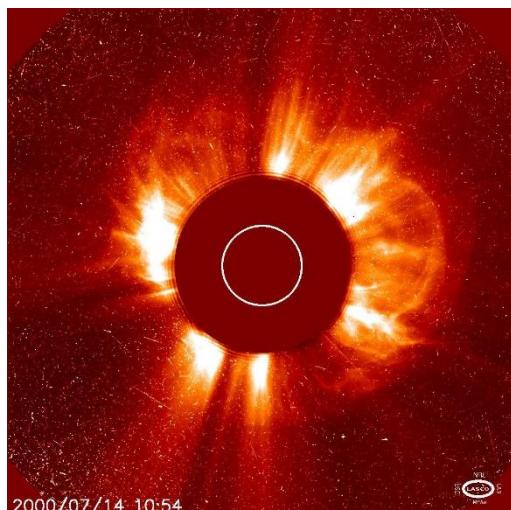


Figura 19: Ejeção de massa coronal tipo halo ocorrida em 14 de julho de 2000, registrada pelo coronógrafo LASCO/C2 da SOHO. Os eventos de halo são CMEs dirigidos para (ou longe) da Terra. À medida que se tornam maiores e maiores, eles parecem envolver o Sol, formando um halo ao redor dele.

(Fonte: https://soho.nascom.nasa.gov/hotshots/2000_07_14/)

Todos os fenômenos solares descritos (explosões solares, emissões de partículas energéticas solares, e CMEs) podem afetar diretamente o campo elétrico atmosférico de tempo bom ou de

¹⁰ Coronógrafo: Instrumento destinado para a observação da coroa solar.

¹¹ Índice Kp: é o índice de atividade geomagnética global baseado em medições de 3 horas de magnetômetros instalados no solo ao redor de todo o mundo.

¹² Índice Dst: é derivado de magnetogramas em baixas latitudes e expressa a redução da componente H no equador devido a corrente de anel.

forma indireta através do circuito elétrico atmosférico global. Na subseção 2.7.3 serão discutidos os processos envolvidos.

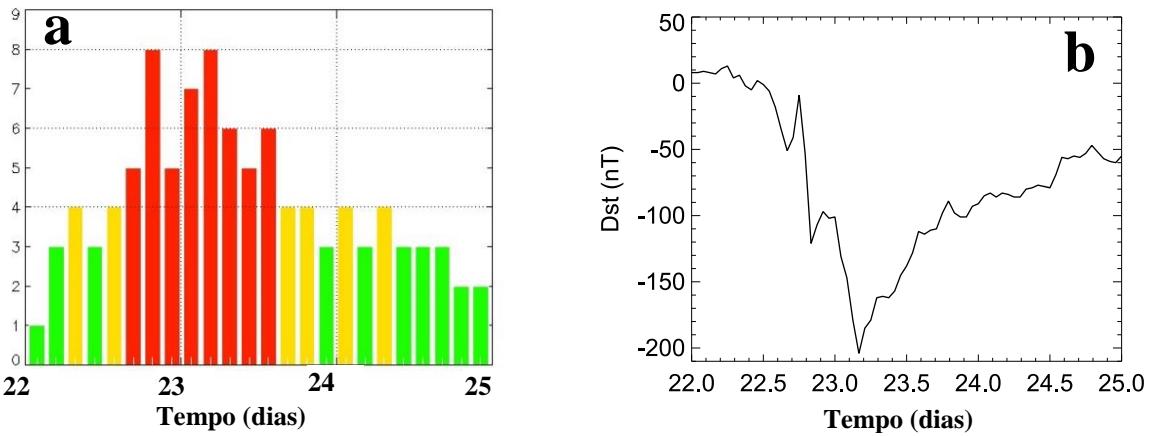


Figura 20: Variação do índice Kp (a) e índice Dst (b) durante uma intensa tempestade geomagnética ocorrida durante 22-24 de junho de 2015. (Fonte: Adaptado de NASA)

2.7.2 RAIOS CÓSMICOS

Os raios cósmicos (RC) são partículas carregadas, geralmente prótons ou partículas alfa, de altas energias (> 1 MeV) que atingem na Terra constantemente. Os RC podem ser classificados como RC primários e RC secundários (Dorman, 2004). Antes de interagir com a atmosfera terrestre, os RC são chamados de RC primários e podem ser separados em três tipos principais: RC Galácticos (provenientes de explosões ocorridas em supernovas¹³ ou em estrelas de nêutrons¹⁴), RC Solares (partículas muito energéticas provenientes do Sol) e RC Anômalos (formados através da interação entre o gás interestelar neutro, o vento solar e a onda de choque existente na região da heliopausa¹⁵). Quando os RC primários interagem com a atmosfera terrestre colidem com o núcleo de algum átomo gerando uma cadeia de processos, o qual recebe o nome de Chuveiro de Raios Cósmicos, gerando diversas partículas que são chamadas de RC secundários (Dorman, 2004).

¹³ Supernova: é um evento astronômico que ocorre durante os estágios finais da evolução de algumas estrelas, a qual é caracterizada por uma explosão muito brilhante.

¹⁴ Estrela de nêutrons: é um estágio na vida de estrelas muito grandes que, depois de consumir todo o hidrogênio em seu núcleo e explodir em uma supernova, pode virar um corpo celeste extremamente denso e compacto onde não há mais átomos, mas um aglomerado de nêutrons.

¹⁵ Heliopausa é uma região localizada ao redor do Sistema Solar onde o vento solar é parado pelo meio interestelar pois a pressão exercida pelo vento solar não é mais intensa o suficiente para repelir o vento interestelar. É geralmente considerada a fronteira mais externa do sistema solar.

A variação temporal do fluxo dos raios cósmicos é oposta à atividade solar. Isso devido a que durante o período de máxima atividade solar, o campo magnético solar e interplanetário são mais complexos dificultando o ingresso de raios cósmicos galácticos na heliosfera, o qual resulta em uma diminuição na intensidade total de partículas carregadas na Terra. No mínimo de atividade solar pelo contrário há uma maior entrada de raios cósmicos galácticos. A figura 21 mostra a anticorrelação entre o fluxo de raios cósmicos (registrado em dois monitores de nêutrons e um detector de fluxo de raios cósmicos) e a atividade solar (representado pelo número de manchas solares).

A principal variação da intensidade de raios cósmicos relacionada a tempestades geomagnéticas causadas por fenômenos solares transientes é chamada Decréscimo Forbush (DF). Os DF são eventos que apresentam uma queda rápida do fluxo de RC, de horas a dias, seguido por uma fase de recuperação mais longa (Cane, 2000). A figura 22 mostra a queda rápida na intensidade de três monitores de nêutrons durante um intenso DF ocorrido em julho de 1982. Um DF pode ser acompanhado de uma tempestade geomagnética causada pela passagem de uma CME sobre a Terra, o qual reduz a incidência dos RC primários na atmosfera terrestre.

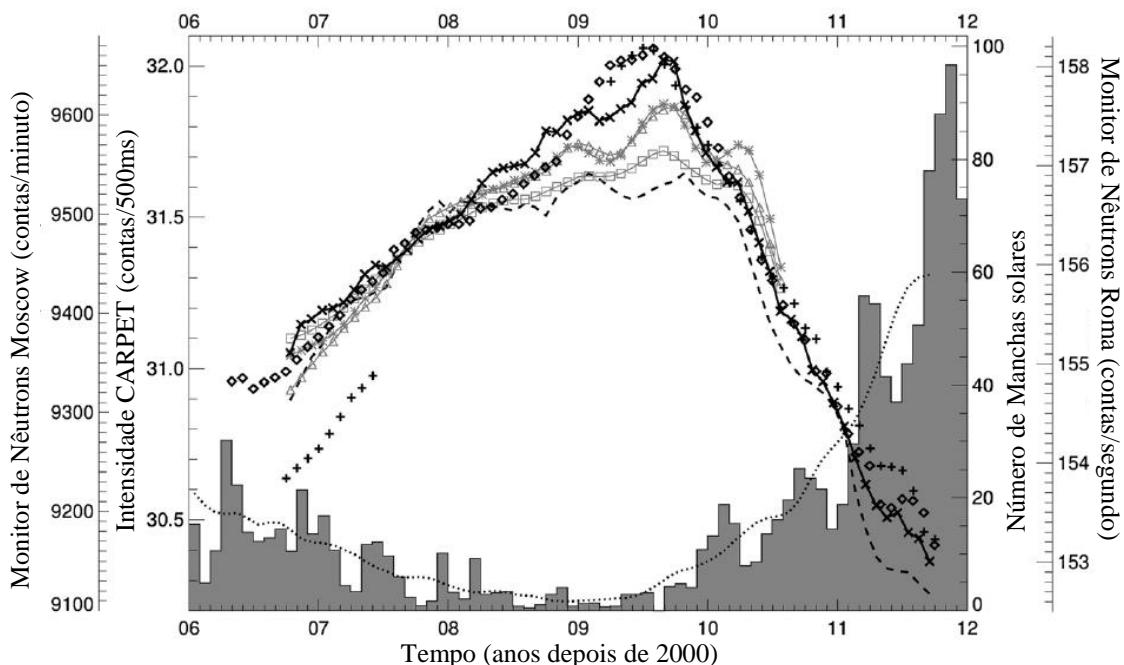


Figura 21: Variação na intensidade dos monitores de nêutrons para as estações de Roma (diamante) e Moscow (+). Variação do fluxo de raios cósmicos detectado pelo CARPET¹⁶ para dados não corregidos pela temperatura (curva preta tracejada) e para dados corregidos pela temperatura utilizando quatro métodos (curva cinza com quadrados, curva cinza com triângulos, curva cinza com asteriscos e curva preta com cruzes) entre 2006 e 2010. Os histogramas e a curva pontilhada mostram a variação média mensal e a média móvel de 13 meses do número de manchas solares, respectivamente (Fonte: Adaptado de De Mendonça, 2013).

¹⁶ CARPET: Detector de raios cósmicos instalado no CASLEO (Argentina).

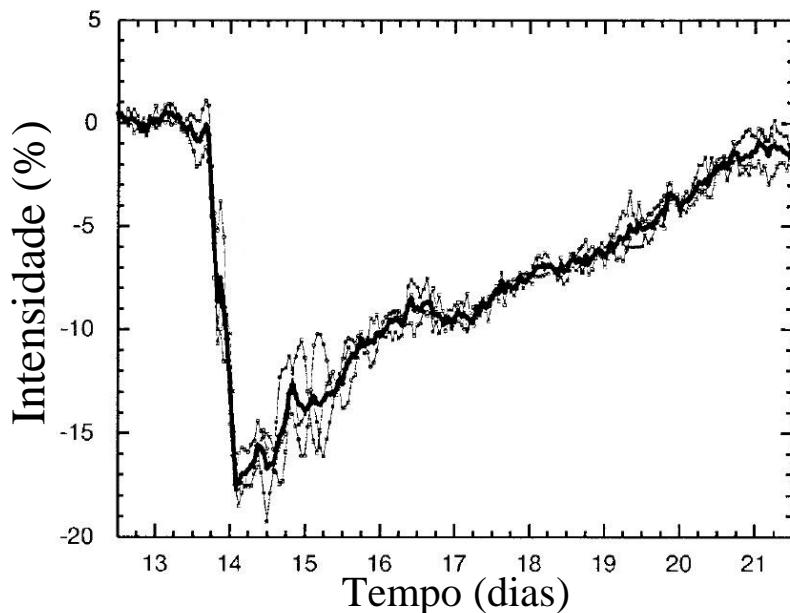


Figura 22: Decréscimo Forbush ocorrido em julho de 1982 registrado em três estações de monitores de nêutrons: Deep river, Mt. Wellington e Kerguelen (Fonte: Adaptado de Cane, 2000)

2.7.3 EFEITOS DOS EVENTOS SOLARES NO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO DE TEMPO BOM

O campo elétrico atmosférico de tempo bom pode ser afetado a longo prazo pelo ciclo de atividade solar e a curto prazo por diversos fenômenos solares transientes, tais como explosões solares, eventos de prótons solares e ejeções de massa coronal. Os efeitos podem ser diretos através de mudanças na ionização local ou indiretos através do circuito elétrico atmosférico global.

2.7.3.1 EFEITOS DE LONGO PRAZO

A atividade solar varia de forma cíclica com um período de aproximadamente 11 anos. O campo magnético solar e sua extensão no meio interplanetário até a órbita da Terra e além, é muito mais variável durante o máximo de atividade solar do que durante o mínimo. O fluxo de raios cósmicos galácticos e fluxo de partículas energéticas carregadas do Sol também estão sujeitos a variação da atividade solar. Estas partículas, assim como aquelas precipitando dos cinturões

de radiação da magnetosfera durante perturbações geomagnéticas interagem com a baixa e meia atmosfera da Terra, modificando a condutividade elétrica atmosférica total. O fluxo dessas partículas pode também modificar a química da atmosfera ou afetar a nucleação de gotas de água para formar nuvens (Rycroft et al., 2000). Essas modificações redistribuem o fluxo de corrente no circuito elétrico global, incluindo a densidade de corrente vertical e o campo elétrico atmosférico de tempo bom. Harrison e Usoskin (2010) mostraram que medições do CEA e densidade de corrente ar-Terra, no solo, em condições de tempo bom aumentaram significativamente durante o máximo de raios cósmicos (ou seja, durante o mínimo de atividade solar). A tabela 1 mostra os valores que os autores encontraram.

Adicionalmente, Harrison et al. (2013), observou em medições do CEA realizadas em Reading (UK) uma notável oscilação de 27 dias durante um período de perturbações solares associadas a uma região de Interação Co – rotativa solar¹⁷ (CIR - do inglês, *Co-rotating Interation Region*) de longa vida. Esta mesma característica foi observada em dados de monitores de nêutrons, o que pode implicar que as medidas do CEA são melhor associadas com a modulação das partículas carregadas, que com as variações da radiação solar.

Tabela 1 - Variação de parâmetros elétricos em tempo bom realizadas em Lerwick (1978-1985) entre o máximo e mínimo de raios cósmicos (RC).

| Est. | Quantidade | Mediana | Mediana (RCmin) | Mediana (RCmax) | % entre RCmin e RCmax |
|---------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Climax | Taxa de contagem de nêutrons | $3801 \times 10^2 \text{ hr}^{-1}$ | $3629 \times 10^2 \text{ hr}^{-1}$ | $3932 \times 10^2 \text{ hr}^{-1}$ | 8,4 % |
| Lerwick | CEA | 160,5 V/m | 151,7 V/m | 170 V/m | 12 % |
| | Densidade de Corrente | $2,76 \text{ pAm}^{-2}$ | $2,51 \text{ pAm}^{-2}$ | $2,93 \text{ pAm}^{-2}$ | 16,5 % |

Fonte: Harrison e Usoskin, 2010 (adaptado).

¹⁷ Região de Interação Co-rotativa solar: é uma consequência da variabilidade espacial na expansão coronal e rotação solar, o que causa fluxos de vento solar de velocidades diferentes para tornar-se radialmente alinhados (Gosling e Pizzo, 1999).

2.7.3.2 EFEITOS DE CURTO PRAZO

Além das mudanças de longo prazo, o CEAG também é afetado por variações solares de curto prazo, entre elas as explosões solares, eventos de prótons solares e decréscimo Forbush (Märcz, 1997; Rycroft et al., 2000; Rycroft et al., 2012). A ionização por eventos de prótons solares (EPS) pode resultar em mudanças no perfil de altura da condutividade elétrica na baixa atmosfera (Kokorowski et al., 2012; Velinov et al., 2013; Mironova et al., 2015). Dados obtidos por sensores instalados em balões a ~ 30 km revelaram um aumento da condutividade elétrica e uma diminuição do campo elétrico atmosférico em regiões de bom tempo após EPS (Holzworth e Mozer, 1979; Reagan et al., 1983; Holzworth et al., 1987; Kokorowski et al., 2006). Isso é devido ao assumir que a densidade da corrente ar-terra é constante com a altitude em regiões de tempo bom. Em outras palavras, o produto da condutividade (σ) e campo elétrico (E) deve ser constante com a altitude, a fim de cumprir a lei de Ohm (Haldoupis et al., 2017). Além disso, mudanças no CEA e na corrente elétrica atmosférica foram detectadas após EPS no nível do solo (Nicoll e Harrison, 2014; Elhalel et al., 2014). Vários autores desenvolveram modelos para explicar como os eventos de prótons solares podem modular o circuito elétrico atmosférico global (Markson, 1978; Willett, 1979; Farrell e Desch, 2002). Esses modelos propuseram que os EPS podem aumentar a taxa de ionização acima das tempestades elétricas produzindo um aumento da condutividade elétrica. Isso causa uma diminuição na resistência entre o topo da tempestade e a ionosfera, permitindo que mais corrente flua para cima e, portanto, através do circuito elétrico global. Consequentemente, temos um aumento do acúmulo de carga elétrica no limite superior do circuito elétrico global, gerando um aumento do potencial elétrico em regiões de tempo bom e, assim, aumentando o campo elétrico atmosférico. Isto foi evidenciado em alguns trabalhos onde o aumento do CEA durou até 3-4 dias após o início das explosões solares (Cobb, 1967; Reiter, 1969; Reiter, 1971; Sartor, 1980; Sheftel et al., 1994). Por exemplo, Reiter (1969) analisou medições de duas estações localizadas em 2964 e 1780 metros acima do nível do mar (latitude de 48°). O autor observou um aumento significativo do CEA (figura 23) e da corrente ar-terra no dia da explosão com uma duração de até quatro dias após o evento solar. Os aumentos foram de 50-60% para a estação de maior altitude e de 25 % para a estação de menor altitude.

No entanto, nestes trabalhos, o período de tempo analisado incluiu muitos fenômenos solares, interplanetários e geomagnéticos, como explosões solares, eventos de prótons solares, Ejeções

de Massa Coronal, Decréscimo Forbush e intensas tempestades geomagnéticas. Portanto, para entender melhor o papel desses fenômenos no circuito elétrico global, é necessário isolar e estudar separadamente cada um deles.

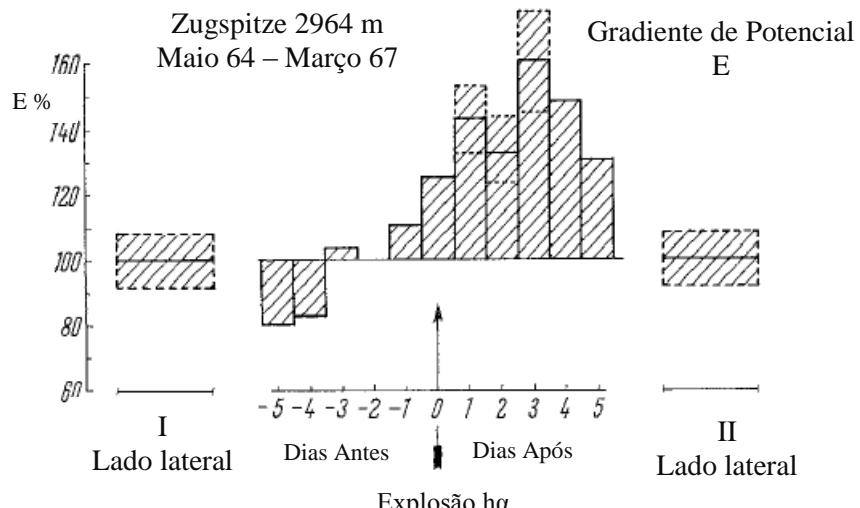


Figura 23: Agrupamento de médias horárias de E (em %) em torno de dias de explosão solar durante três anos de baixa atividade solar (1964-1967), medido na estação Zugspitze. (Fonte: Adaptado de Reiter, 1969)

Por outro lado, os fluxos de raios cósmicos galáticos e solares que entram na atmosfera da Terra são essenciais para o circuito elétrico atmosférico global, uma vez que essas partículas carregadas são a principal fonte de ionização atmosférica em cerca de 15 a 20 km de altitude e acima (Rycroft et al., 2012). A propagação através da atmosfera de raios cósmicos secundários pode, em princípio, ser afetada pela presença de campos elétricos (Muraki et al., 2004; De Mendonça et al. 2009; De Mendonça et al., 2013). Markson (1981) encontrou correlações positivas entre as variações de medições do fluxo de raios cósmicos, no solo, com mudanças do potencial ionosférico derivadas de medições de aeronaves e balões. Adicionalmente, medidas na superfície mostraram excessos de fluxo de raios cósmicos secundários na presença de campos elétricos associados a nuvens de trovão, por exemplo ver figura 24 (Muraki et al., 2004; De Mendonça, et al., 2009; Raulin et al., 2014). Estes resultados indicam que o fluxo de raios cósmicos secundários na atmosfera pode desempenhar um papel importante nos processos físicos responsáveis pela formação de nuvens e descargas de raios.

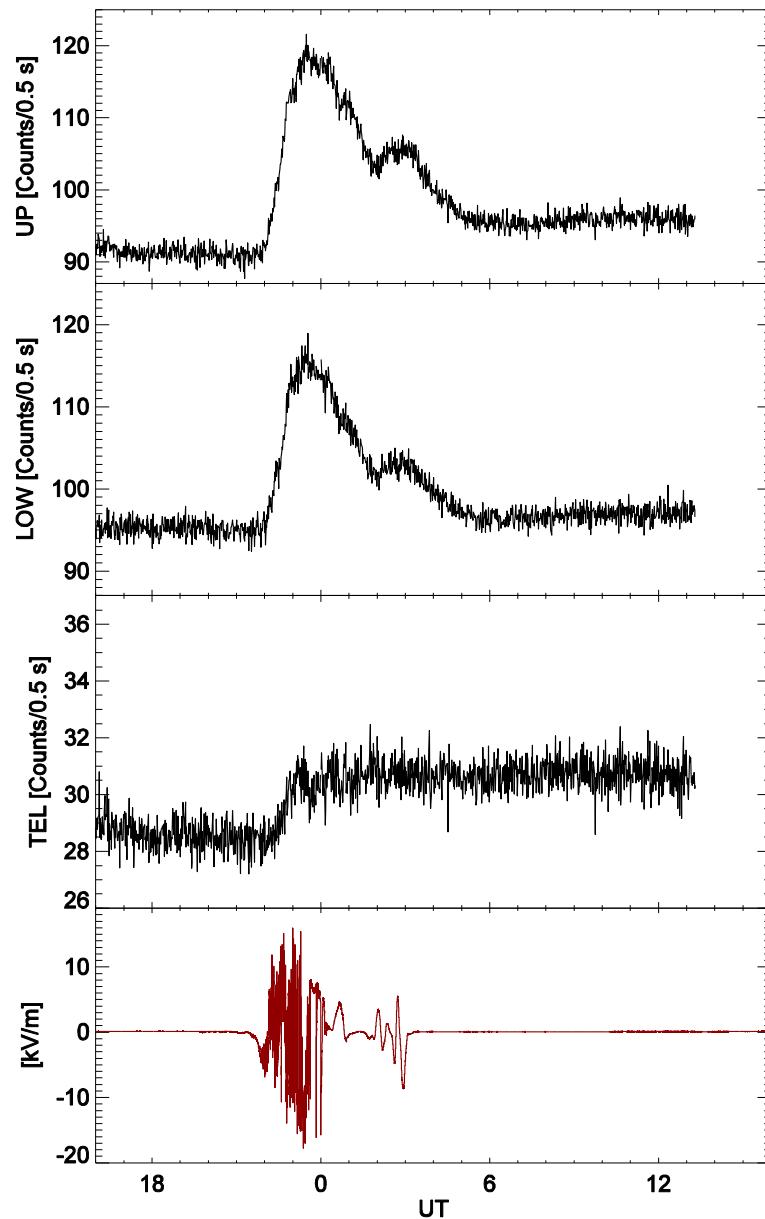


Figura 24: Variações transitórias do CEA (Parte inferior) associadas ao aumento de fluxo de raios cósmicos secundários em todos os canais do sensor CARPET (Parte superior). Observa-se entre 22:00 e 23:30 UT variações do CEA mais rápidas devido à presença de raios. (Fonte: Adaptado de Raulin et al., 2014)

3 INSTRUMENTAÇÃO

Os dados utilizados no presente trabalho pertencem a uma rede de sensores de moinho do campo elétrico (EFM - do inglês, *Electric Field Mill*, doravante só chamado EFM), os quais estão instalados em diferentes locais na América do Sul. Para comparação do CEA com outras variáveis, tais como concentração de aerossóis e número de ocorrências de raios, foram utilizados dados de os instrumentos das redes AERONET e STARNET. Neste capítulo apresenta-se a rede de monitoramento do CEA e uma descrição dos sensores. Além disso, é dada uma breve descrição dos outros instrumentos e da base de dados de eventos solares.

3.1 A REDE AFINSA

Medições contínuas do campo elétrico atmosférico estão sendo registradas por vários sensores instalados em diferentes localidades na América do Sul. A rede de sensores é chamada AFINSA (Atmospheric electric FIEld Network in South America). O principal objetivo da rede é obter curvas do CEA em condições de tempo bom para analisar diferentes fenômenos geofísicos e solares. A rede AFINSA forma parte de uma rede global de monitoramento do CEA chamada GLOCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) (Nicoll et al., 2019). A continuação é dada uma breve explicação dos sensores do CEA e a localização dos sensores da rede AFINSA.

3.1.1 SENSORES EFM

O EFM é um monitor do campo elétrico (figura 25a,) que foi elaborado pela empresa Boltek. O sensor é capaz de coletar os dados de maneira contínua em períodos de tempo bom e perturbado, com uma resolução temporal de 0,5 s. O princípio básico da operação do EFM pode ser explicado da seguinte forma: Quando uma placa condutora é exposta a um campo elétrico, uma carga é induzida proporcional ao campo elétrico e à área da placa. A figura 25a mostra a parte superior do EFM. Observa-se uma placa rotativa (o rotor) e um conjunto fixo de placas

condutoras (os eletrodos). O motor e a eletrônica do EFM estão alojados no estojo abaixo. Quando o rotor gira, os eletrodos estão alternadamente sob influência e protegidos do campo elétrico induzindo cargas nas placas do eletrodo. A carga é medida quando a exposição for máxima, dando uma série de amostras cuja magnitude é proporcional à intensidade do campo elétrico. Assim, quando o eletrodo de detecção é exposto ao campo elétrico atmosférico uma corrente flui do solo através do resistor de $100\text{ k}\Omega$ (figura 25b). Quando o eletrodo de detecção não está sob a influência do campo elétrico, a corrente flui para a Terra através do mesmo resistor. A queda de potencial elétrico através da resistência é proporcional à intensidade do CEA. Uma segunda resistência em paralelo permite mudar a sensibilidade da medida para evitar a saturação devido à alta intensidade do campo elétrico, tipicamente $> 20\text{ kV/m}$, durante períodos de tempestades elétricas.

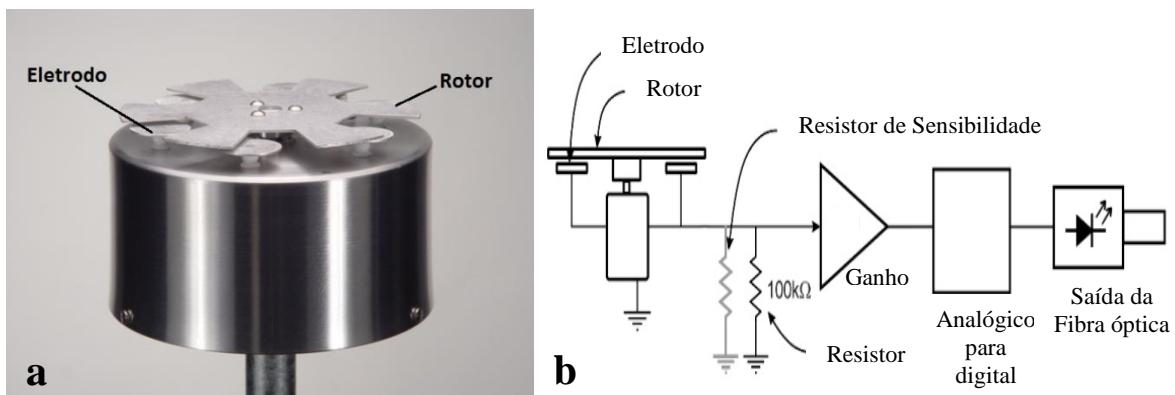


Figura 25: Sensor EFM (a) e seu diagrama de blocos (b) (Fonte: Adaptado de Boltek Corporação EFM100-1000120-050205).

Os valores do campo elétrico registrados pelo sensor EFM são salvos diariamente através de um software desenvolvido pelo fabricante do instrumento. Depois de salvos, para a presente tese, eles foram processados através de rotinas feitas na linguagem de programação IDL (Interactive Data Language).

3.1.2 A REDE DE SENSORES

A rede AFINSA têm sensores do CEA instalados em diferentes lugares na América do Sul. O primeiro sensor foi instalado no ano 2008 na Argentina (CAS1). No fim do ano 2014, a rede conta com 5 sensores: CAS1 e CAS2 (El Leoncito, San Juan, Argentina, ambos os sensores

espaçados de 400 metros um do outro), ICA (Ica, Perú), PLO (Lima, Perú) e ROR (Boa Vista, Brasil). Durante o decorrer desta tese (2015-2018) foram instalados 4 novos sensores: HYO (Huancayo, Perú), CGR1 (Paraíba, Brasil), CGR2 (Paraíba, Brasil) e SPA (São Paulo, Brasil). No Quadro 1 são indicadas as coordenadas geográficas, altitude e uma breve descrição das estações. Além disso, a figura 26 mostra as estações já instaladas (triângulos) e as novas estações a serem instalados em 2019 (estrelas).

| Estação | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) | Descrição |
|---------------|-----------------|------------------|-----------------|---|
| CAS1 | -31,799 | -69,297 | 2480 | Instalado em 01/2008. O sensor está localizado longe das habitações, mato e arbustos, em uma região montanhosa e longe de áreas industriais. |
| CAS2 | -31,800 | -69,293 | 2480 | Instalado em 01/2010. Características semelhantes ao CAS1. Afastado 400 metros de CAS1. |
| ICA | -14,089 | -75,736 | 402 | Instalado em 12/2011. O sensor está localizado no centro da cidade de Ica afastado das habitações. Algumas árvores a uma distância de 20 metros. |
| PLO | -12,504 | -76,798 | 85 | Instalado em 11/2011. O sensor está posicionado sobre o teto de uma casa, a 220 metros de distância do mar e 1,7 km da cidade mais próxima. Sem presença de vegetação nas proximidades. |
| ROR | 2,87 | -60,71 | 78 | Instalado em 04/2014. O sensor está posicionado a uma altitude de 1,6 metros. Árvores a 40 metros de distância. |
| HYO | -12,04 | -75,32 | 3350 | Instalado em 06/2016. O sensor está posicionado a 50 cm do solo, afastado 15 m de uma casa. A cidade mais perto está a 3,5 km. |
| CGR1 | -7,21 | -35,91 | 550 | Instalado em 11/2016. O sensor está instalado no teto de um prédio na Universidade Estadual de Paraíba, localizado no centro da cidade. |
| CGR2 (LSA) | -7,16 | -35,87 | 630 | Instalado em 05/2017. O sensor está instalado no teto de uma casa. A cidade mais perto está a 7,5 km. |
| SPA | -23,55 | -46,65 | 810 | Instalado em 04/2017. O sensor está instalado no teto de um prédio na Universidade Presbiteriana Mackenzie. |

Quadro 1: Descrição das estações de sensores EFM da rede AFINSA.

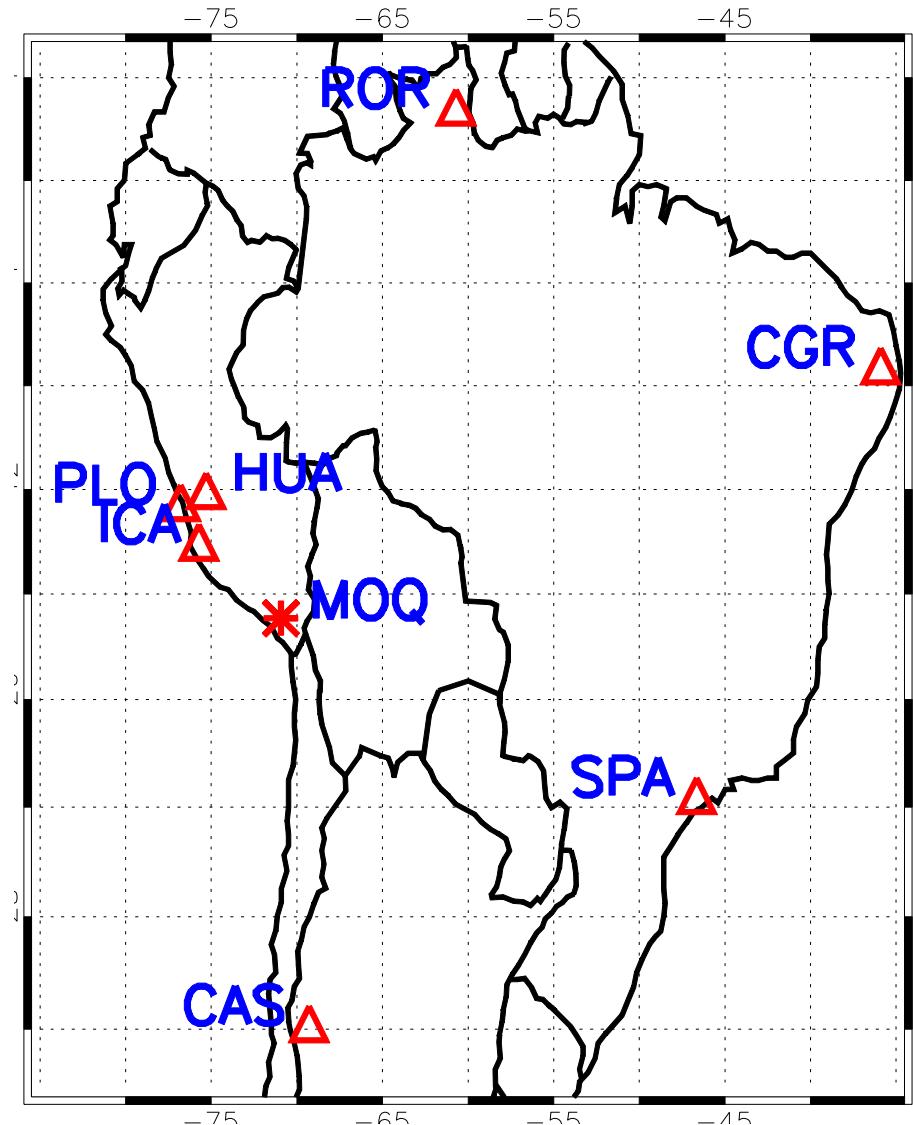


Figura 26: Localização dos sensores EFM já instalados (triângulos), e a serem instalados (estrelas).

3.2 OUTROS INSTRUMENTOS

As variações do CEA foram comparadas com outras variáveis geofísicas e/ou atmosféricas, tais como a concentração de aerossóis e o número de ocorrências de raios. Para isso, foram utilizados dados das redes AERONET e STARNET. Adicionalmente, foram utilizados dados de parâmetros solares (explosões solares, eventos de prótons, decréscimos Forbush, etc.) com a finalidade de estudar seus possíveis efeitos no CEA de tempo bom.

3.2.1 A REDE STARNET

A rede STARNET (pelas siglas em inglês de Sferics Timing and Ranging Network), detecta raios utilizando receptores de muito baixa frequência (VLF – do inglês, Very Low Frequency). A rede utiliza receptores de rádio no espectro de VLF entre 5 e 15 kHz (centralizados em 9,8 kHz). Cada receptor mede o campo elétrico vertical e inclui uma “etiqueta” da hora sincronizado com um relógio GPS (com precisão de 1 microsegundo). Essas séries temporais de campo elétrico representam formas de onda, chamadas ‘*sferics*’, de uma fonte de raio que se propaga através da guia de onda ionosfera-terra. A correlação de tempo entre quaisquer formas de onda de duas estações define uma diferença de tempo de chegada (ATD – do inglês Arrival Time Difference), que representa locais com a mesma diferença de tempo entre as duas estações. Esses locais definem hipérboles sobre a superfície da Terra. A interseção de vários ATDs (hipérboles) de um candidato ‘*sferics*’ define o local de um ‘raio corregido’, identificado numericamente minimizando uma função quadrática de ATDs modelados e medidos (Morales, 2003). A variação mensal do número de ocorrências de raios será comparada com a variabilidade do campo elétrico atmosférico de tempo bom.

3.2.2 A REDE AERONET

O programa AERONET (pelas siglas em inglês de AERosol RObotic NETwork) é uma rede de fotômetros de sensoriamento remoto, instalados no solo, estabelecidos pela NASA e LOA-PHOTONS (CNRS). O programa fornece um banco de dados contínuo, de longo prazo e de fácil acesso para medidas de aerossol óptico, propriedades radiativas e microfísicas para pesquisa de aerossóis entre outras aplicações. A rede impõe normalização de instrumentos, calibração, processamento e distribuição.

A rede AERONET utiliza os fotômetros do Sol multibanda CIMEL (CE-318), a qual realiza medidas do sol direto em oito canais espectrais: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 e 1020 nanômetros (Holben et al., 1998). A rede fornece observações distribuídas globalmente da Espessura Óptica de Aerossóis (EOA), produtos de inversão e vapor de água precipitável. A EOA é calculada de acordo com a lei de Beer-Lambert-Bouguer:

$$I_\lambda(0) = I_\lambda(\infty)e^{-\tau_\lambda m} \quad (10)$$

onde: $I_\lambda(0)$ é a intensidade da radiação eletromagnética na superfície terrestre, $I_\lambda(\infty)$ é a intensidade da radiação eletromagnética no topo da atmosfera (sem atenuação), τ_λ é a espessura óptica total da atmosfera, λ é o comprimento de onda, e m é a massa de aire óptico ($\sim 1/cos\theta$, θ é o ângulo zenital solar, ângulo formado entre a vertical e o Sol). A espessura óptica total da atmosfera é:

$$\tau_\lambda = \tau_\lambda(A) + \tau_\lambda(R) + \tau_\lambda(G) \quad (11)$$

onde: $\tau_\lambda(A)$ é a espessura óptica dos aerossóis, $\tau_\lambda(R)$ é a espessura óptica de Rayleigh e $\tau_\lambda(G)$ é a espessura óptica devida a outros gases. Da equação 11 é calculada a espessura óptica dos aerossóis.

A rede AERONET proporciona os dados em três níveis de qualidade de dados: nível 1 (que representa as medições brutas), nível 1.5 (que representa as medições processadas, onde são eliminadas as contaminações por nuvens) e nível 2 (que representa as medições processadas e garantidas pela rede). Neste trabalho foram utilizados os dados da EOA para o nível 2, onde as medições da EOA foram utilizadas como uma medida indireta da concentração em massa de aerossóis.

Na presente tese foram analisadas a variação temporal da EOA para uma estação da rede AERONET situada no San Juan, Argentina (CASLEO - Complejo Astronómico El Leoncito). Os dados da EOA foram comparados com a variação temporal do campo elétrico atmosférico para a estação CAS1.

3.2.3 DADOS DE EVENTOS SOLARES

Para comparar as variações do campo elétrico atmosférico durante a ocorrência dos fenômenos solares foi realizado um banco de dados de eventos solares (explosões solares e partículas

energéticas solares) e decréscimos Forbush. Os dados dos eventos solares foram obtidos do satélite GOES (Geostationary Operational Environment Satellite) (GOES I-M Databook, 1996). Os dados de tempestades geomagnéticas, tomando em conta o índice Dst, foram descarregados da base de dados OMNIWeb (King e Papitashvili, 2005). A lista dos decréscimos Forbush foram utilizados do catálogo registrado pelo centro de dados de IZMIRAN (Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radioactive Propagation) (Lingri et al., 2016).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia aplicada na seguinte tese: correção dos valores de amplitude do campo elétrico atmosférico, escolha de dias de tempo bom e obtenção das curvas médias mensais/sazonais/anuais (curvas padrão) e a análise de épocas superpostas na procura de efeitos solares no CEA.

4.1 CORREÇÃO DOS VALORES DE AMPLITUDE DO CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO

Para registrar valores corretos de amplitude do campo elétrico atmosférico, o EFM precisa ser posicionado no nível do solo. No entanto, isso é impraticável por diversos fatores e o sensor é colocado a uma determinada altura acima da superfície. Isso provoca um aumento nas medidas do CEA por causa do efeito ponta. Para corrigir esse efeito, observações simultâneas são realizadas utilizando-se dois sensores EFM, um deles localizado no nível do solo (referência) e o outro na posição final¹⁸ (permanente). Uma regressão linear é realizada entre ambas as medidas e, depois, os valores do CEA da posição permanente são corrigidos. Esse tratamento foi realizado para as estações: CAS1, CAS2, ICA, PLO e HYO. Para as estações ROR, CGR1, CGR2 e SPA não foi possível realizar as medidas simultâneas e, portanto, os valores de amplitude não foram corrigidos. No entanto, isso não impede a análise dessas estações neste trabalho.

4.2 OBTENÇÃO DE DIAS DE TEMPO BOM E CURVAS PADRÃO

Depois de corrigir os dados, a primeira parte do estudo consiste em escolher dias em que a

¹⁸ A posição final do sensor EFM permanente foi elegido de acordo com as facilidades técnicas e administrativas em cada estação. Por exemplo, nas estações CAS1 e CAS2 os sensores estão à 1 metro do solo e na estação SPA o sensor está instalado no topo de um prédio de 7 andares. Para futuros lugares de instalação se recomenda ter um padrão na altura do sensor EFM acima do nível do solo.

variação diária do CEA é registrada em condições de tempo bom (o qual foi chamado como dias de tempo bom). O critério para escolher esses dias não considera condições meteorológicas (como mencionado na seção 2.2) devido a que a maioria das estações da rede AFINSA não têm uma estação meteorológica perto do sensor EFM. O critério para escolher dias de tempo bom foi classificado com base em dois requisitos (como proposto em Tacza, 2015). O primeiro requisito foi escolher dias que apresentaram uma variação diária de forma aproximadamente similar à curva de Carnegie (figura 2), ou seja, com valores do CEA maiores entre as 12-24 UT comparado com os valores entre as 00-12 UT. O segundo é baseado na realização de histogramas dos valores do CEA registrados em cada uma das estações. Por exemplo, a figura 27 mostra a Frequência Absoluta (figura 27a) e a Frequência Cumulativa (figura 27b) dos valores do CEA para a estação HYO. Assumindo que o número de dias com condições de tempo bom é bem maior que o número de dias com tempo perturbado, o histograma mostra que quase 90 % das medidas estão entre 0-200 V/m. Consequentemente, adotou-se esses valores como característicos para condições de tempo bom. O outro 10 % corresponde a valores registrados durante períodos de tempo perturbado, por exemplo, durante tempestades elétricas. Tacza (2015) mostra os histogramas para CAS1, CAS2, ICA e PLO. Na tabela 2 está indicado o intervalo escolhido, em base aos histogramas, dos valores de amplitude do CEA de tempo bom para todas as estações e o período para o qual foi realizado os histogramas. Os valores altos de amplitude para as estações ROR e SPA é devido, como mencionado anteriormente, a que os valores não foram corrigidos pela posição do sensor. Os valores negativos encontrados nas estações CGR1 e CGR2 (separados aproximadamente 7,5 km) são devido a nuvens, como explicado no seguinte capítulo.

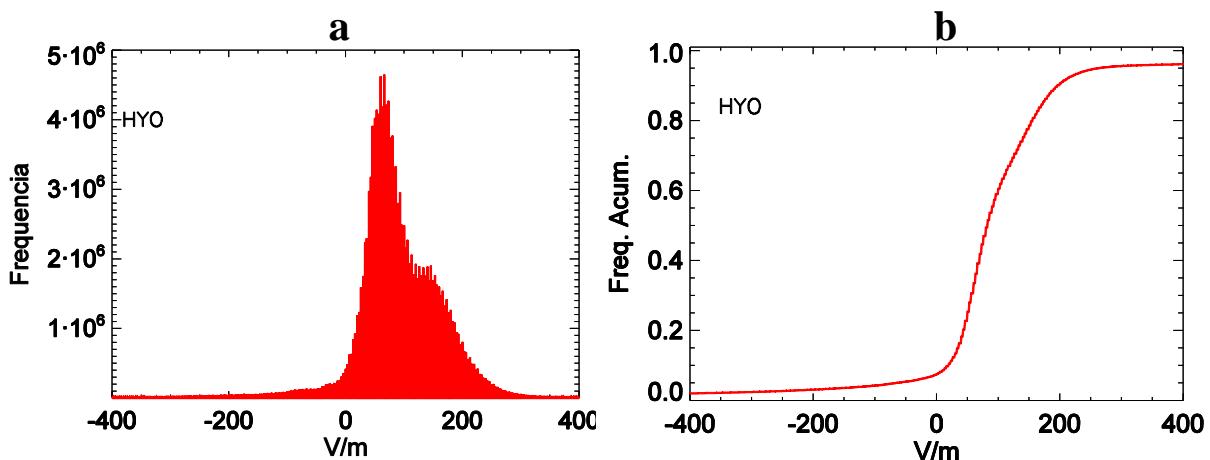


Figura 27: Frequência Absoluta (a) e Frequência Cumulativa (b), para os valores do CEA, para a estação de HYO, durante o período de estudo.

Tabela 2 - Intervalo de valores de amplitude de campo elétrico atmosférico em dias de tempo bom para todas as estações.

| Estação | Intervalo de valores (V/m) | Período |
|---------|----------------------------|----------|
| CAS1 | 40 - 200 | 5 anos |
| CAS2 | 40 - 200 | 5 anos |
| ICA | 0 - 250 | 1 ano |
| PLO | 0 - 250 | 1 ano |
| ROR | 100 - 1000 | 3 anos |
| HYO | 0 - 250 | 12 meses |
| CGR1 | -400 - 500 | 18 meses |
| CGR2 | -500 - 1000 | 12 meses |
| SPA | 400 - 2500 | 14 meses |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para validar o critério adotado para escolher dias de tempo bom, foi comparada a curva diária média anual do CEA com a curva média encontrada utilizando-se o critério meteorológico (velocidade de vento < 8 m/s e não precipitação). Para isso, utilizou-se uma estação meteorológica perto do sensor EFM na estação HYO (afastado ~200 metros). A figura 28 mostra as curvas diárias médias anuais do CEA utilizando-se o critério descrito anteriormente (linha vermelha, média realizada com 34 dias) e o critério que inclui as variáveis meteorológicas (linha preta, média realizada com 21 dias). As barras de erro são de 1σ . Pode-se observar a grande semelhança entre ambas as curvas. O coeficiente de correlação é $r=0.98$. Essa comparação mostra que o critério adotado é uma boa representação de dias de tempo bom e pode ser utilizado em lugares que não tem estações meteorológicas.

Depois de escolher os dias de tempo bom, foram calculadas médias mensais/sazonais/anuais das curvas diárias do campo elétrico atmosférico. As médias obtidas serão nossas curvas padrão e serão importantes para comparar com os diversos fenômenos geofísicos e solares. Adicionalmente, as médias mensais foram comparadas com a variação temporal da concentração de aerossóis e o número de ocorrências de raios.

Na próxima subseção se explica a metodológica para a análise das variações do CEA durante fenômenos solares.

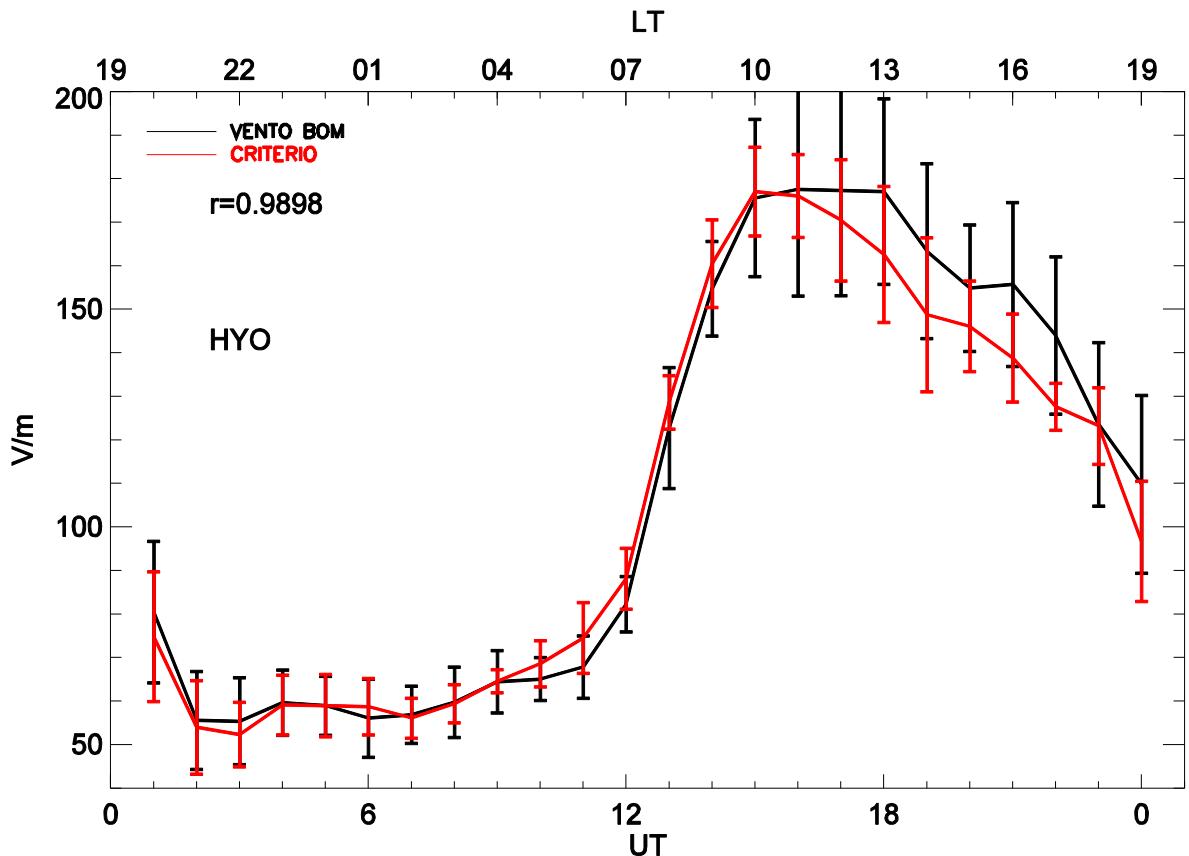


Figura 28: Comparação entre as médias anuais das variações do CEA em dias de tempo bom para o critério utilizado no presente trabalho (linha vermelha) e o critério utilizando-se as variáveis meteorológicas (linha preta). As barras de erros são de 1σ .

4.3 ANÁLISE DE ÉPOCAS SUPERPOSTAS

Devido ao fato que os eventos solares possam ter efeitos no CEA não muito significativos comparado com o ‘ruído’ do sinal foi realizado a análise de épocas superpostas (AES). A AES consiste na média de subconjuntos de dados, no mesmo intervalo de tempo, com a finalidade de eliminar o ruído de fundo e acentuar possíveis efeitos de baixa amplitude. Para a presente tese, os subconjuntos de dados foram os excessos do campo elétrico com respeito à curva padrão durante os eventos solares. A AES tem sido frequentemente utilizada para examinar a relação hipotética entre propriedades elétricas atmosféricas e eventos solares (Cobb, 1967; Reiter 1969; Reiter, 1971; Engfer e Tinsley, 1999). A metodologia adotada na análise das explosões solares e eventos de prótons é a seguinte: Primeiro, as curvas médias mensais das variações diárias do CEA, em condições de tempo bom, foram calculadas para cada mês (curva padrão mensal). Segundo, para cada evento solar, é utilizada uma janela de tempo de 24 horas antes e 48 horas

após a hora de início do evento. A hora de início da explosão solar é definida como o início do aumento no fluxo de raios X (1-8 Å). Da mesma forma, o tempo de início dos eventos de prótons é definido como o início do aumento do fluxo de prótons ≥ 100 MeV. Terceiro, a diferença entre os valores do CEA, de cada janela de tempo, e suas curvas padrão mensais foram calculados para obter os excessos do CEA. Finalmente, aplica-se a análise de época superposta às curvas de excesso. Os dois últimos passos podem ser resumidos pela seguinte fórmula:

$$CEA_{AES} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CEA_i - \overline{CEA}_i \quad (11)$$

onde: CEA_{AES} é o excesso do campo elétrico atmosférico calculado depois de utilizar a análise de épocas superpostas, N é o número de eventos, CEA_i é o CEA com médias de três horas para o evento i , e \overline{CEA}_i é o CEA médio mensal de tempo bom, com média cada três horas, para o evento i .

Para comparar os resultados, aplicamos a mesma metodologia a períodos de 3 dias de medições de campo elétrico atmosférico sem atividade solar (explosão solar, evento de prótons, ejeção de massa coronal). Neste caso, o tempo zero para aplicar a AES foi escolhido em horários diferentes durante o dia para não restringir o resultado para um tempo específico. Assim, se obtém as características da curva de "background" das variações do campo elétrico atmosférico sem quaisquer perturbações solares.

Para o caso de decréscimos Forbush, a janela de tempo foi de 10 dias antes e 10 dias depois do início do evento onde os excessos do CEA foram calculados da diferença dos valores médios diários do CEA e os valores médios de suas respectivas curvas padrão mensais. O tempo de início é o tempo de início do decréscimo Forbush.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados e discutidos resultados das médias mensais, sazonais e anuais do campo elétrico atmosférico de tempo bom para todas as estações da rede AFINSA (subseção 5.1). Numa segunda etapa, as curvas médias anuais foram comparadas com a curva de Carnegie (subseção 5.2). Na subseção 5.3 se compara as variações mensais do CEA com as variações da concentração de aerossóis e o número de ocorrências de raios. Finalmente, na subseção 5.4 são discutidas as variações do CEA durante a ocorrência de diversos fenômenos solares (explosões solares e eventos de prótons solares) e decréscimos Forbush.

5.1 MÉDIAS MENSAIS, SAZONAIOS E ANUAIS

Depois de corrigir os valores registrados do sensor EFM por sua posição permanente (para aqueles onde foi possível) foram obtidas as curvas médias mensais, sazonais e anuais do CEA para dias de tempo bom (curvas padrão mensais, sazonais e anuais, respectivamente), segundo a metodologia descrita na subseção 4.2. Na figura 29 mostra-se exemplos típicos da variação diária do CEA em dias de tempo bom, com resolução temporal de 1 minuto, para algumas das estações consideradas neste estudo.

As curvas padrão mensais e sazonais para a estação CAS1 são mostradas nas figuras 30 e 31, respectivamente. A resolução temporal é de um 1 minuto. O número de dias de tempo bom utilizados para calcular as médias está descrito nas Tabelas A1 e A2 no apêndice A. As curvas padrão para as outras estações são mostradas no apêndice B. As barras de erro σ mostradas nessas figuras foram calculadas segundo Tacza (2015):

- 1ºPaso: Cálculo do desvio padrão, para cada minuto, da média mensal = σ_2
 - 2ºPaso: Cálculo da média de σ_2 para os períodos 00 – 12 UT e 12 – 24UT,
- $$\sigma_1 = \text{média}(\sigma_2_j), \text{ onde } j = 1, \dots, 720 \text{ min.}; 721, \dots, 1440 \text{ min.}$$
- 3ºPaso: Finalmente $\sigma = \text{média}(\sigma_1_i)$, onde $i = \text{número de anos.}$

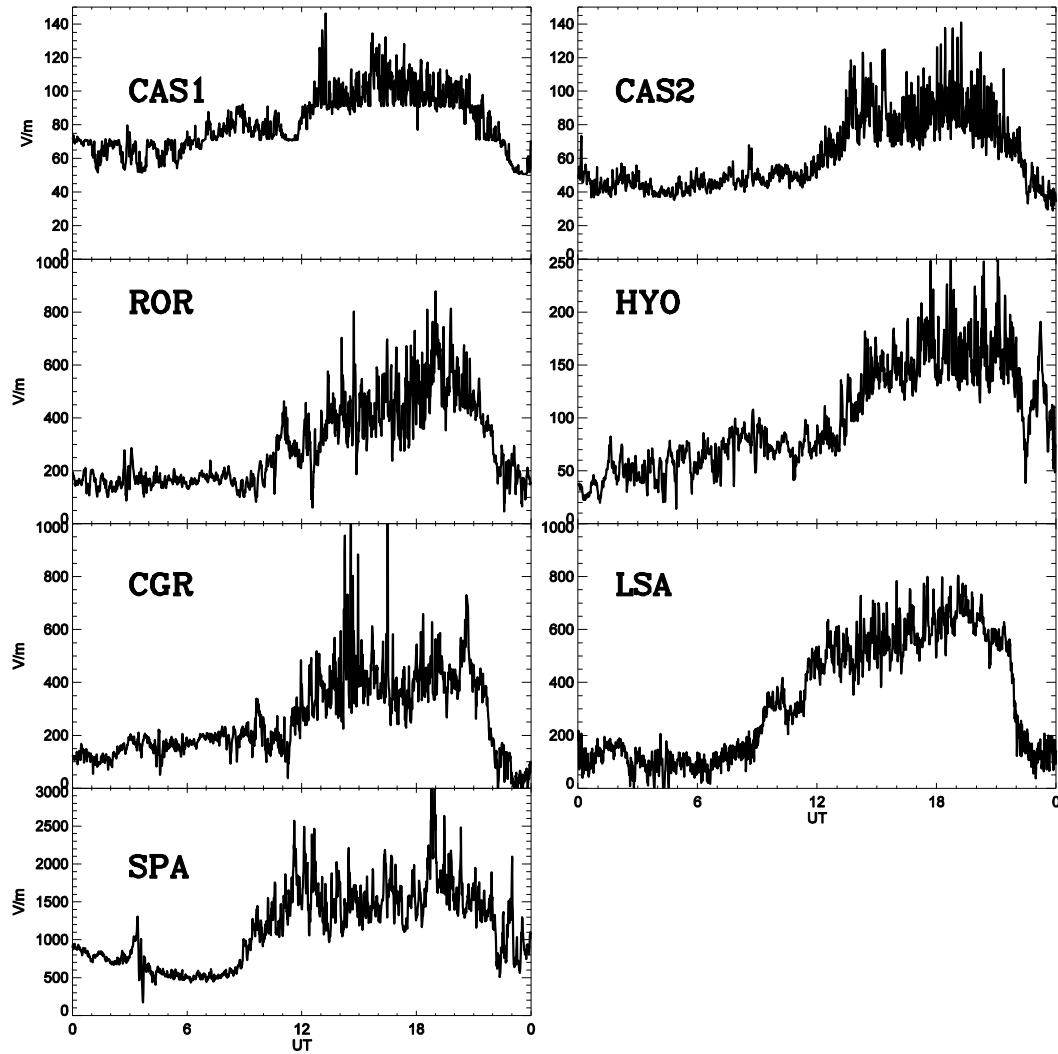


Figura 29: Variações diárias do CEA em dias de tempo bom para as estações CAS1 (13/04/2014), CAS2 (15/04/2014), ROR (08/11/2016), HYO (22/09/2016), CGR1 (22/02/2017), CGR2(LSA, 02/09/2017) e SPA (15/05/2017).

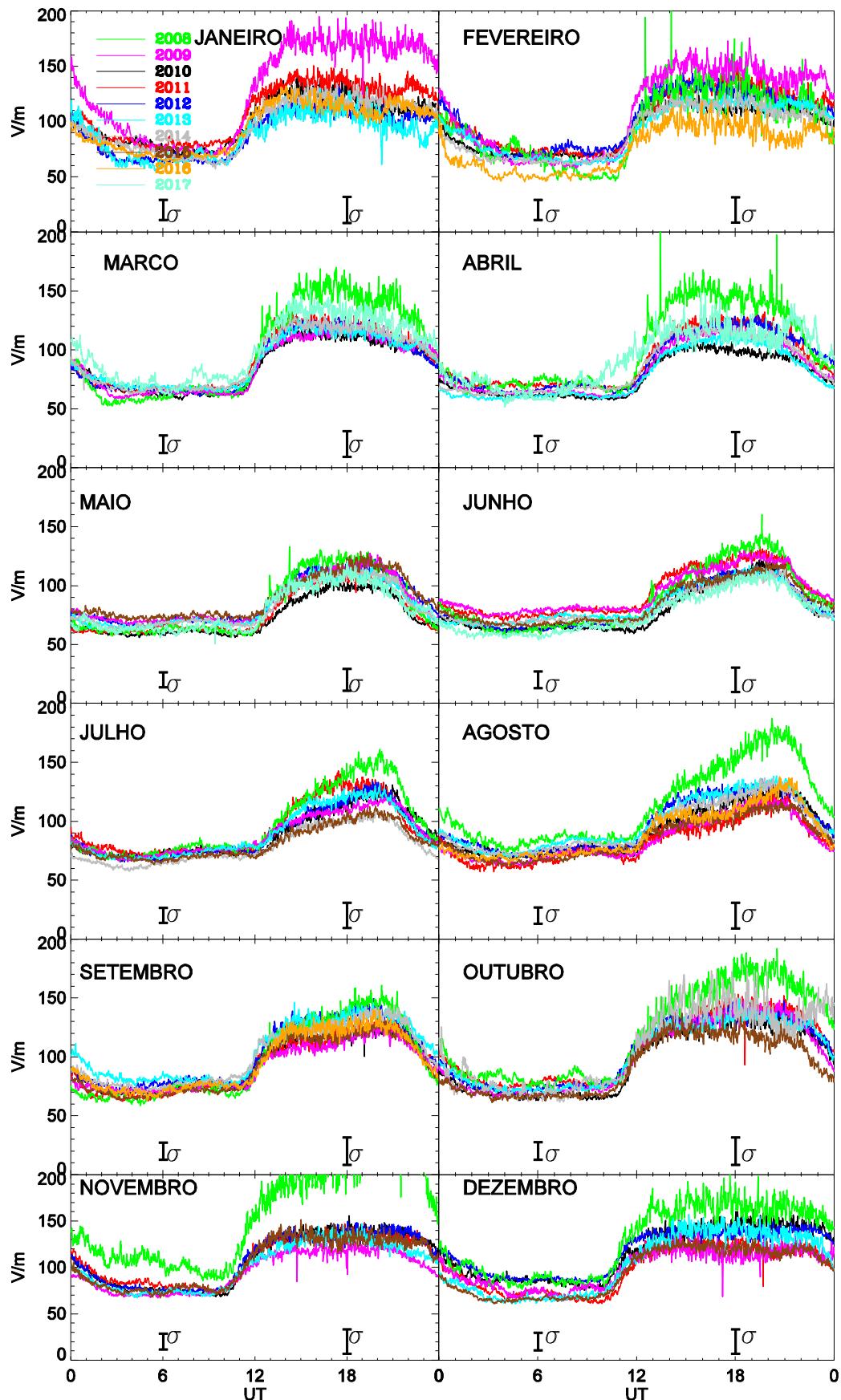


Figura 30: Variação diária média mensal do CEA na estação CAS1 durante dez anos (2008 - 2017). As barras de erro representam valores médios 1σ para os dez anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

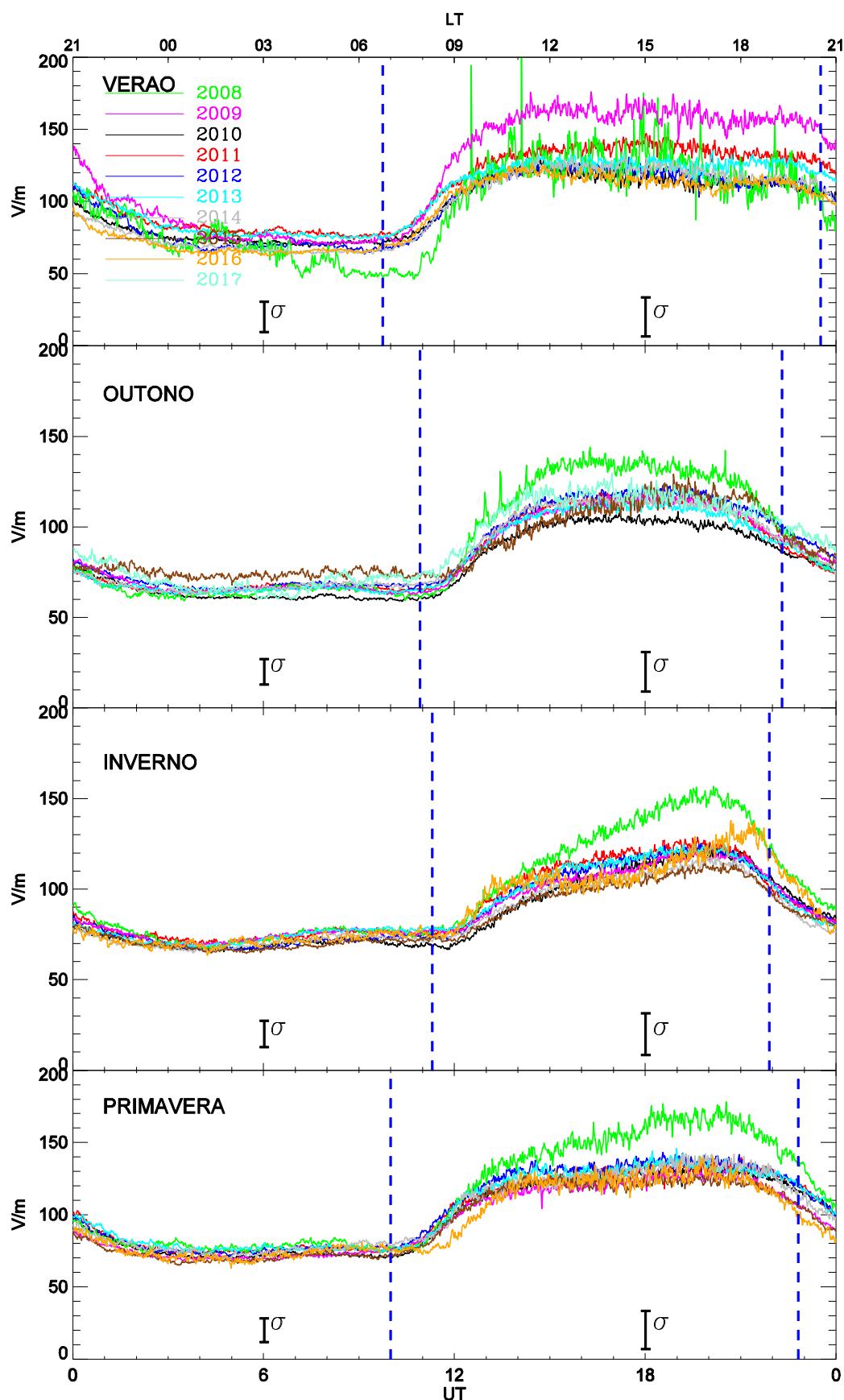


Figura 31: Como na figura 30 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação do ano.

Nota-se das figuras 30 e 31 que a forma das curvas padrão mensais e sazonais é repetida quase de forma idêntica para os diferentes anos. Da mesma forma, características similares são encontradas para as curvas padrão obtidas com os dados do sensor EFM da estação CAS2 (figuras B1 e B2 mostradas no Apêndice B), lembrando que ambos os sensores estão separados 400 metros e, portanto, apresentam características semelhantes. Esses resultados mostram que as curvas padrão encontradas são confiáveis. No Apêndice B se mostram as curvas padrão mensais e sazonais para as outras estações da rede AFINSA: CAS2, ICA, PLO, ROR, HYO, CGR1, CGR2 e SPA.

A continuação é descrita algumas observações relevantes das curvas padrão mensais encontradas para as estações da rede AFINSA. Por exemplo, a figura 30 mostra que para os meses de julho e agosto de 2008 e janeiro de 2009 têm um aumento significativo nos valores de amplitude do CEA no período 12-24 UT quando comparado com outros anos. Uma possível explicação é devido ao aumento na distribuição global de tempestades elétricas na África e na América do Sul, tendo em conta que o aumento só está presente entre as 12-24 UT. Para a curva padrão do mês de novembro de 2008 se observa um incremento que permanece durante o período 0-24 UT. Isso pode ser devido ao aumento dos aerossóis no sítio do sensor EFM. Infelizmente durante esse período não se tem medições de aerossóis, porém medidas da opacidade mostram efetivamente valores altos da opacidade para o mês de novembro de 2008 comparado com outros anos. Os valores altos de opacidade podem sugerir uma atmosfera poluída durante esse período. Da mesma forma, é observado um aumento na curva padrão mensal do junho de 2011 para a estação CAS2 quando comparado com outros anos. Esse aumento pode estar relacionado ao incremento de aerossóis no CASLEO proveniente das partículas ejetadas da erupção do vulcão Puyehue-Cordón (Chile) no dia 04 de junho de 2011. Apesar da distância entre o observatório de CASLEO e o vulcão (aproximadamente 1000 km), estudos mostraram que as partículas ejetadas da erupção deram a volta ao mundo regressando para o continente Sul-Americano no dia 15 de junho (Ellisondo, 2015; DeSouza-Machado, 2015).

A figura 32 mostra a variação diária do campo elétrico atmosférico para os dois sensores instalados em CASLEO (CAS1 e CAS2). Adicionalmente mostra-se a variação diária da espessura óptica de aerossóis (EOA). As cores representam a EOA para diferentes comprimentos de onda (preto: 1020 nanômetro, vermelho: 870 nm, verde: 675 nm, azul: 500 nm, celeste: 440 nm, roxa: 380 nm). Nota-se da figura um incremento simultâneo nas medidas

do CEA, para os dois sensores, e os valores de EOA começando no dia 15 de junho, que é o dia de chegada das partículas ejetadas do vulcão na América do Sul, segundo Ellsongo (2015) e Desouza-Machado (2015), com uma duração aproximada de 20 dias. É importante notar que o aumento dos aerossóis produz um aumento no CEA, segundo a equação 9 (subseção 2.6), durante todo o período de tempo e não influi significativamente na forma da variação típica diária da curva de tempo bom. Portanto, é de esperar que esse incremento se observe na curva padrão mensal do junho de 2011. Isso é evidenciado nos valores altos da curva padrão de junho de 2011 quando comparado com as curvas padrões de outros anos (figura B2). Para a estação CAS1 (figura 30) o incremento nos valores de amplitude da curva padrão de junho não é muito evidente porque os dias de tempo bom escolhidos foram maiores aos que CAS2 afetando no cálculo da curva padrão. Os dias de tempo bom escolhidos para CAS1 foram 20 dias (antes e durante o período de incremento dos aerossóis) e os dias para CAS2 foram 10 (quase todos os dias foram durante o período do incremento dos aerossóis). É importante notar que medições do CEA são sensíveis a partículas ejetadas das erupções vulcânicas, o qual mostra a utilidade de implementar uma rede de sensores EFM para determinar o intervalo de ação das partículas, como já sugerido por outros autores, tal como James et al. (1998).

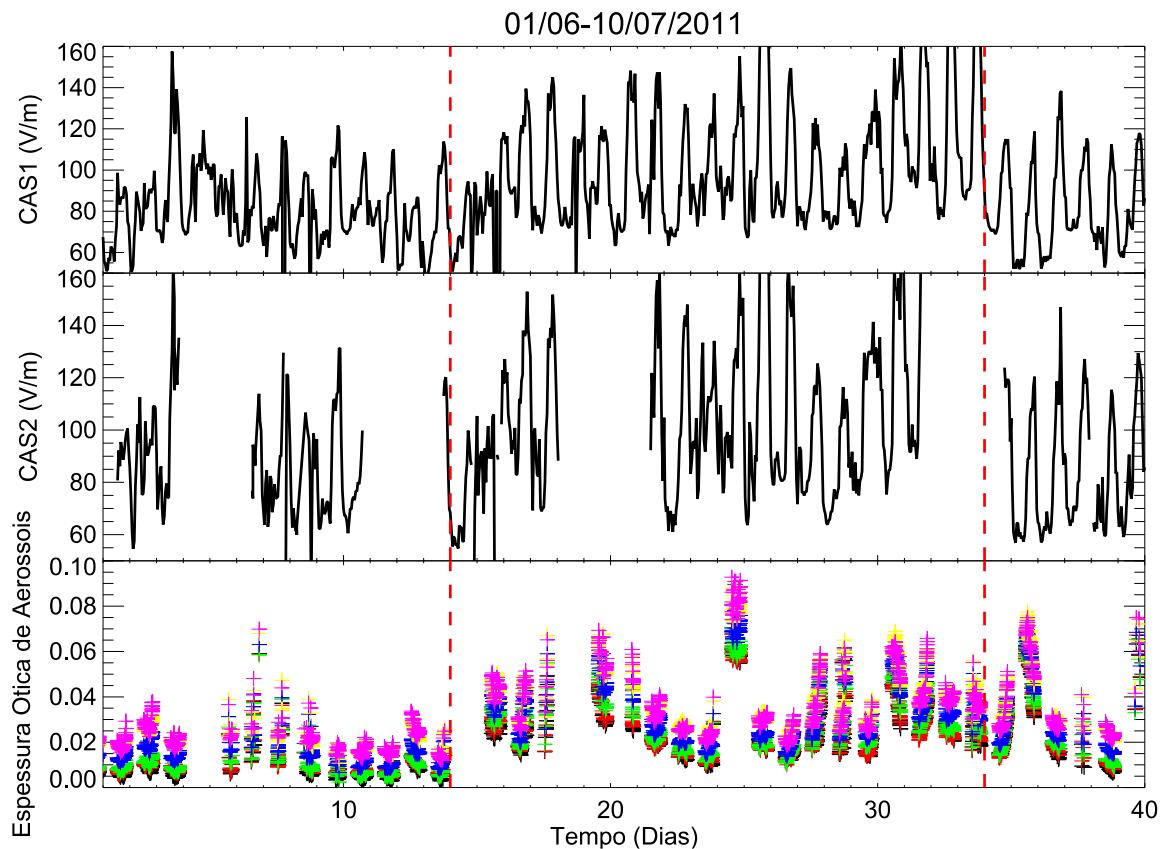


Figura 32: Variação diária do campo elétrico atmosférico para a estação CAS1 (paineil superior) e a estação CAS2 (paineil do meio) comparado com a variação da espessura óptica de aerossóis registrado pela AERONET (paineil inferior). As cores representam os diferentes comprimentos de onda.

As diferenças significativas nas curvas padrão mensais quando comparadas de um ano para outro são evidentes nas estações de ICA, PLO e ROR. Essas diferenças são por diversos motivos, entre eles poucos dias de tempo bom, escassez de dados, obstáculos colocados próximos do sensor EFM e, o mais importante, mudanças na posição do sensor (local e altura). Por exemplo, o sensor da estação de ROR foi trocado de local de medição no setembro de 2017 produzindo mudanças significativas nos valores de amplitude no cálculo das curvas padrão mensais quando comparadas com outros anos (figura B7). O sensor retornou para seu local original no março de 2018, porém, as curvas padrão médias de março, abril e maio são maiores em amplitude quando comparadas com anos anteriores e isso pode ser à uma posição final diferente à original na altura do sensor. Essas mudanças no valor de amplitude do CEA, devido a fatores humanos, fazem difícil a análise com respeito à fenômenos naturais. No entanto, essas curvas padrão foram úteis para sua comparação com a curva de Carnegie como será explicado na próxima subseção.

O sensor da estação HYO esteve trabalhando entre julho e dezembro de 2016. Por motivos técnicos e/ou administrativos o sensor esteve sem trabalhar todo o ano 2017. Em abril de 2018 o sensor começou a operar novamente. Sabe-se que o sensor foi instalado no mesmo local, porém, as curvas padrão mensais de julho de 2016 e 2018 mostram uma diferença nos valores de amplitude. Essa mudança na amplitude do CEA pode ser devido à um fenômeno natural ou a estar instalado numa posição diferente na altura do sensor com respeito à sua altura original. Isso será estudado com maior detalhe com as curvas padrão médias futuras nos próximos meses.

Outro ponto importante para ressaltar são as curvas padrão mensais da estação CGR1. Para os meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro os valores de amplitude do CEA são negativos durante a maior parte do dia (figura B11). Os valores negativos são observados entre as 0-4 UT e 21-24 UT. Os mesmos resultados foram encontrados para a estação CGR2 (figura B13), lembrando que a separação entre ambos os sensores é de aproximadamente 12,5 km. Esses meses correspondem a períodos com mais cobertura de nuvens do ano começando em outubro e terminando em maio. Na figura 33a mostra-se a variação temporal do CEA para os dias 19 de dezembro de 2017 (um dia típico com valores negativos durante a maior parte do dia) e 30 de maio de 2018 (um dia típico com valores positivos durante todo o dia). A figura 33b mostra as imagens de satélite para esses dias e a figura 33c as imagens de satélite com sua respectiva classificação de nuvens. Ambas as figuras mostram as imagens para às 19 UT.

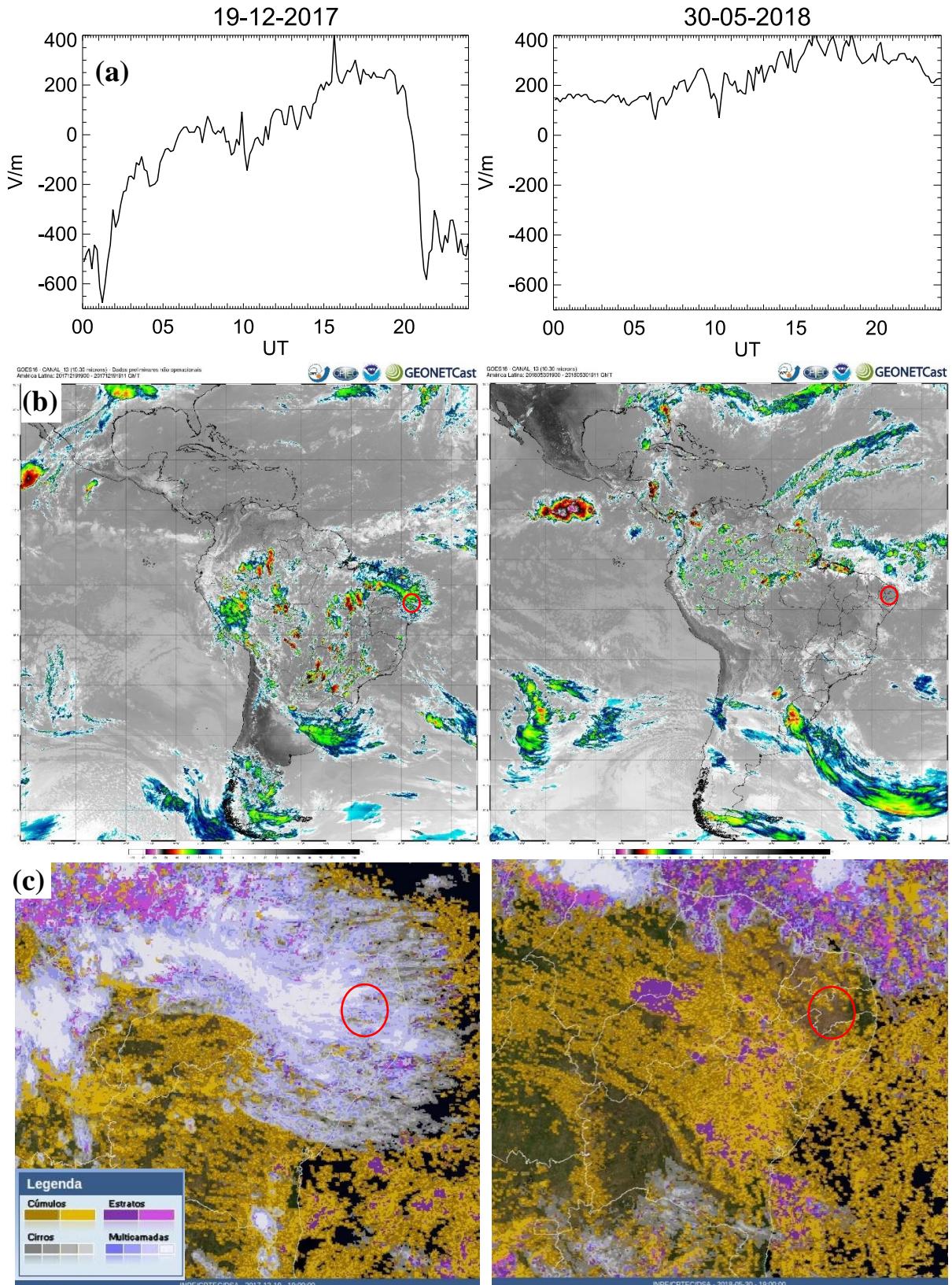


Figura 33: Variação diária do campo elétrico atmosférico para os dias 19/12/2017 e 30/05/2018 (a) Imagens de satélite para América Latina para os dias 19/12/2017 e 30/05/2018 às 19 UT (b) Imagens de satélite mostrando a classificação de nuvens para os dias 19/12/2017 e 30/05/2018 às 19 UT (c) (Fonte: CPTEC/INPE)

Nota-se da figura 33a que o dia 19/12/2017 a variação do campo elétrico atmosférico apresenta valores negativos e que esse dia esteve com cobertura de nuvens estratos (figuras 33b e 33c). Por outro lado, no dia 30/05/2018 a variação do CEA se manteve positiva durante o dia e não houve presença de nuvens. Esses resultados sugerem que o reverso de polaridade no CEA é devido a cobertura de nuvens, como já mencionado por outros autores. Nicoll e Harrison (2010, 2016) e Harrison et al. (2017) mostraram experimentalmente que a base das nuvens estratos apresentam uma camada de carga negativa qual origina o reverso de polaridade do CEA. Podemos concluir que entre os meses de outubro e maio a maior parte dos dias teve maior cobertura de nuvens afetando o cálculo da curva padrão para esses meses. As curvas padrão mensais que apresentam valores negativos não foram consideradas para o cálculo da curva padrão anual, a qual foi comparada com a curva de Carnegie (subseção 5.2).

Adicionalmente as curvas padrão mensais também são mostradas as curvas padrão sazonais (figura 31 e apêndice B). Como é de esperar as curvas padrão sazonais apresentam as mesmas características que as curvas padrão mensais, ou seja, quando as curvas padrão mensais são semelhantes ou diferentes de um ano para outro então as curvas padrão sazonais também são semelhantes ou diferentes. Na presente tese só foi discutido, como explicado mais adiante, as mudanças sazonais encontradas para as estações CAS1 e CAS2 devido à sua longa base de dados.

As figuras 34, 35 e 36 mostram as curvas padrão anuais da variação diária do CEA para todas as estações da rede AFINSA. Adicionalmente, no lado direito, são mostradas as curvas padrão em termos do percentual da média. No eixo vertical superior se mostra a escala horária local (LT – do inglês, Local Time). Como mencionado para as curvas padrão mensais e sazonais, as estações CAS1 e CAS2 mostram estruturas idênticas que se repetem de um ano para outro. Nota-se que para a estação CAS2 existe uma redução nos valores de amplitude que pode estar relacionada a efeitos solares (ciclo solar), efeitos de aerossóis (poluição) ou simplesmente uma falha instrumental no sensor EFM. Isso será discutido mais adiante. Diferenças nos valores de amplitude são observadas para as outras estações devido, como já explicado, por poucos dias de tempo bom escolhidos, escassez de dados e, o mais importante, mudanças na posição do sensor EFM. É importante destacar que comparando as curvas padrão em termos do percentual da média fazem as curvas muito semelhantes de um ano para outro. Adicionalmente, é notável a semelhança das curvas padrão anuais com a curva de Carnegie. Uma comparação mais detalhada com a curva de Carnegie é o objetivo da subseção 5.2.

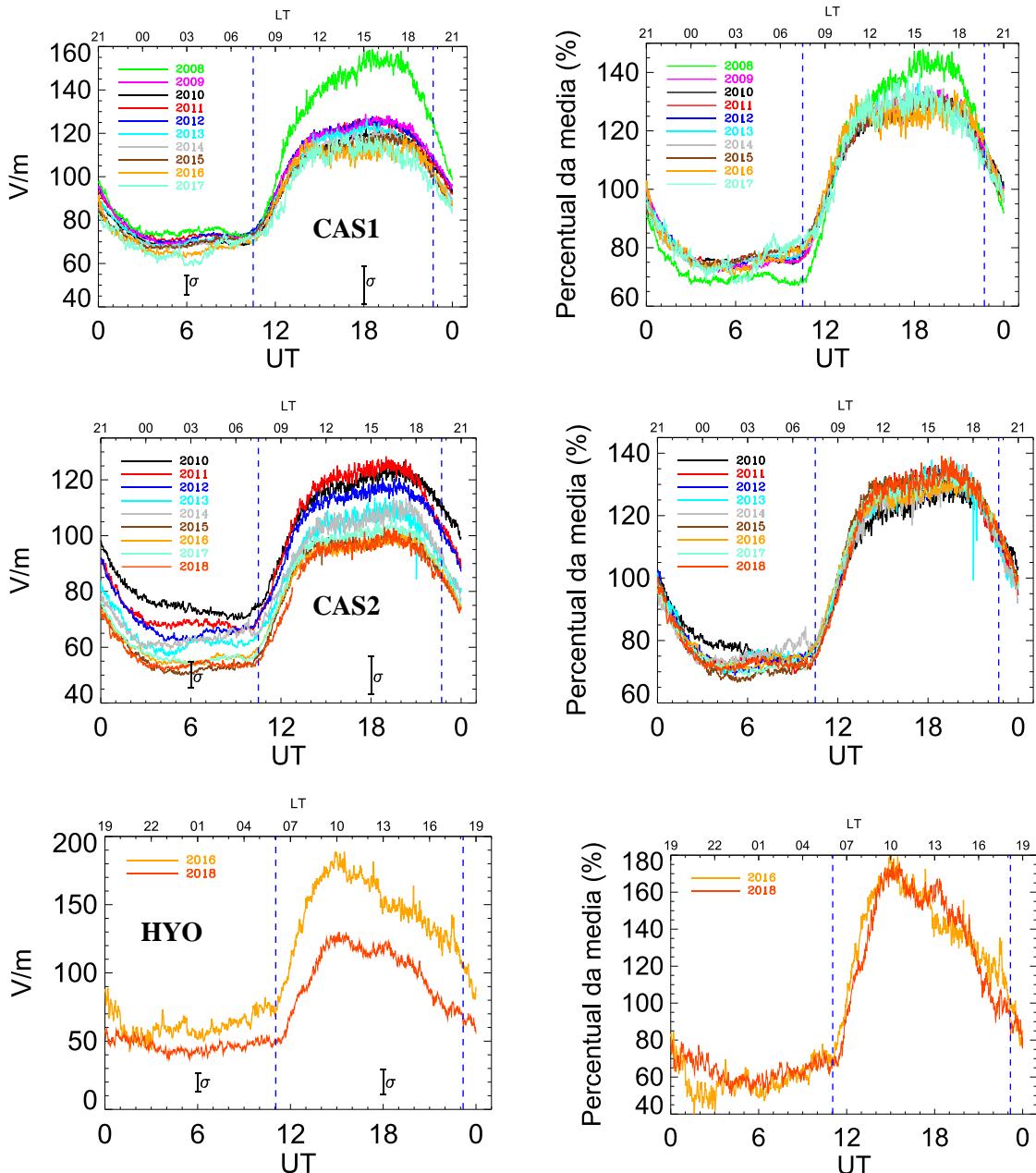


Figura 34: Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de CAS1 (2008-2017), CAS2 (2010-2018) e HYO (2016-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas acima dos 2400 metros acima do nível do mar.

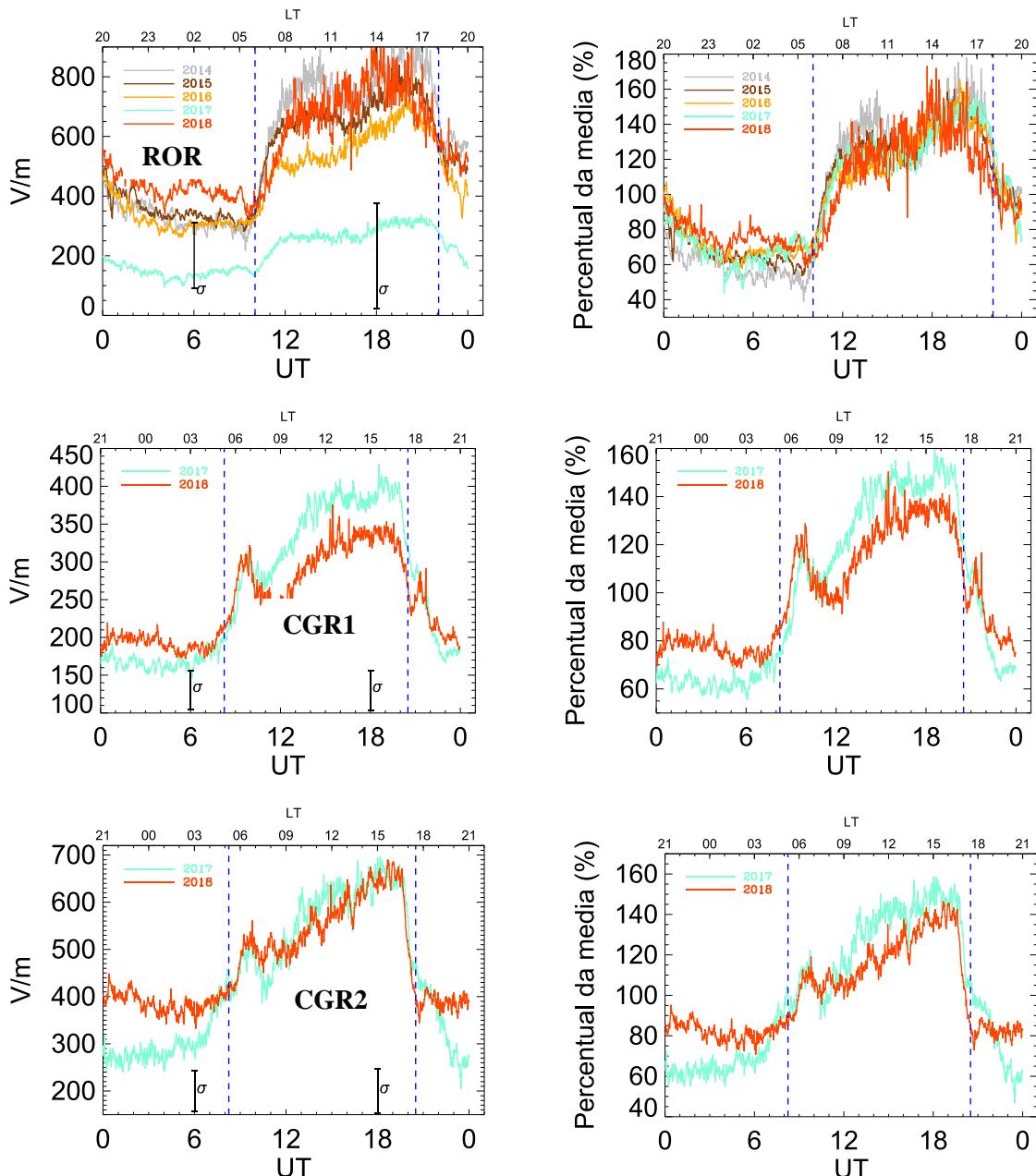


Figura 35: Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de ROR (2014-2018), CGR1 (2016-2017) e CGR2 (2017-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas no norte do Brasil.

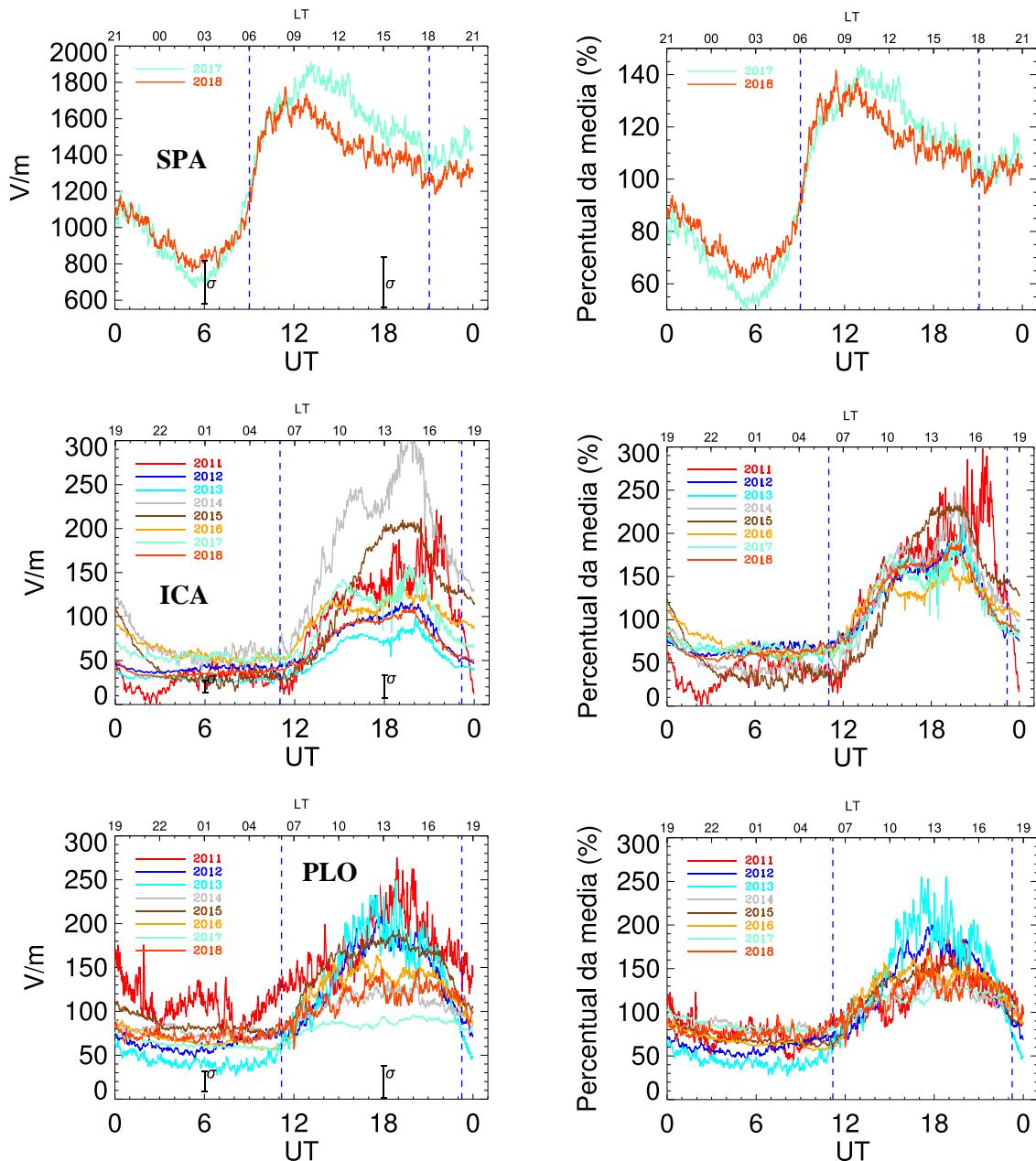


Figura 36: Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para as estações de SPA (2017-2018), PLO (2011-2018) e ICA (2011-2018). As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada estação, respectivamente. As três estações estão localizadas nas cidades de São Paulo, Ica e Lima, respectivamente.

Além das médias mensais, sazonais e anuais foi realizada a análise de toda a série temporal do CEA para as estações CAS1 e CAS2, isso devido à grande base de dados registrada (10 e 9 anos, respectivamente). A figura 37 mostra a série temporal das médias diárias do CEA de dias de tempo bom para a estação CAS1 entre 01 de janeiro de 2008 até 18 de junho de 2017. Na parte superior apresenta-se a média diária entre as 00-24 UT, no segundo painel mostra-se a média para as 00-08 UT, no terceiro painel a média entre as 08-16 UT e na parte inferior à média para as 16-24 UT. A curva vermelha é uma média móvel de 31 dias. Por outro lado, as linhas tracejadas vermelhas verticais indicam o início de cada ano. Da mesma forma, a figura 38 ilustra o mesmo resultado para a estação CAS2 para o período 01 de janeiro de 2010 até 31 de junho de 2018. Para ambos os sensores, observa-se uma variação sazonal com valores altos entre os meses de dezembro-janeiro e valores baixos entre os meses de maio-julho, o qual permanece para os quatro períodos de tempo (00-24, 00-08, 08-16 e 16-24 UT).

Adicionalmente, a figura 39 mostra os valores médios das curvas padrão mensais para a estação CAS1 (período entre janeiro 2008 até junho 2017). No painel superior se mostra as médias mensais para cada ano e no painel inferior as médias mensais de forma contínua para o período analisado. As barras de erro são de 1σ . O resultado para a estação CAS2 é apresentado na figura 40. Pode-se observar, como já evidenciado nas figuras 37 e 38, que para todos os anos os valores de amplitude do CEA experimentam uma diminuição desde o início do fevereiro e, geralmente, atingem seu valor mínimo nos meses entre maio e julho. Depois, os valores aumentam atingindo seus valores máximos entre os meses de dezembro e janeiro.

Como mencionado no capítulo 2, as tempestades elétricas são os principais geradores do CEA de tempo bom, portanto, é esperada uma variabilidade sazonal similar entre os valores do CEA e a ocorrência global das tempestades. Ou seja, as tempestades elétricas apresentam uma variação sazonal com um incremento no número de ocorrências de tempestades entre os meses de junho-agosto e um decréscimo entre os meses de dezembro-fevereiro (ver figura 7). Portanto, é esperada uma variação sazonal similar no campo elétrico. No entanto, os resultados encontrados nas figuras 39 e 40 é oposta à variação global das tempestades elétricas. Isso pode ser devido, como explicado em Adelman e Williams (1996), aos efeitos locais (por exemplo aerossóis) influenciando nos valores do CEA no local de medição e obscurecendo efeitos globais. Isso será discutido com maior detalhe na subseção 5.3.

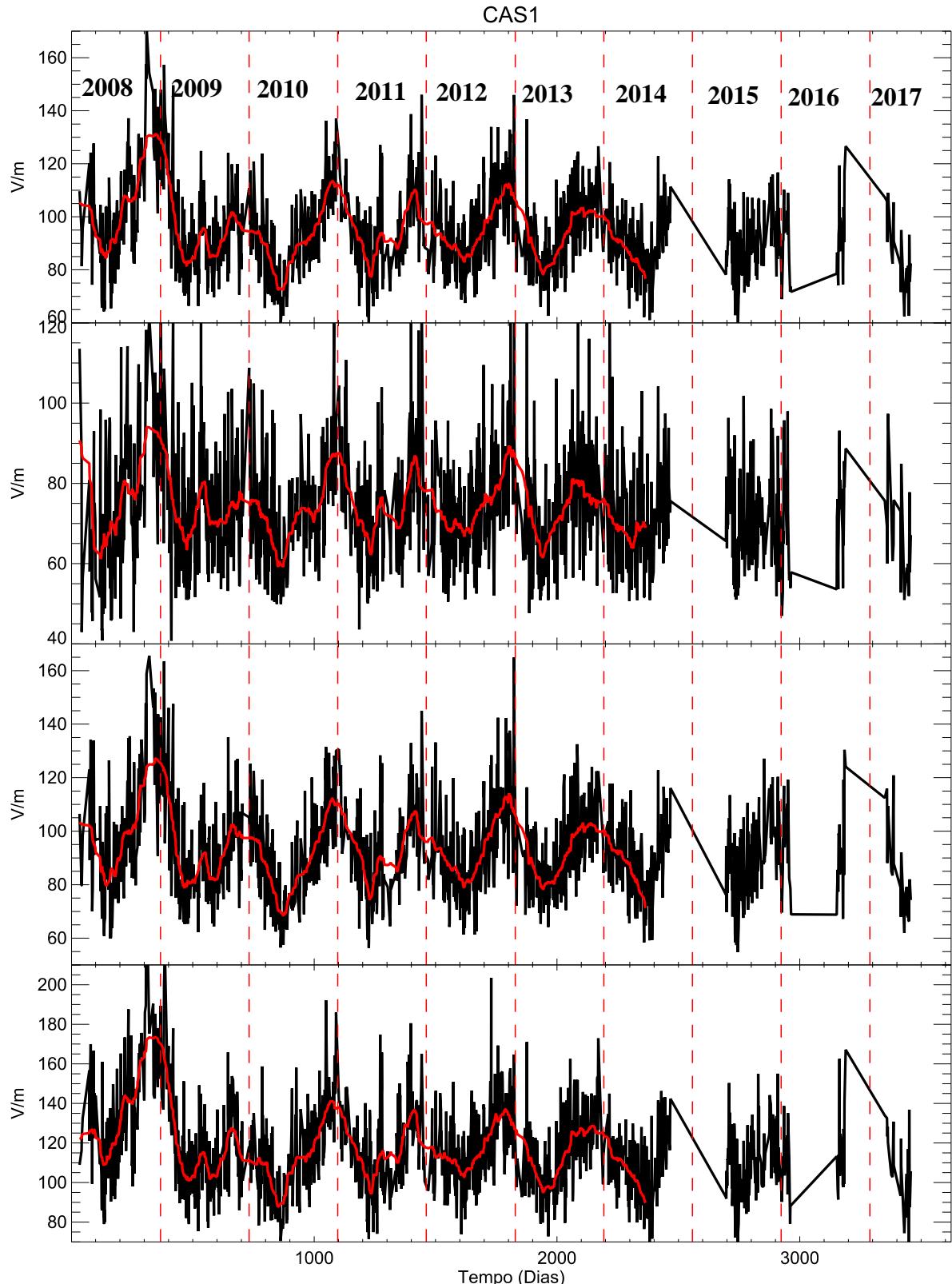


Figura 37: Variação diária do CEA para dias de tempo bom para CAS1 (na parte superior: média para as 00-24 UT, segundo painel: média para as 00-08 UT, terceiro painel: média para as 08-16 UT e na parte inferior: média para as 16-24 UT), para o período entre 01 de janeiro de 2008 até 18 de junho de 2017. A curva vermelha é uma média móvel de 31 dias. As linhas tracejadas verticais de cor vermelha indicam o início de cada ano.

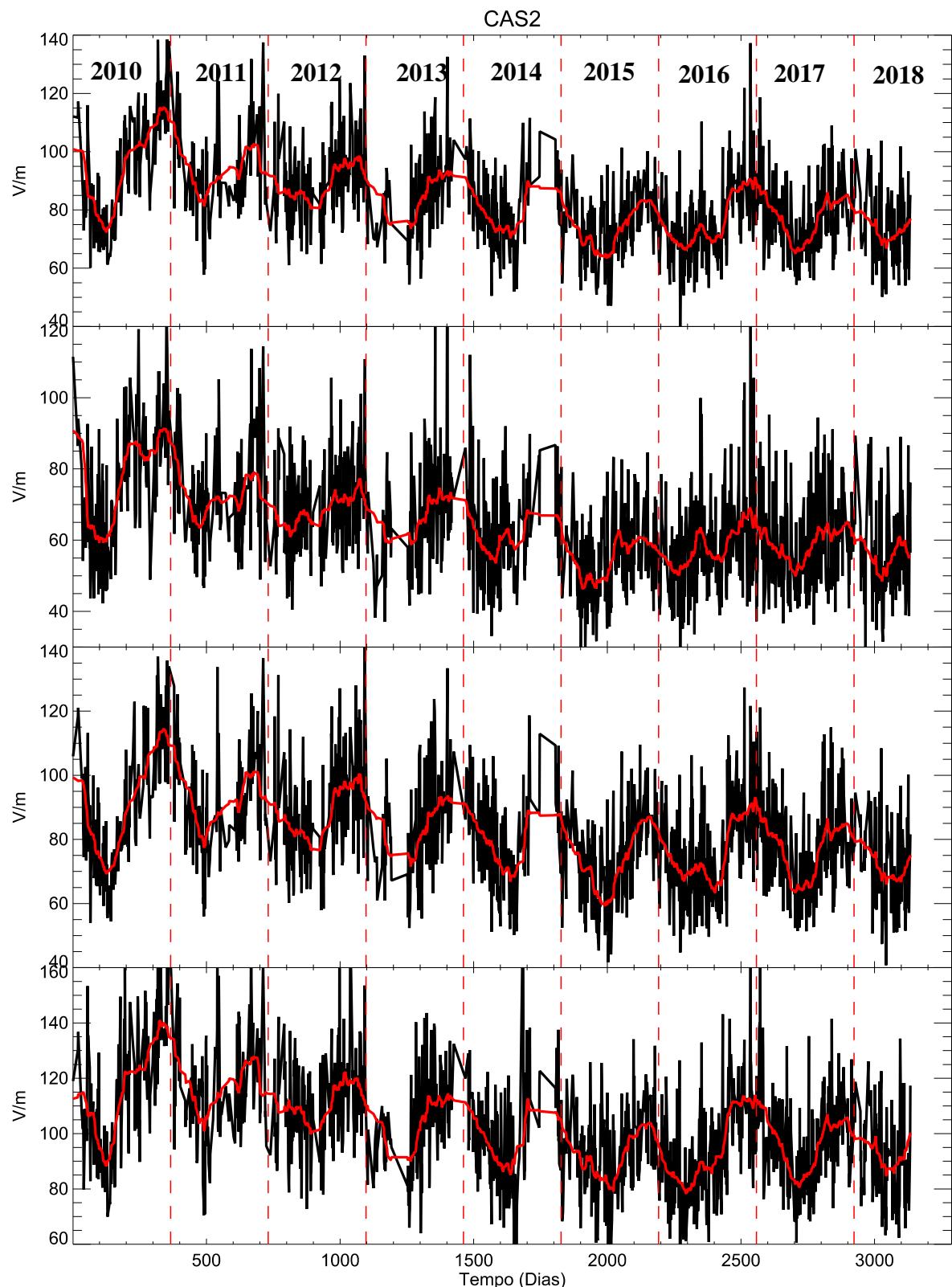


Figura 38: Como na figura 37 apenas para a estação CAS2 para o período entre 01 de janeiro de 2010 até 31 de julho de 2018.

Por outro lado, observa-se uma diminuição evidente de 330mV/m por mês nos valores de amplitude do CEA para a estação CAS2 para o período entre janeiro de 2010 até dezembro de 2015. Depois disso, a diminuição não está mais presente e o CEA, ao parecer, têm se mantido estável até junho de 2018. Mudanças de longo prazo no CEA pode ser devido a três fatores: falha instrumental no sensor EFM, efeito local (como a variação da concentração dos aerossóis) ou um efeito global (por exemplo o ciclo solar). A falha instrumental pode ser devido ao deterioramento físico na parte mecânica do sensor afetando a sensibilidade no registro das medidas. No entanto, se observa da figura 40 que o CEA diminui e depois se mantém estável. Se o problema fosse instrumental se esperaria que os valores de amplitude continuem diminuindo. Por tanto, uma falha instrumental pode ser excluída. Uma possível mudança na concentração dos aerossóis, no local de medição, também pode perturbar o CEA. Infelizmente não se tem dados registrados para todo esse período de tempo no observatório de CASLEO. Com respeito a efeitos globais, Harrison e Usoskin (2010) já mostraram variações do CEA seguindo o ciclo de raios cósmicos (inverso ao ciclo solar). Porém, para confirmar essas mudanças nos dados da estação CAS2 precisa-se ter uma série temporal mais longa.

A diminuição encontrada para a estação CAS2 é muito menor nos dados da estação CAS1 (~80mV/mês), talvez devido aos repetitivos procedimentos de calibração do sensor a partir de junho de 2013 que implicaram uma mudança na posição da altura do sensor. Mudanças na posição do sensor, mesmo sendo pequenas, podem afetar os valores de amplitude do CEA, como já explicado anteriormente.

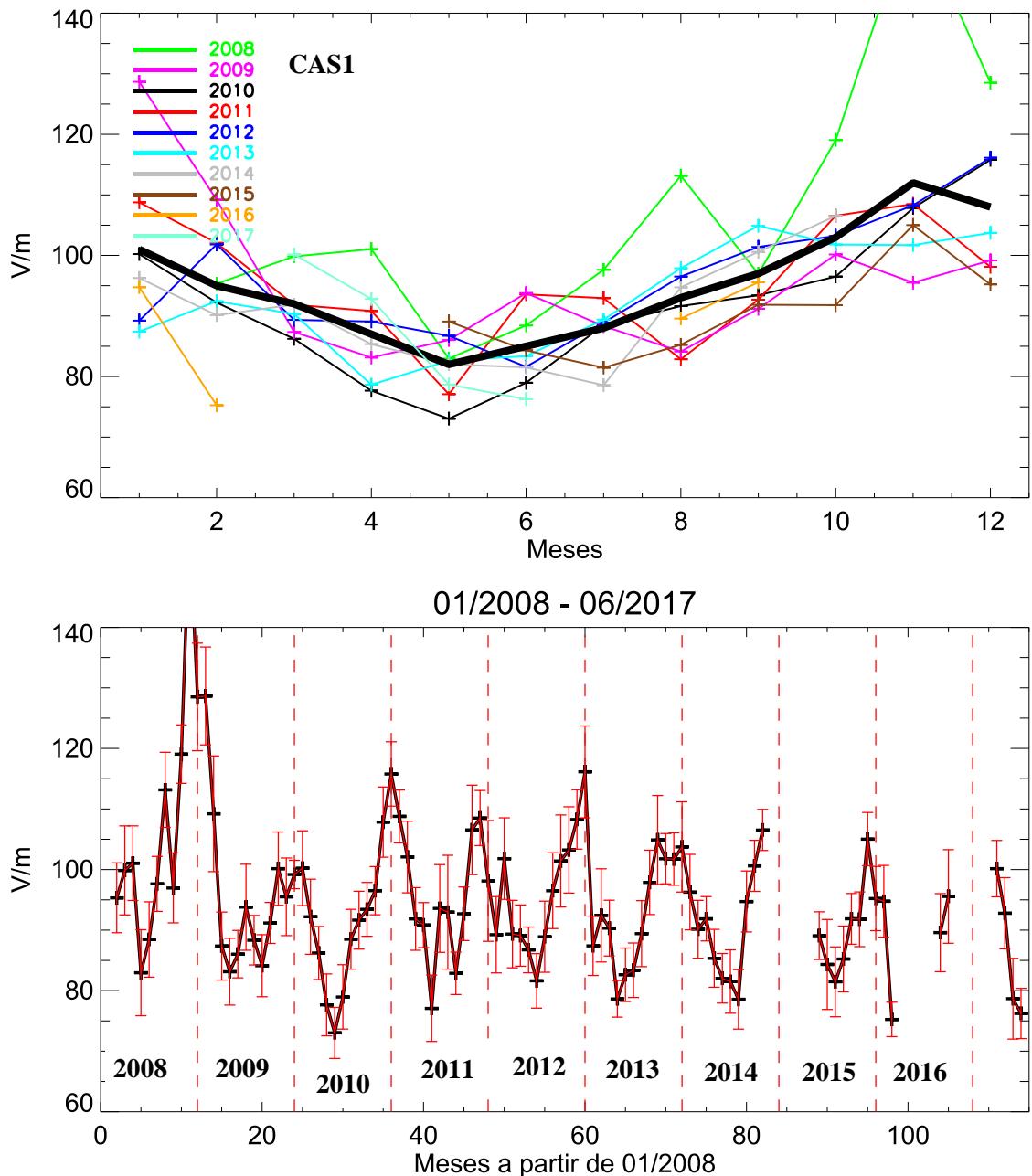


Figura 39: Parte superior: Variação média mensal do CEA em dias de tempo bom para CAS1 para o período entre janeiro 2008 até junho 2017. A curva grossa representa o valor médio para cada mês. Parte Inferior: Série temporal das médias mensais do CEA para CAS1 para o mesmo período. As linhas tracejadas verticais de cor vermelha indicam o início de cada ano. As barras de erro são de 1σ .

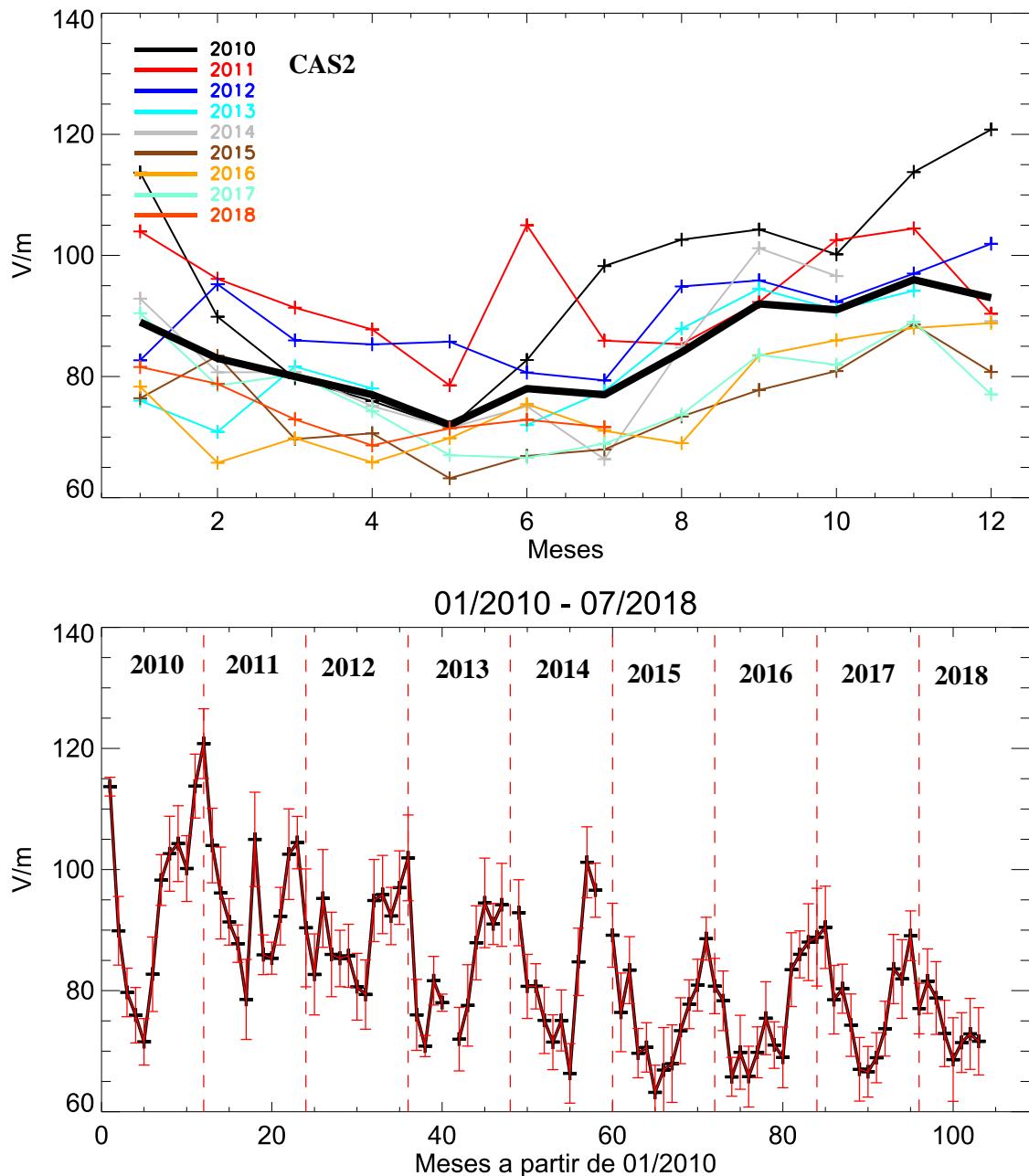


Figura 40: Como na figura 39 apenas para a estação CAS2 para o período entre janeiro de 2010 até julho de 2018.

5.2 COMPARAÇÃO COM A CURVA DE CARNEGIE

Existe uma semelhança na forma entre as curvas padrão anuais do campo elétrico atmosférico para todas as estações da rede AFINSA (figura 34, 35 e 36) e a curva de Carnegie (figura 2). Porém, com respeito aos valores de amplitude existe uma diferença quando se compara em termos da variação do percentual do valor médio. A curva de Carnegie apresenta uma variação no percentual de seu valor médio de ~35 %, enquanto o percentual para as estações da rede é aproximadamente o dobro. A figura 41 mostra a comparação entre as curvas padrão anuais da rede AFINSA (curva preta) e a curva de Carnegie (curva vermelha) em termos do percentual da média. As linhas tracejadas verticais azuis indicam o nascer e pôr do sol, respectivamente, sendo os horários valores médios para todo o ano. No eixo vertical superior se mostra a escala horária local para cada estação. Adicionalmente, se mostra a média de todas as curvas padrão anuais das estações da rede AFINSA, chamada REGIONAL, comparada com a curva de Carnegie.

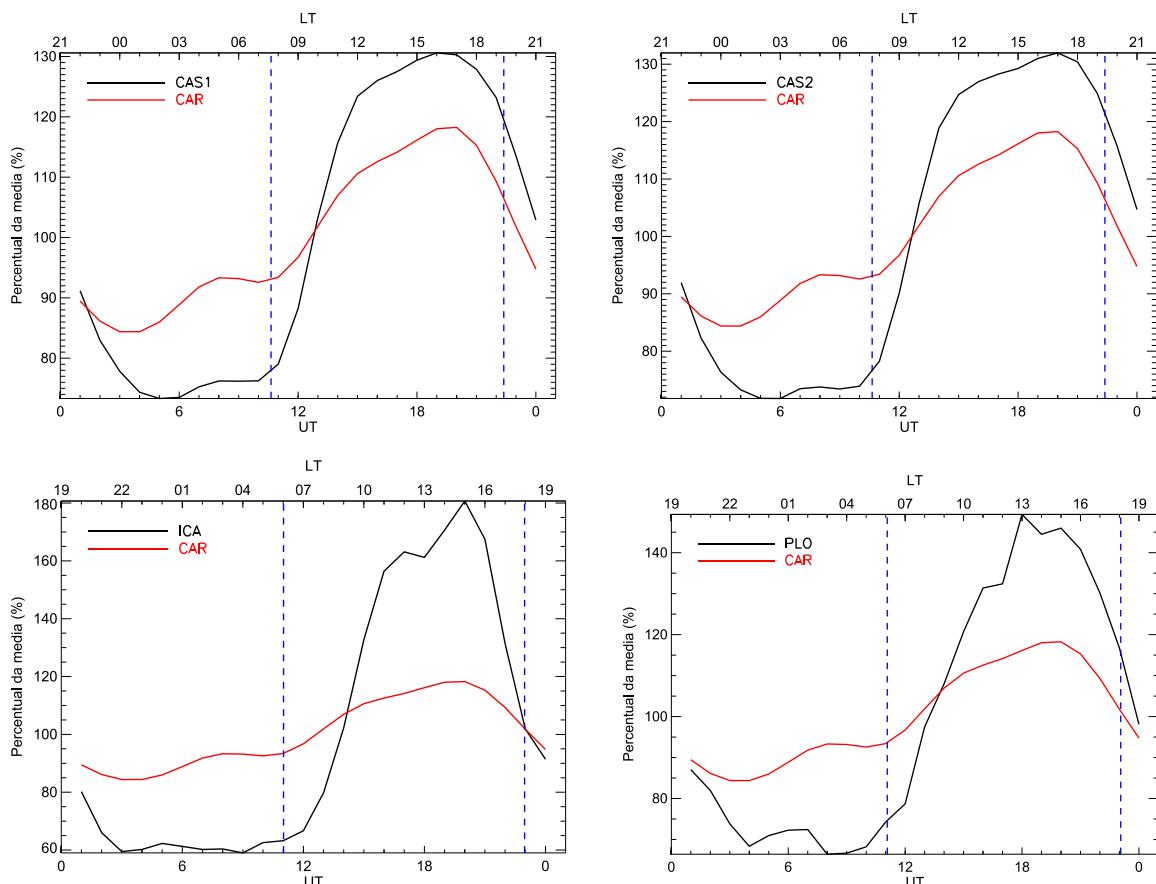


Figura 41: Variação diária média anual do campo elétrico atmosférico para todas as estações da rede AFINSA (curva preta) comparada com a curva de Carnegie (curva vermelha) em termos do percentual da média. As linhas tracejadas verticais azuis indicam o nascer e pôr do sol, respectivamente.

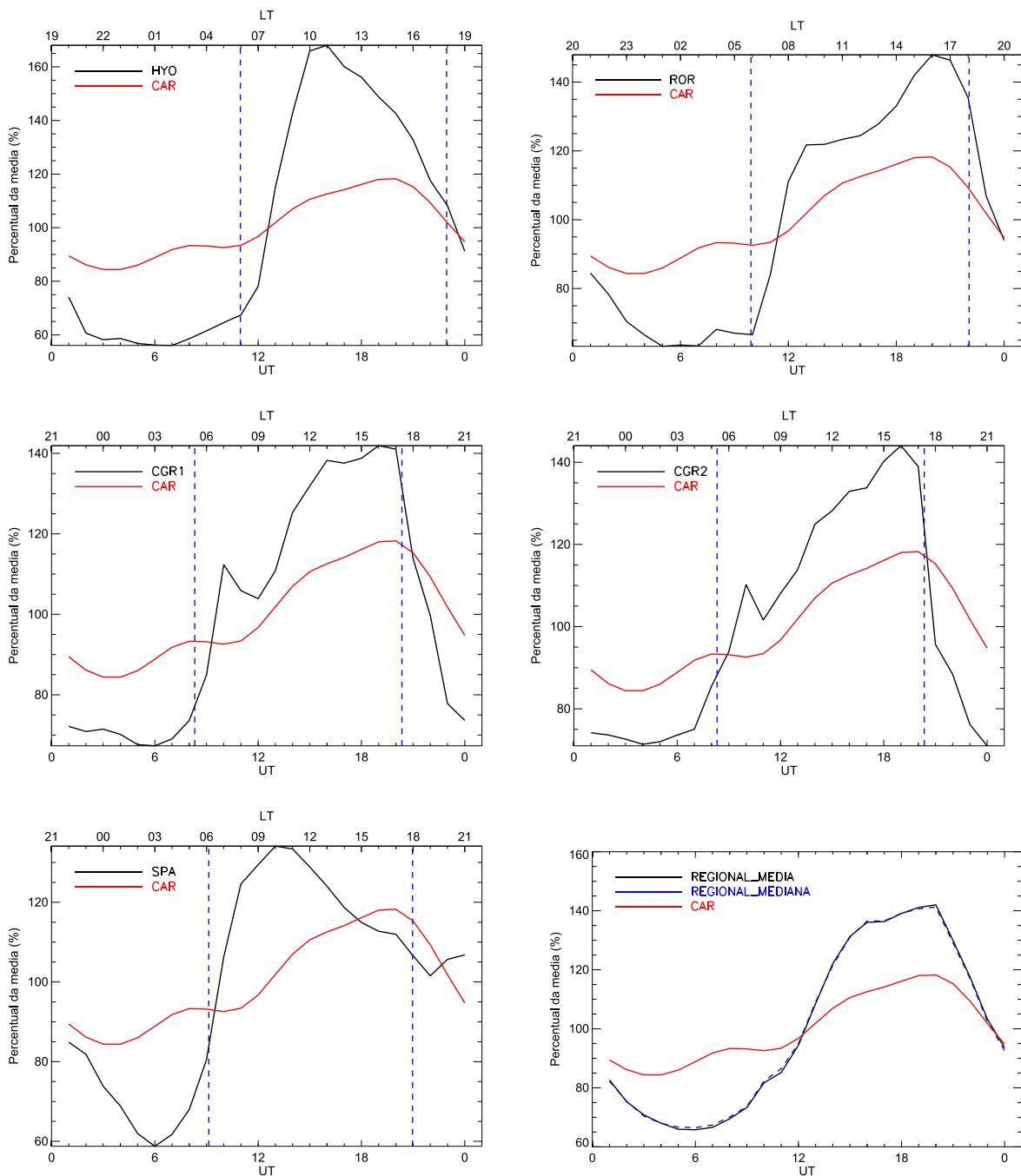


Figura 41: Continuação.

Como explicado anteriormente efeitos locais perturbam o campo elétrico atmosférico de tempo bom. Por um lado, medições realizadas em continente são influenciadas pela radioatividade natural do solo, principalmente pelo decaimento do gás radônio, produzindo uma variação na taxa de ionização e, portanto, na condutividade elétrica que é oposta a variação do campo elétrico atmosférico. Adicionalmente, o aumento da temperatura depois do nascer do sol produz um incremento da turbulência e convecção para os arredores, isso pode gerar dois processos: que as partículas ultrafinas do aerossol se liguem entre elas crescendo em tamanho e/ou que as partículas de aerossol se liguem com pequenos íons diminuindo a condutividade elétrica. Também, pode-se produzir cargas elétricas que se acumulam no topo da camada limite planetária. Esse incremento das cargas elétricas produz um aumento no campo elétrico atmosférico (Nicoll et al., 2018). Por outro lado, um acréscimo na concentração de aerossóis, por exemplo devido ao trânsito veicular ou fumaça, origina fortes desvios no campo elétrico atmosférico de tempo bom (Harrison e Aplin, 2002; Harrison, 2006; Silva et al., 2014).

A continuação aprofunda-se sobre os efeitos locais, especificamente os efeitos devidos a turbulência e convecção, no campo elétrico atmosférico de tempo bom. Para isso foi utilizado dados da estação CAS1, devido ao observatório CASLEO estar localizado afastado de cidades, evitando poluição local, e ter pouca presença de atividades antropogênicas. A figura 42 mostra a variação do campo elétrico atmosférico, temperatura e espessura óptica de aerossóis (AOT – do inglês Aerosol Optical Thickness, para um comprimento de onda de 440 nm) para os dias 31 de janeiro e 23 de junho de 2011. As linhas tracejadas verticais indicam o nascer e pôr do sol, respectivamente. Para ambas as figuras se observa que depois do nascer do sol a temperatura aumenta, incrementando a turbulência e convecção produzindo que as partículas ultrafinas do aerossol se liguem entre elas crescendo em tamanho e incrementando sua concentração, evidenciado no incremento do AOT na figura 42. Um incremento na concentração dos aerossóis produz um incremento no CEA. Adicionalmente, nota-se que para o mês de janeiro (figura 42a) os valores de CEA e da espessura ótica são maiores quando comparados com os valores de junho (figura 42b). Também, observa-se valores altos na amplitude do CEA e na espessura entre as 11-14 UT (8-11 LT) para o mês de janeiro (figura 42a). Isso sugere que nos meses de verão se têm uma maior influência da convecção local no CEA e no inverno uma influência menor.

Da seção 2.4, sabe-se que o campo elétrico atmosférico de tempo bom é gerado principalmente pelas tempestades elétricas acontecendo a grandes distâncias. Por isso, é esperado uma boa

correlação diária entre ambos os parâmetros em dias de tempo bom. Para comprovar isso, e analisar como afeta a convecção local nessa correlação, foi analisada a correlação entre o CEA e as tempestades elétricas. Para ter uma ideia do número de ocorrências das tempestades elétricas foi utilizada o número de ocorrências de raios (registrada pela rede STARNET). O número de raios foi calculado para distâncias indo desde 0 até 10.000 km afastado do observatório de CASLEO.

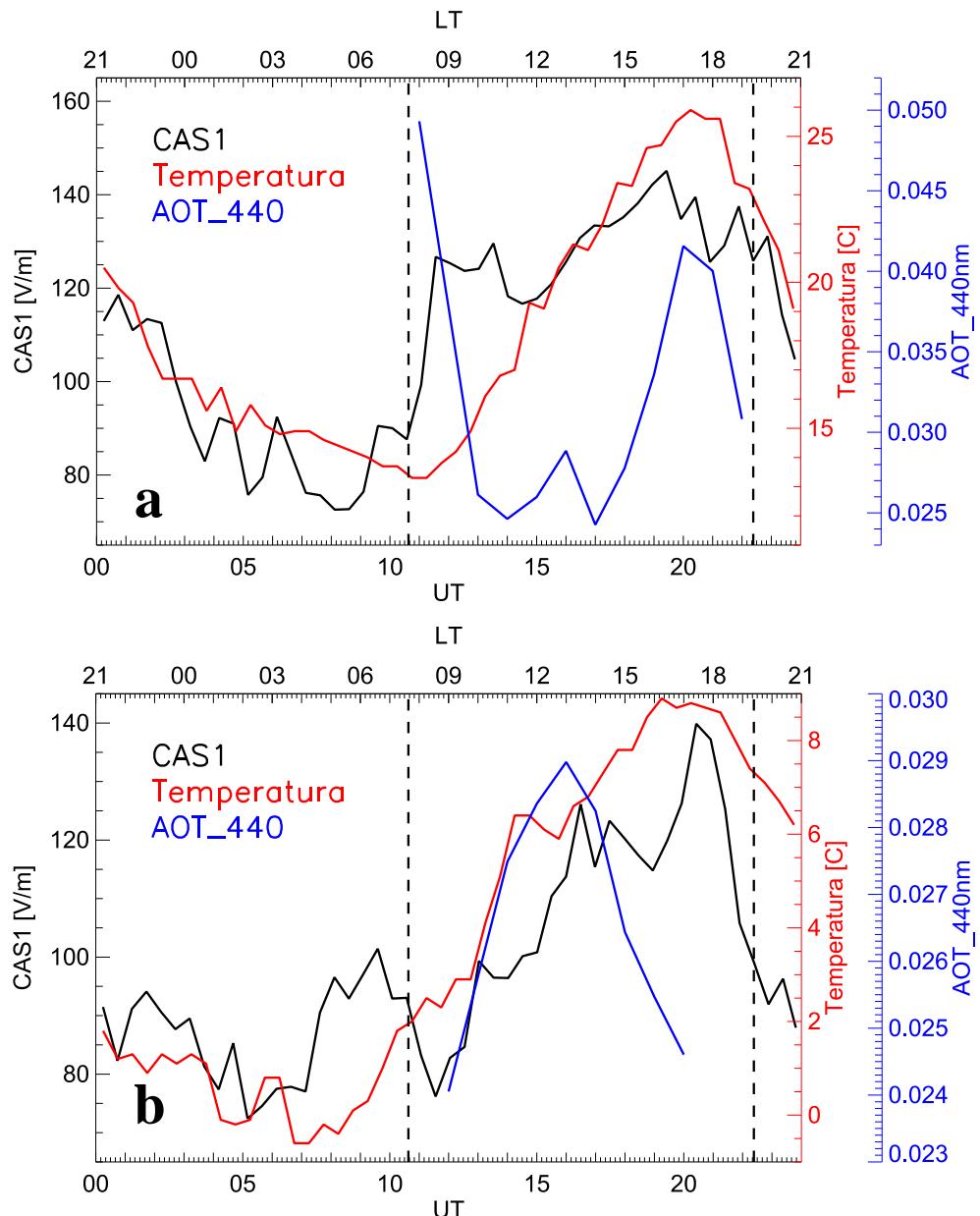


Figura 42: Comparação entre a variação do campo elétrico atmosférico (curva preta), espessura óptica de aerossóis (AOT, comprimento de onda 440 nm, curva azul) e temperatura (curva vermelha) para os dias 31 de janeiro (a) e 23 de junho de 2011 (b).

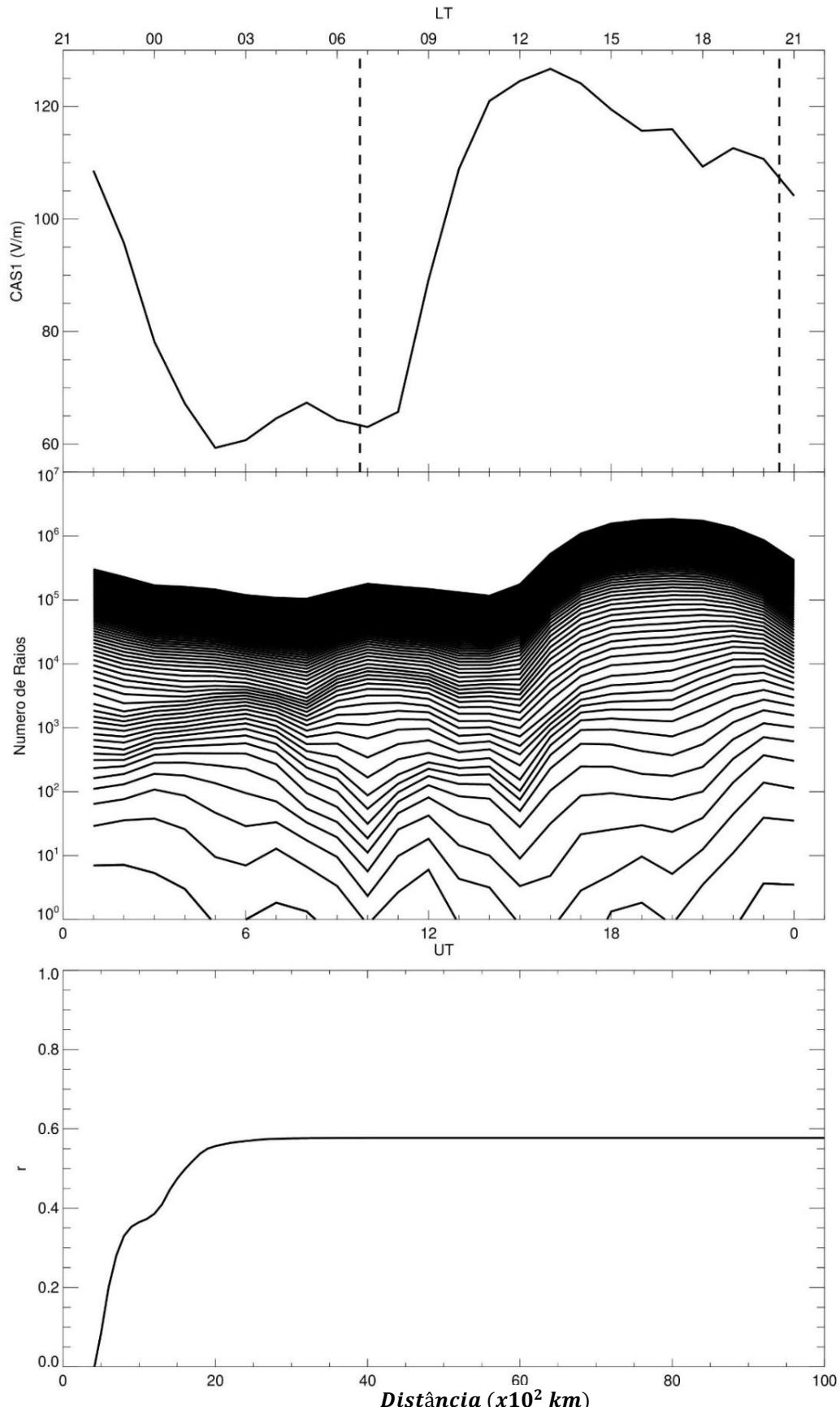


Figura 43: Painel superior: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico para fevereiro de 2012. Painel do meio: Variação diária média mensal do número de ocorrências de raios para o mesmo mês para distâncias entre 0 até 10 000 km. Painel inferior: Coeficiente de correlação linear entre ambas as curvas médias para todas as distâncias.

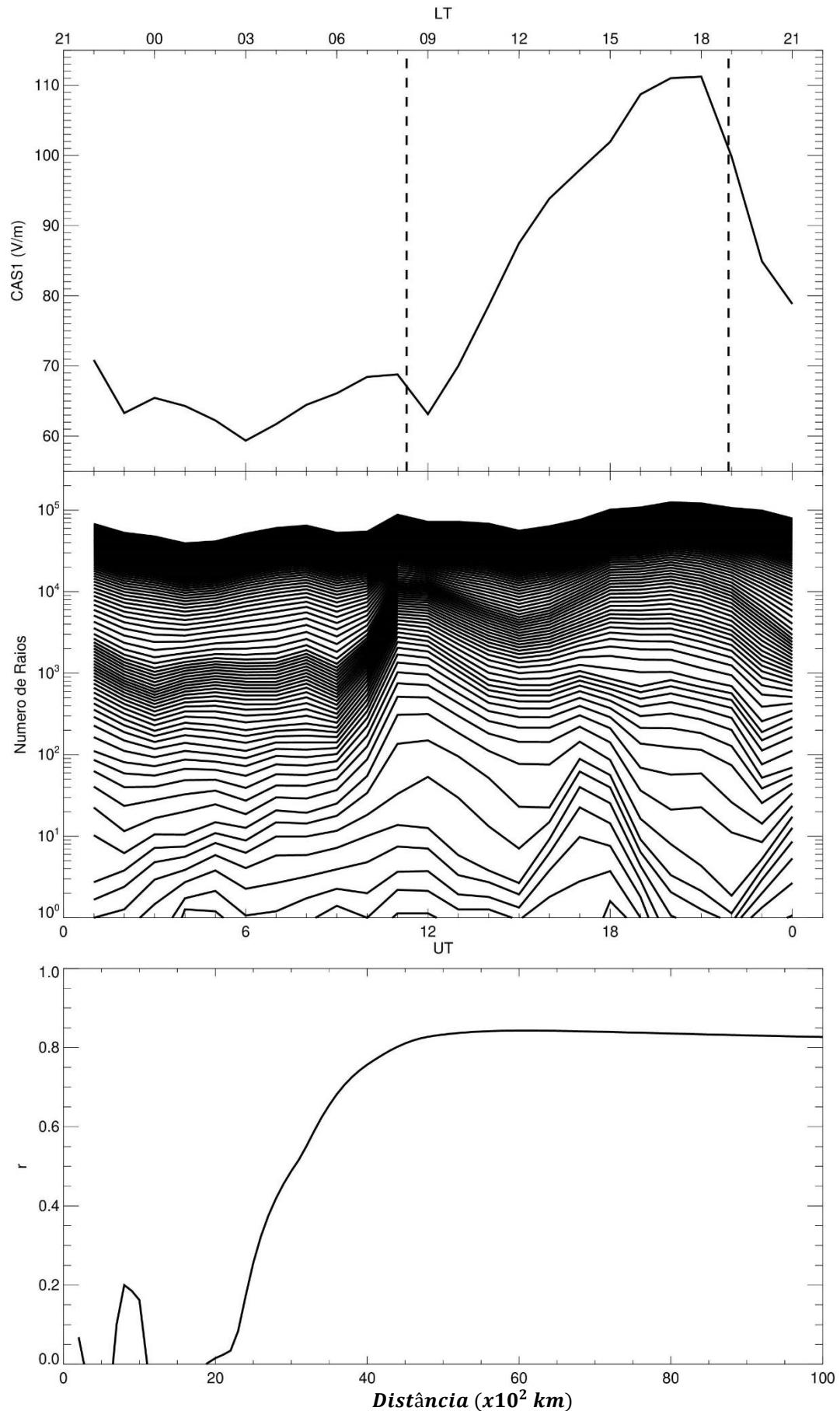


Figura 44: Como na figura 43 apenas para o mês de julho de 2012.

As figuras 43 e 44 mostram no painel superior a curva padrão mensal do CEA para os meses de fevereiro e julho de 2012, respectivamente. No painel do meio, para ambas as figuras, mostra-se as curvas diárias médias para o número de raios (NR) para as distâncias desde 0 até 10.000 km. A curva média para o NR foi calculada utilizando os mesmos dias com que foi calculada a curva padrão do CEA. Nota-se que quando incrementa a distância o número de ocorrência de raios incrementa. No painel inferior se mostra o coeficiente de correlação linear, r , entre as curvas padrão do CEA e as curvas diárias médias do NR para todas as distâncias. A figura 43 mostra que r incrementa quando incrementa a distância. A partir de 2000 km r encontra seu valor máximo ($r = 0,6$) e depois se mantém constante. O mesmo é observado na figura 44, porém, r alcança seu valor máximo a partir de 4000 km ($r = 0,8$). A explicação de porquê os valores de r incrementam e alcançam seu valor máximo a diferentes distâncias é porquê no mês de fevereiro é verão no América do Sul e as tempestades elétricas acontecem mais perto do observatório de CASLEO, porém, no mês de julho é inverno e as tempestades acontecem mais longe, por isso a diferença nas distâncias. Também, nota-se do painel do meio para ambas as figuras que o número de ocorrência de raios é maior no verão que no inverno. Os valores de $r = 0,6$ para fevereiro e $r = 0,8$ para julho mostram que no mês de inverno se obtém uma maior correlação que no verão. Além disso, é importante notar que a curva padrão mensal de fevereiro apresenta uma protuberância entre as 10-13 LT, diferente da curva de Carnegie (ver figura 2). No entanto, para a curva padrão de julho a protuberância desaparece e a forma da curva é semelhante com a curva de Carnegie. Acredita-se que essa protuberância é produzidas pelos efeitos de turbulência e/ou convecção, como já explicado anteriormente. Realizando a mesma análise para todo o ano 2012, encontrou- se que os valores de r são maiores no inverno que no verão (figura 45), confirmando nossa hipótese inicial de que efeitos convectivos são maiores no CEA de tempo bom durante os meses de verão comparado com os meses de inverno.

Adicionalmente, a figura 46 mostra a variação padrão sazonal do CEA para a estação CAS1 (curva sólida) comparada com a curva de Carnegie (curva tracejada) em termos do percentual da média. Se observa que a curva de Carnegie apresenta uma variação percentual de $\sim 35\%$. Por outro lado, a variação é maior para CAS1, como já mostrado na figura 41. Porém, na análise sazonal se observa que a variação é maior no verão ($\sim 68\%$) e menor no inverno ($\sim 59\%$). Também se observa que o coeficiente de correlação é menor no verão ($R = 0,89$) do que no inverno ($R = 0,97$). Isso mostra, como já explicado anteriormente, que efeitos locais, como turbulência e/ou convecção, produzem um incremento no CEA de tempo bom.

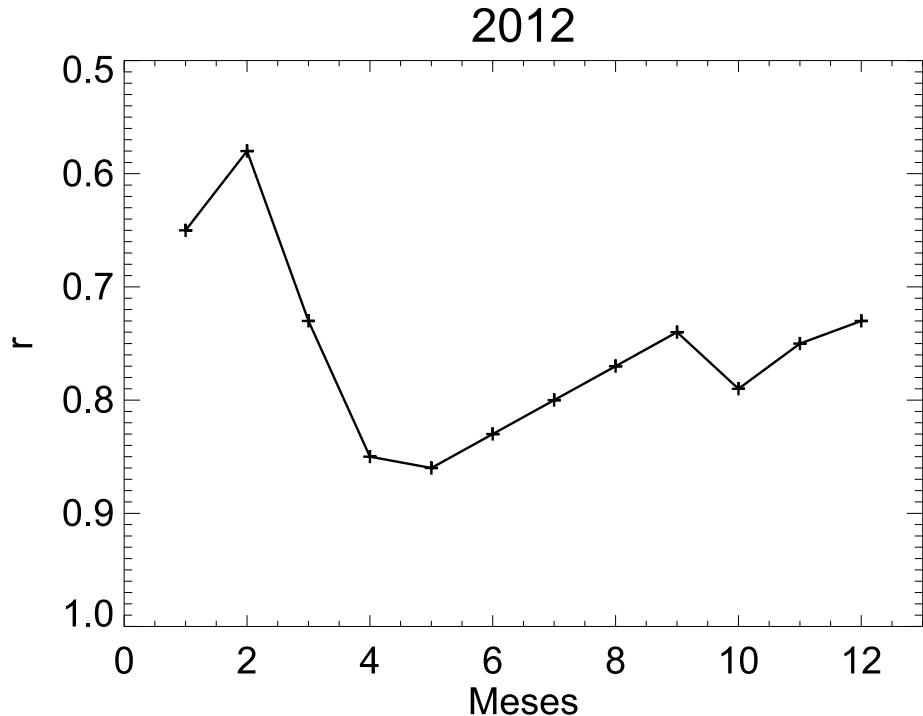


Figura 45: Coeficiente de correlação linear entre as curvas médias do campo elétrico atmosférico e o número de raios (distância maior que 3000 km).

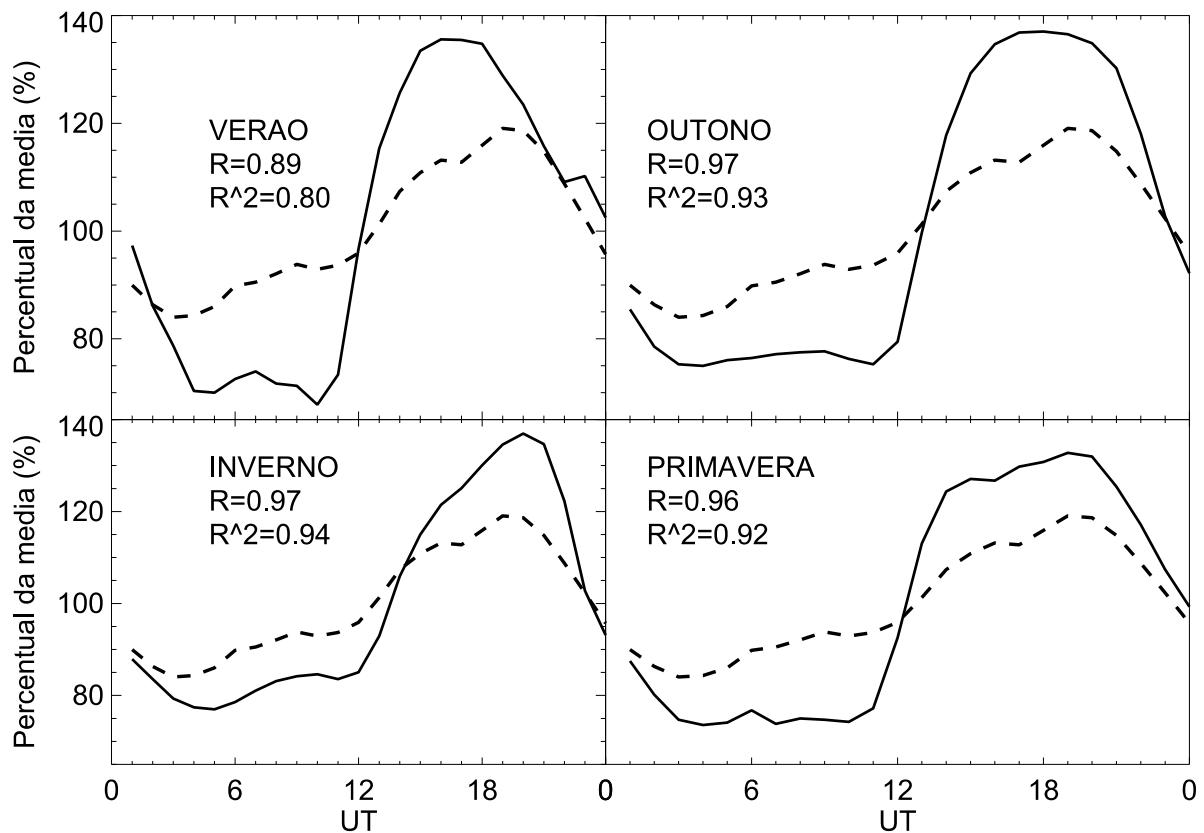


Figura 46: Variação diária média sazonal do campo elétrico atmosférico (curva contínua) comparada com a curva de Carnegie (curva tracejada) em termos do percentual da média.

É importante destacar que os efeitos produzidos pela turbulência/convecção no CEA estão presentes continuamente cada dia, e, portanto, na curva padrão mensal, sazonal ou anual. Perturbações diárias no CEA associadas a fenômenos geofísicos externos podem ser calculadas mediante os desvios entre o CEA no dia do evento e sua curva padrão mensal/sazonal/anual.

Independente da variação percentual da média observada entre a curva de Carnegie e as curvas padrões do CEA da rede AFINSA a semelhança entre elas é evidente. Na seguinte discussão, principal ênfase será colocado na comparação da forma entre as curvas padrões da rede com a curva de Carnegie. Para isso, os valores da curva padrão foram normalizados da seguinte forma:

$$EN_i = \frac{E_i - \min(E)}{\max(E) - \min(E)} \quad (12)$$

onde: E_i são os valores da curva padrão do CEA, $\min(E)$ e $\max(E)$ são os valores mínimo e máximo da curva padrão, respectivamente, e EN_i são os valores da curva padrão normalizados. As estações com curvas padrão anuais para muitos anos foram primeiro normalizadas para cada ano e depois foi calculada uma única curva padrão anual. A figura 47 mostra os resultados obtidos com uma resolução temporal de 1 hora. A curva chamada REGIONAL representa a curva média para todas as curvas padrões para todas as estações da rede AFINSA. Adicionalmente, mostra-se no eixo vertical superior a escala horária local (LT) e as linhas tracejadas verticais indicam o nascer e pôr do sol, respectivamente. Os coeficientes de regressão linear, r , entre as curvas padrão da rede e Carnegie, estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficiente de regressão linear, r , entre as curvas médias anuais para cada estação da rede AFINSA e a curva de Carnegie.

| | CAS1 | CAS2 | PLO | ICA | ROR | HYO | CGR1 | CGR2 | SPA | REGIONAL |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| <i>r</i> | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,88 | 0,82 | 0,68 | 0,97 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se da figura 47 a grande semelhança entre cada uma das curvas padrão da rede AFINSA com a curva de Carnegie, evidenciado pelo alto valor do coeficiente de correlação, r , (tabela 3). Especificamente, a grande semelhança é entre as 12 – 24 UT, o qual indica que nesse período de tempo as estações da rede apresentam um efeito global, desde que a curva de Carnegie reflete nesse horário os picos de amplitude das tempestades elétricas para África e

América. No entanto, as estações HYO e SPA apresentam um pico máximo ao redor das 10 LT. Essas diferenças significativas serão discutidas mais adiante.

Medições diárias do CEA na superfície terrestre são geralmente diferentes quando comparadas com a curva de Carnegie devido a fenômenos locais, tais como poluição e fumaça. Adicionalmente, medições realizadas em diferentes locais não mostram os mesmos tempos de mínimo e máximo observados na curva de Carnegie (Yeboah-Amankwah, 1989; Kamra et al., 1994; Harrison, 2003; Kumar et al., 2009; Guha et al., 2010; De et al., 2013). No entanto, em alguns poucos casos uma boa correlação é encontrada (Israelsson e Tammet, 2001; Harrison, 2003; Märck e Harrison, 2003). A grande semelhança entre as curvas padrão da rede AFINSA e a curva de Carnegie, entre as 12-24 UT (exceto as estações HYO e SPA), mostra que as curvas padrão da rede AFINSA podem ser utilizadas para o estudo de efeitos globais no circuito elétrico atmosférico global.

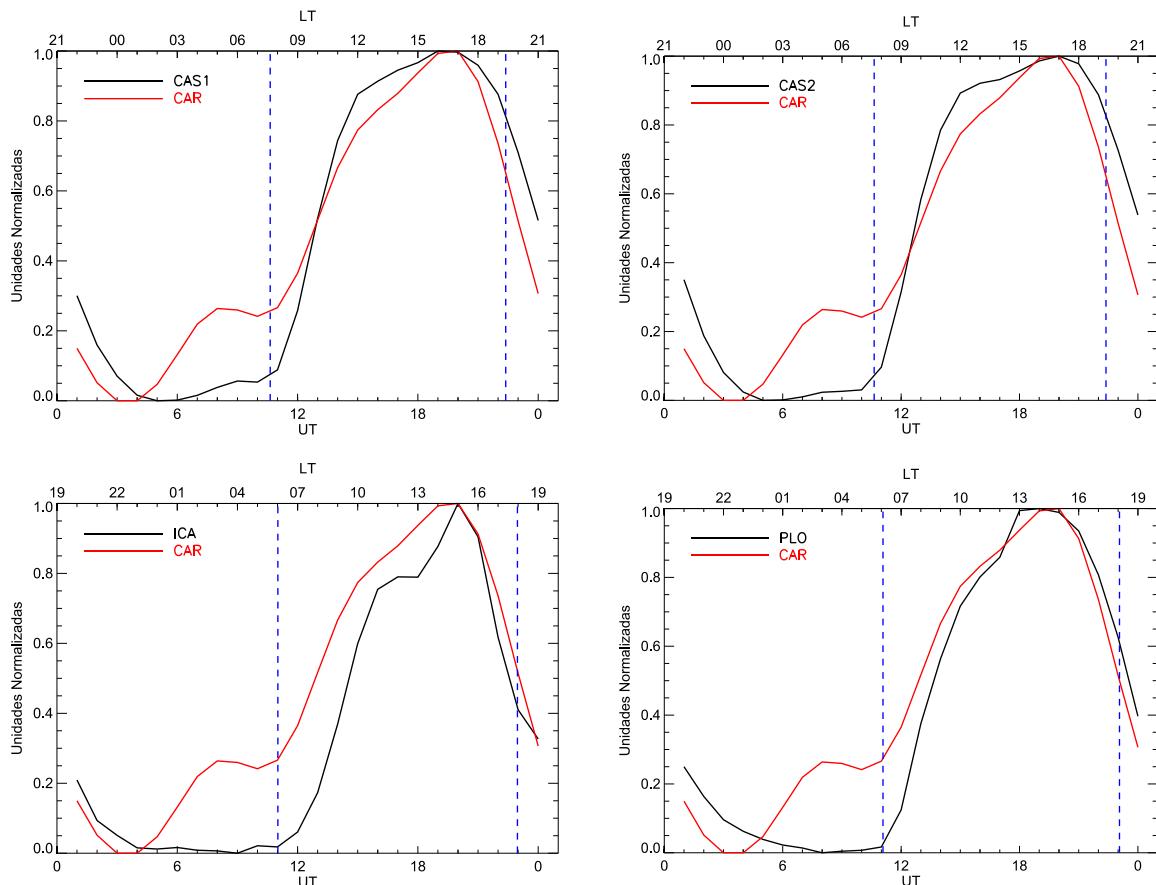


Figura 47: Variação diária média anual normalizada para o CEA de dias de tempo bom para as estações da rede AFINSA (linha preta) comparando com a curva de Carnegie (linha vermelha). O horário local para cada estação é indicado no eixo vertical superior. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol, respectivamente.

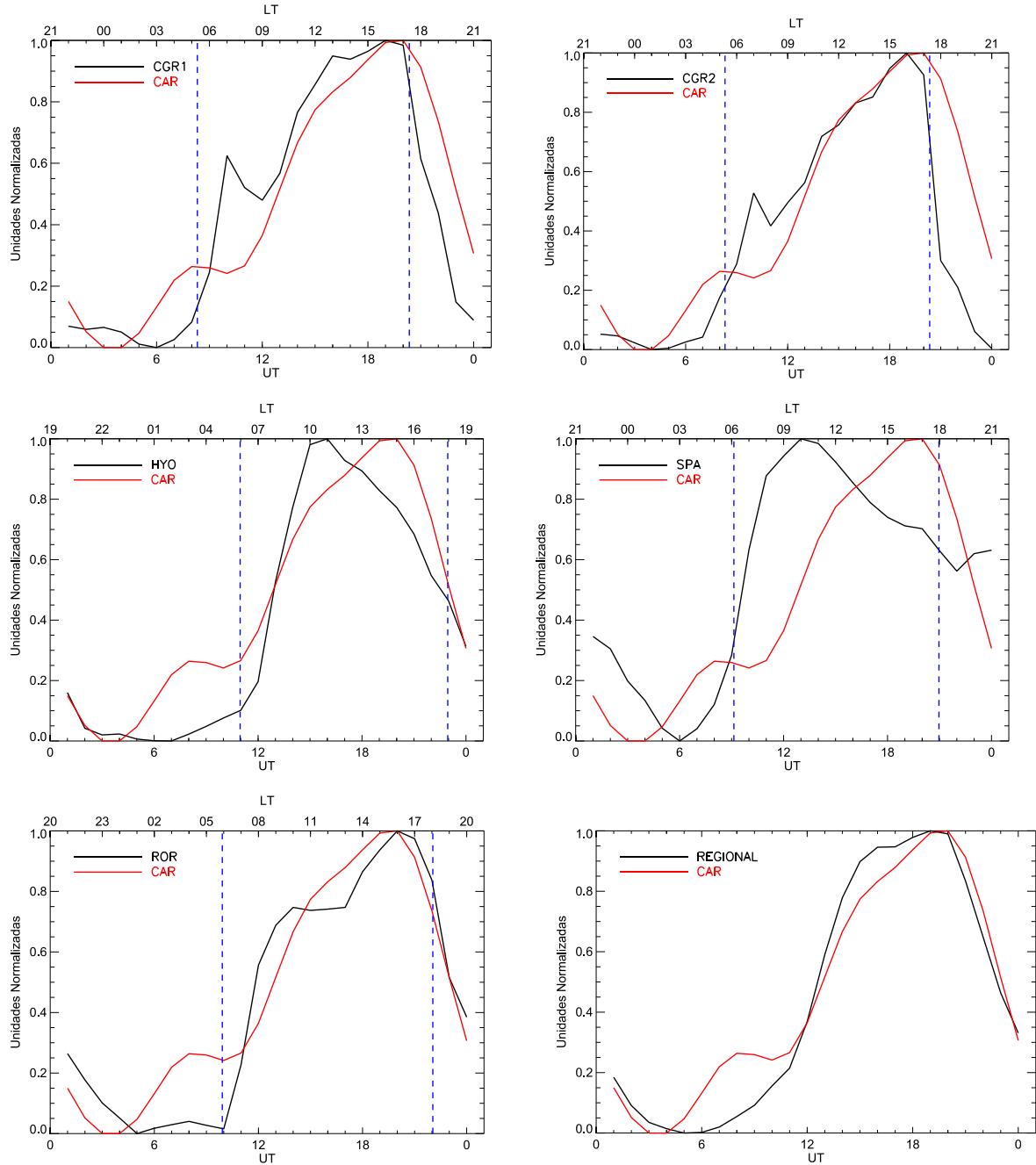


Figura 47: Continuação.

Por outro lado, têm uma diferença significativa entre as curvas padrão e a curva de Carnegie entre as 00 – 11 UT. As curvas padrão da rede AFINSA não apresentam o pico característico das tempestades na Ásia. Uma possível explicação para entender essa discrepância é que o número de ocorrências de raios no sistema asiático, parte do sistema gerador do CEAG e observado na curva de Carnegie às 08-10 UT, não contribui de forma significativa em nossas medições do CEA. Isso, devido a longa distância entre esse sistema gerador e os sensores EFM da rede AFINSA. Por exemplo, medições do CEA realizadas sobre o Oceano Índico mostraram uma tendência para efeitos maiores no CEA devido à atividade de tempestades sobre Ásia-

Austrália e África-Europa e efeitos fracos para tempestades distantes ocorrendo em América (Kamra et al., 1994). O mesmo efeito foi encontrado para medições de densidade de corrente ar-Terra (Anderson, 1969). Adicionalmente, efeitos de turbulência/convecção produzem um aumento no campo elétrico atmosférico de tempo bom. Da figura 41, pode-se observar que esses efeitos acontecem entre aproximadamente as 12-24 UT. É importante notar que esse excesso no CEA não perturba a forma do CEA quando comparada com a curva de Carnegie (12-24 UT). Porém, sim pode obscurecer um efeito global entre as 00-12 UT. Da figura 46, observa-se do gráfico do inverno que quando se têm menor efeito da atividade convectiva a curva padrão do CEA têm evidencia de um incremento dos valores de CEA no horário entre as 08-10 UT, correspondente ao sistema gerador asiático, evidenciando assim um possível obscurecimento do pico asiático devido a efeitos locais.

É importante dizer que apesar das diferenças encontradas entre as curvas padrão da rede AFINSA com a curva de Carnegie, isso não impede fazer análises adicionais de fenômenos externos, por exemplo solares ou sísmicos. O importante é obter curvas padrão confiáveis do CEA em dias de tempo bom para estação.

De regresso à discussão das curvas padrão para as estações SPA e HYO é importante disser que os sensores EFM estão instaladas no centro de grandes cidades e, portanto, podem sofrer influência da poluição local. Por exemplo, a estação SPA está localizada no centro da cidade de São Paulo e o pico máximo encontrado às 13 UT (10 LT) pode ser devido a poluição local gerada pelo trânsito de veículos. A figura 48a mostra a variação diária do campo elétrico atmosférico para três terças-feiras (25/04, 16/05 e 23/05/2017), também se mostra a variação diária média de 10 dias de tempo bom escolhidos durante fim de semana. Foram escolhidos dias de terça-feira supondo que esses dias têm maior poluição produzida pelo trânsito de veículos. Observa-se um aumento do CEA entre às 7-13 LT para os dias de terça-feira quando comparados com a curva média do fim de semana. Adicionalmente, a figura 48b mostra a variação diária média do material particulado (10 micrômetro) para um total de 11 dias. Também, observa-se um aumento entre às 7-12 LT, com um pico máximo as 10 LT. Adicionalmente, observa-se um aumento entre às 21-00 LT. O pico máximo as 10 LT e o aumento entre as 21-24 LT é também observado na curva diária da média anual do CEA (figura 47), confirmando que a poluição local têm efeitos significativos na variação diária do CEA registrado na estação SPA. Pode-se sugerir que para futuros cálculos de curva padrão para a estação SPA só sejam escolhidos dias de fim de semana quando a poluição devido ao trânsito

veicular é menor.

Se o trânsito veicular afeta a variação diária do CEA então é esperado uma semelhança na variação a longo prazo. Na figura 49 mostra-se nos painéis superiores, a variação diária do monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e material particulado (10 micrômetros), respectivamente. Esses parâmetros foram registrados na estação chamada “Cerqueira Cesar” afastada aproximadamente 2 km da estação SPA (<https://servicos.cetesb.sp.gov.br/qa/>). No painel inferior se mostra a variação diária do campo elétrico atmosférico para o período entre 11 de maio até 04 de junho de 2018. As linhas verticais tracejadas indicam o período em que teve uma greve de caminhoneiros em São Paulo (21-31 de maio de 2018). Observa-se uma grande semelhança na variação diária entre o CEA e os outros parâmetros indicativos da poluição local, com um coeficiente de correlação linear, $r \sim 0,7$. Esse resultado suporta estudos prévios que propõem que variações do CEA podem ser utilizadas como indicativos de poluição local (Harrison e Aplin, 2002; Harrison et al., 2006).

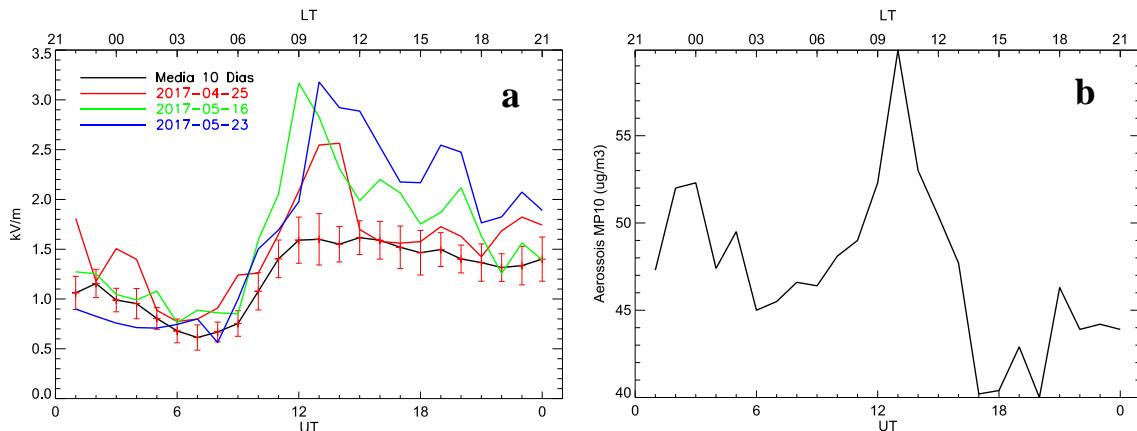


Figura 48: Variação diária do campo elétrico atmosférico para uma média de 10 dias de tempo bom (curva preta, escolhendo dias durante fim de semana), e durante três dias de terça feira (curvas vermelha, verde e azul). As barras de erro correspondem 1σ (a). Variação diária média do material particulado (10 micrômetros) para um período de 11 dias (b).

A estação HYO está localizada perto da grande cidade de Huancayo (Junin, Perú). Estudos mostraram que a poluição local é produzida em sua maioria pelo trânsito veicular (Suarez et al., 2017). Tendo isso em conta, pode-se supor que o pico máximo da curva padrão anual da estação HYO (figura 47) observado às 10 LT é devido ao trânsito veicular.

Devido à influência do trânsito veicular nas estações SPA e HYO, elas não foram consideradas no cálculo da curva média REGIONAL. A figura 50 mostra a comparação entre a curva

REGIONAL e a curva de Carnegie ($r = 0,98$).

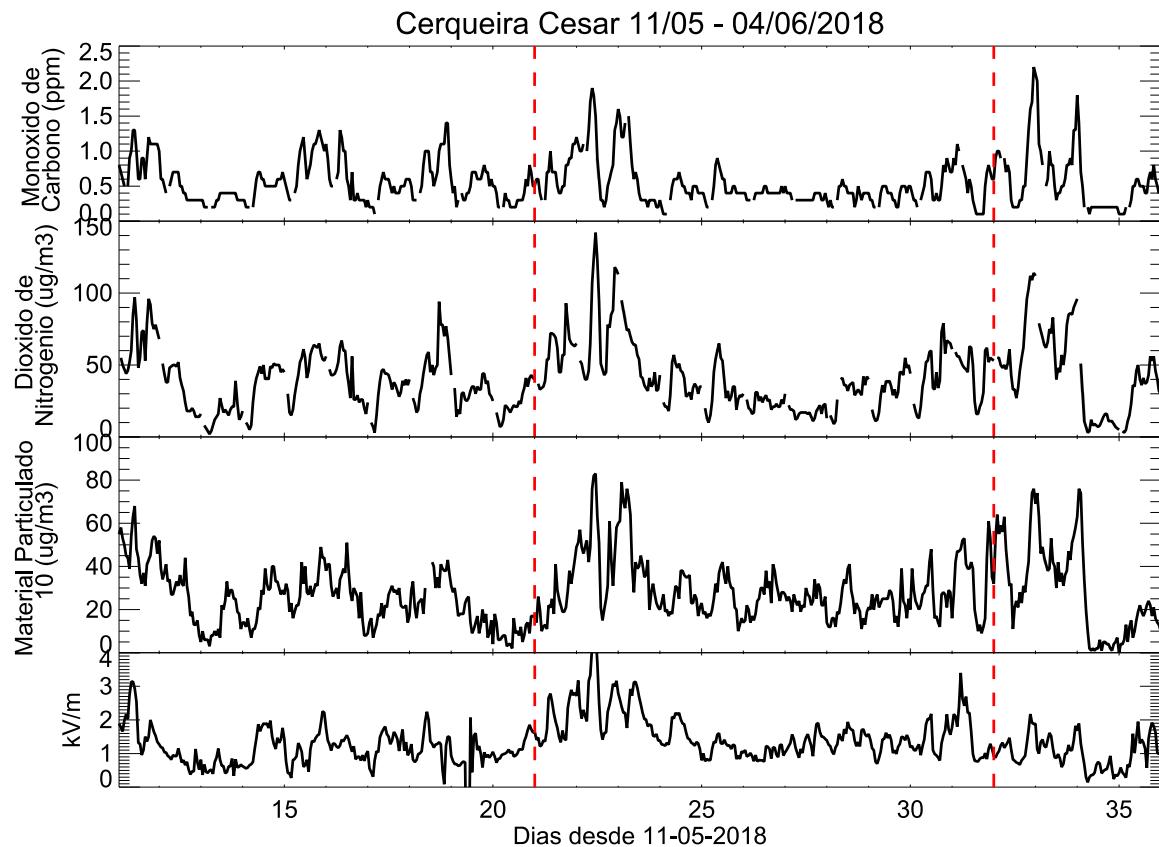


Figura 49: Variação diária do monóxido de carbono (primeiro painel), dióxido de nitrogênio (segundo painel) e material particulado (10 micrômetros, terceiro painel). No painel inferior mostra-se a variação diária do campo elétrico atmosférico para a estação SPA. O período de tempo corresponde a 11 de maio até 04 de junho de 2018.

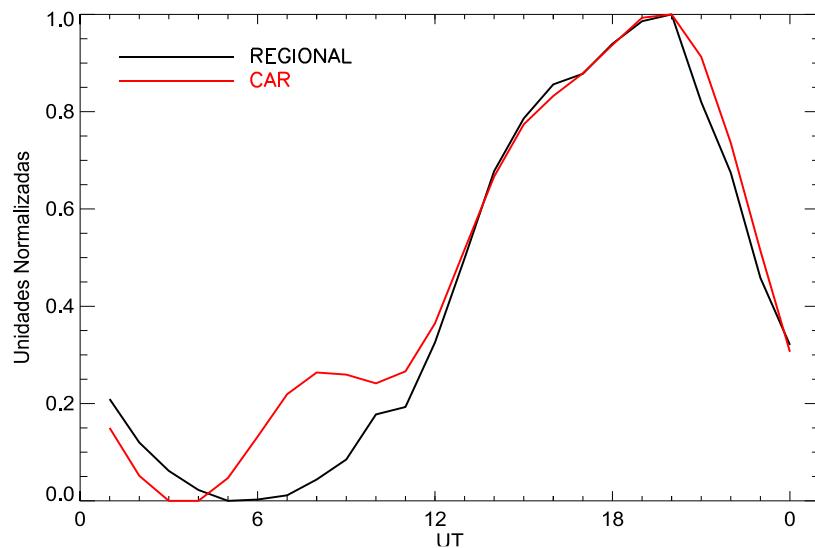


Figura 50: Como mostrado na figura 47 para a curva chamada REGIONAL sem as estações SPA e HYO.

5.3 EFEITOS DE AEROSSÓIS

Para analisar a influência dos aerossóis no campo elétrico atmosférico a longo prazo comparou-se as medidas registradas no CASLEO (Argentina) pelas redes AERONET e AFINSA. A figura 51 mostra a variação média mensal da espessura óptica de aerossóis (EOA) registrada pela rede AERONET para diferentes comprimentos de onda (AOT_1020 para um comprimento de onda de 1020 nm e assim por diante). Adicionalmente, mostra-se o valor médio das curvas padrões para a estação CAS1 (curva preta tracejada). O período de dados registrados é entre janeiro de 2011 até julho de 2014. Observa-se uma semelhança na variação sazonal, i.e., valores baixos entre os meses de maio-julho e valores altos entre dezembro-janeiro para os aerossóis e o CEA. Isso se cumpre especialmente para os comprimentos de onda menores. A variação sazonal encontrada é oposta à variação sazonal global das tempestades elétricas (valores altos entre os meses de junho-julho e valores baixos entre os meses de dezembro-janeiro), o que pode indicar que os aerossóis estão obscurecendo um efeito global no campo elétrico. Isso já foi mencionado por outros autores, entre eles Adelman e Williams (1996). Na presente subseção se pretende remover a influência dos aerossóis no CEA de tempo bom.

Como discutido na subseção anterior o CEA de tempo bom registrado pela estação CAS1 é afetado pela influência de aerossóis principalmente devido à turbulência durante o aumento da temperatura logo após o nascer do sol. Adicionalmente, aerossóis continentais, por exemplo poeira, podem afetar o CEA. Efeitos da poluição local, como o trânsito veicular, pode ser excluído devido à estação CAS1 estar afastada da cidade mais próxima. Segundo à equação 9 (subseção 2.6) existe uma correlação linear entre o CEA e os aerossóis, onde o CEA depende linearmente da concentração em massa dos aerossóis. No presente trabalho se considerará a espessura óptica dos aerossóis (EOA) como uma medição indireta da concentração em massa. Para uma análise mais detalhada se realizou a correlação linear entre ambas as variáveis tendo em conta condições meteorológicas de tempo bom. Para isso foi utilizado uma estação meteorológica afastada 1,5 km da estação CAS1. Os valores do CEA e EOA foram correlacionados em dias que não tinham precipitação e com velocidade de vento < 8 m/s. A figura 52 mostra as médias diárias dos valores do CEA versus a EOA, para os diferentes comprimentos de onda. Também, na figura mostra-se seus respectivos coeficientes de correlação linear, r , entre ambas as variáveis. Pode-se observar que os valores do coeficiente de correlação linear são maiores que 0,5 para todos os comprimentos de onda.

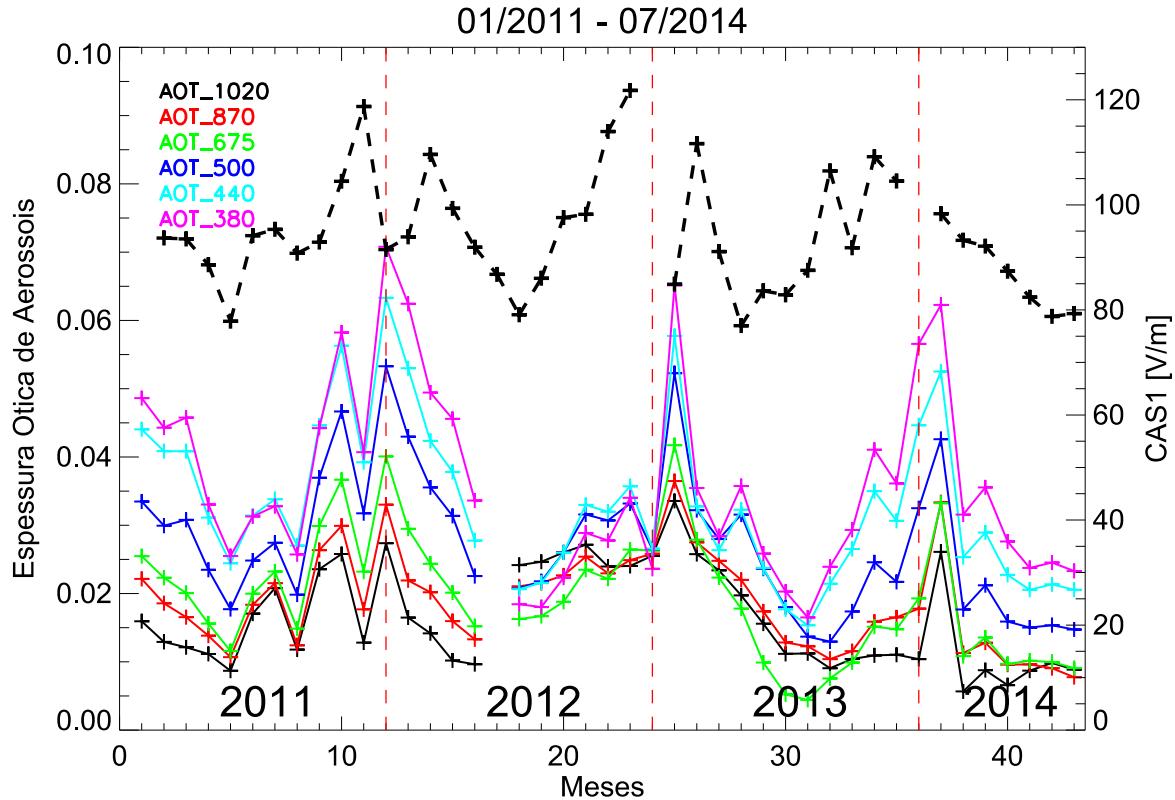


Figura 51: Variação média mensal da Espessura Óptica de Aerossóis para diferentes comprimentos de onda registrados em CASLEO (período janeiro 2011 – julho 2014). Também mostra-se a variação média mensal do campo elétrico atmosférico de tempo bom para CAS1 (curva tracejada).

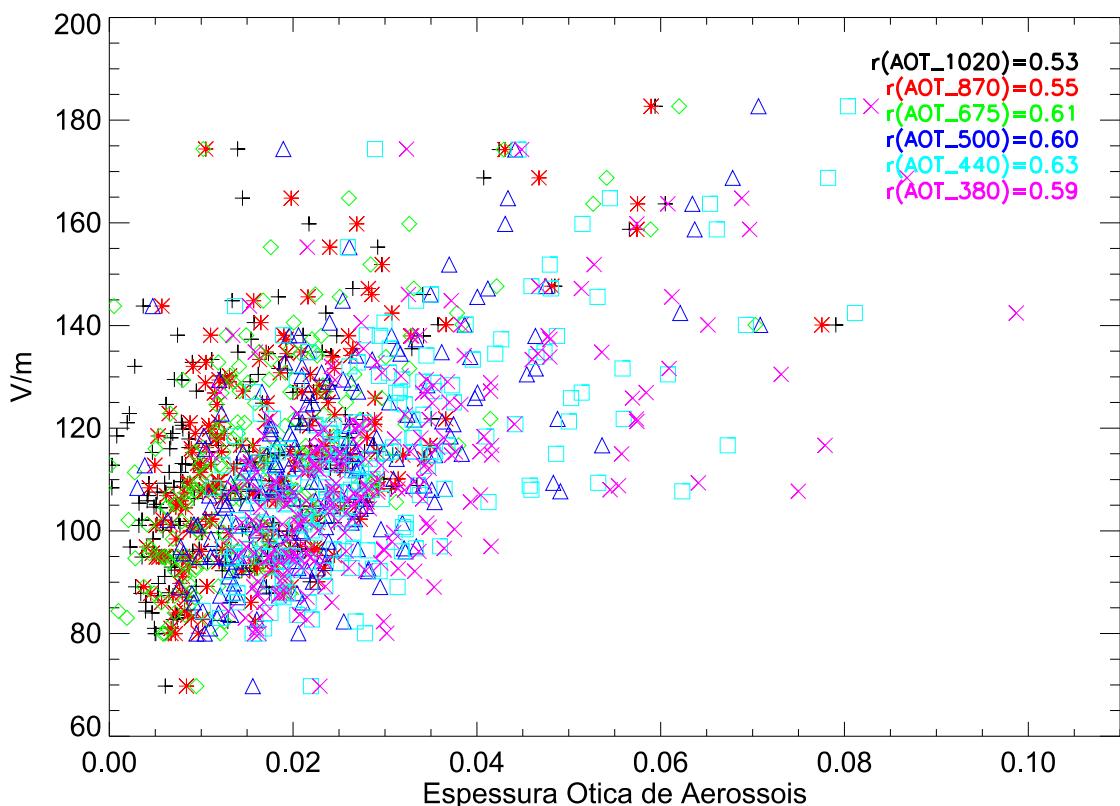


Figura 52: Valores diários do CEA (CAS1) versus EOA em condições de tempo bom, para diferentes comprimentos de onda.

Como mencionado na subseção 2.6 o CEA total pode ser considerado como: $E_T = E_A + E_0$, onde: E_T é o CEA total, E_A é a componente do CEA devido aos aerossóis e E_0 é o CEA sem presença de aerossóis. Da equação 9 se tem que $E_A = kM$, onde k é constante e M é a concentração em massa dos aerossóis. A figura 53 mostra a correlação linear entre os valores do CEA e a EOA para o comprimento de onda de 500 nm com seu respectivo ajuste linear (linha vermelha). Encontra-se para o CEA livre de aerossóis $E_0 = 89,1 \text{ V/m}$ e um valor de $k = 974,4$. O mesmo procedimento foi realizado para cada comprimento de onda. Na figura 54 mostra-se a variação média mensal do CEA depois de remover a influência dos aerossóis para cada comprimento de onda por separado (linha tracejada). A linha sólida é a mesma variação depois de aplicar uma média móvel de 3 meses. As linhas verticais indicam o início de cada ano.

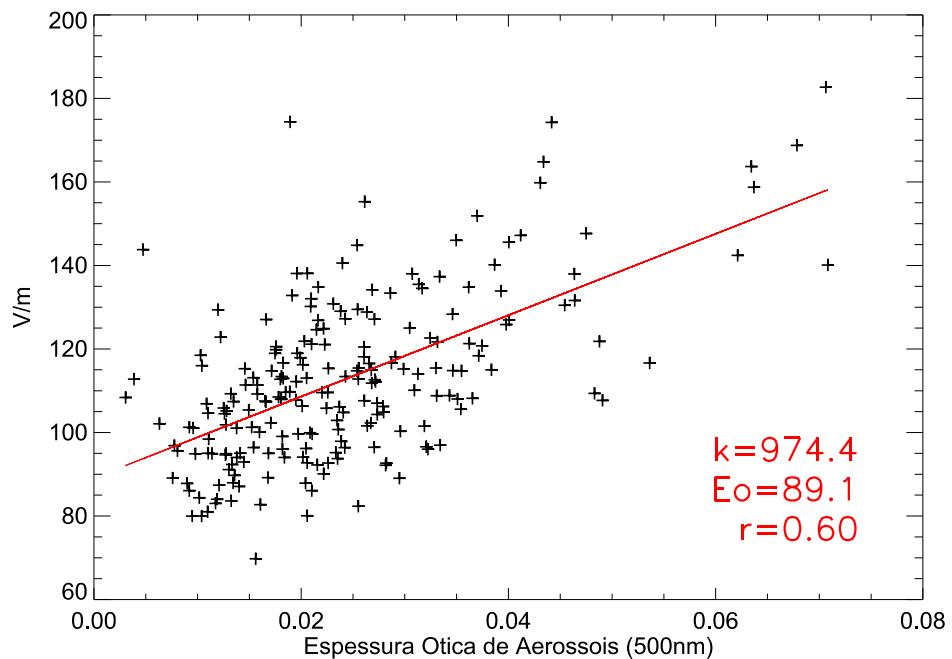


Figura 53: Correlação linear entre as médias diárias do CEA (CAS1) e a EOA (500 nm) para condições de tempo bom.

Para comparar a variação sazonal do CEA, depois de remover efeitos de aerossóis, com a variação sazonal das tempestades elétricas foram utilizados dados da rede STARNET. A figura 55 mostra a comparação entre a variação média mensal para o número de ocorrências de raios (curva azul, com uma média móvel de 3 meses, detectado para uma distância entre 3.000-18.000 km afastado da estação CAS1) com a variação média mensal do CEA de tempo bom (curva preta, média móvel de 3 meses). Para efeitos de comparação ambas as curvas foram normalizadas por seu valor máximo. O período analisado foi entre janeiro de 2011 até dezembro de 2013. Observa-se que para comprimentos de onda pequenos a correlação entre ambos

parâmetros é melhor. Isto quer dizer que depois de corrigir os valores do CEA pela influência dos aerossóis pode-se observar uma semelhança entre a variação sazonal do CEA com a variação sazonal das tempestades elétricas evidenciando assim que os aerossóis podem obscurecer o efeito global das tempestades elétricas nas medições do CEA realizadas em continente, como já mencionado por outros autores (Adlerman e Williams, 1996).

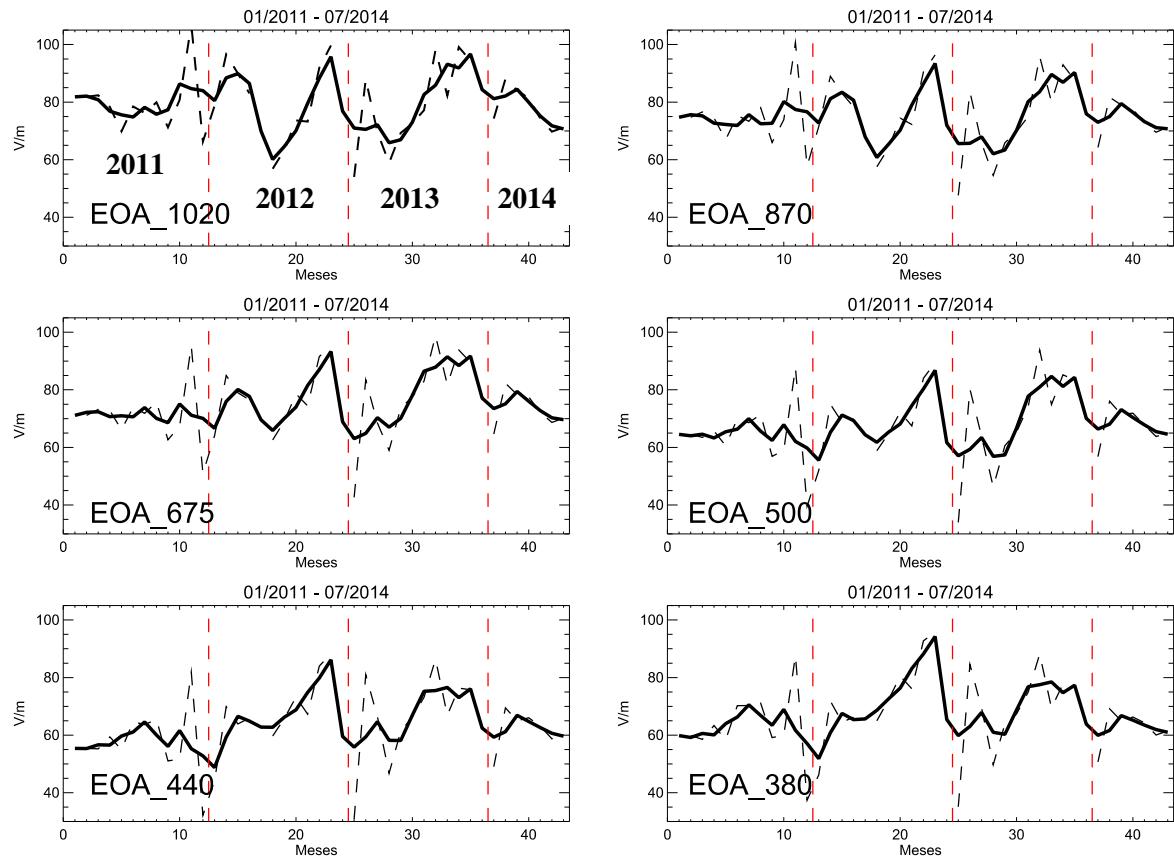


Figura 54: Valores médios mensais do CEA (CAS1) corregidos pela influência de aerossóis (linha tracejada) para cada um dos comprimentos de onda. A linha contínua é uma média móvel de 3 meses.

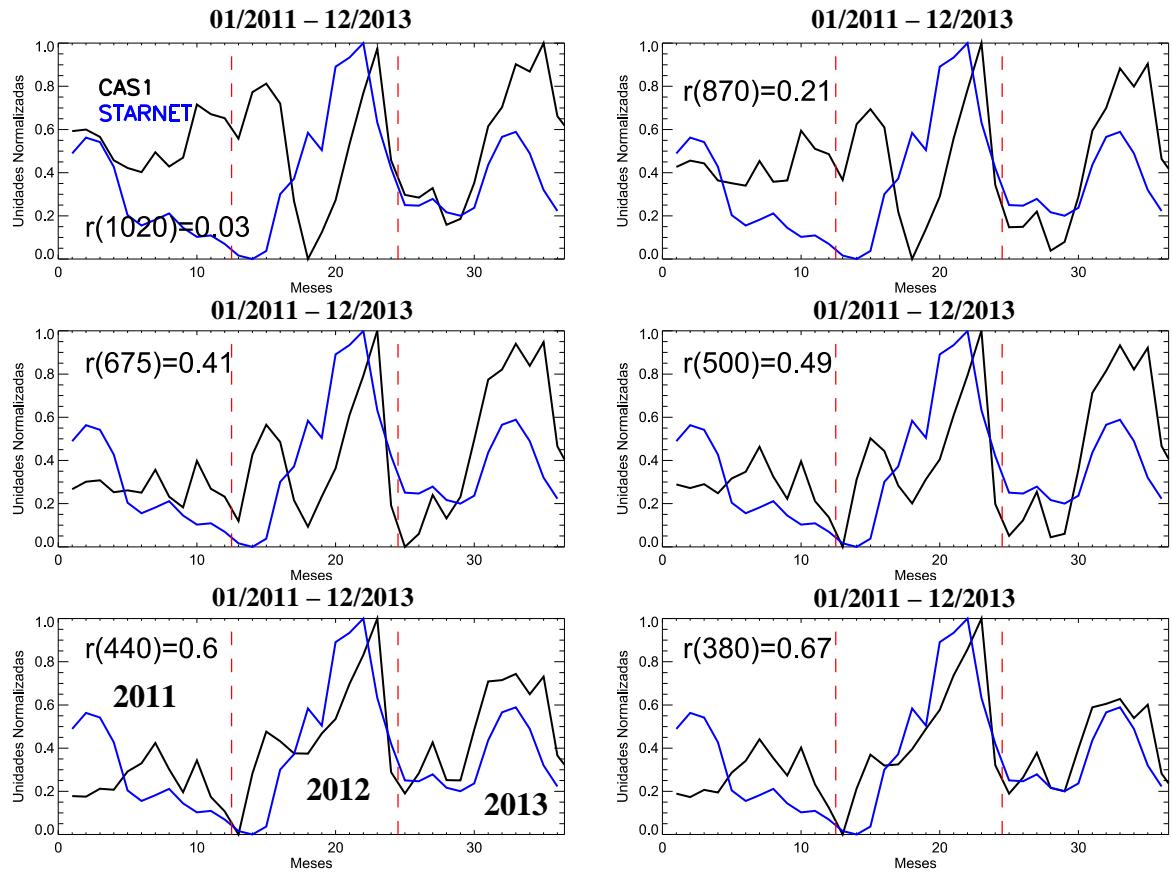


Figura 55: Variação média mensal do número de raios (NR), registradas para uma área entre 3000 até 18000 km afastada de CAS1 (período entre janeiro de 2008 até dezembro de 2013, cor azul) com uma média móvel de 3 pontos. A curva preta é a variação média mensal do CEA de tempo (média móvel de 3 pontos). Ambas as curvas foram normalizadas [0,1].

5.4 EFEITOS SOLARES TERRESTRES

Um objetivo importante desta tese foi analisar os possíveis efeitos de fenômenos solares (especificamente explosões solares, eventos de prótons solares e decréscimos Forbush) na variação do campo elétrico atmosférico de tempo bom. Para analisar os efeitos solares foram utilizados os dados da estação localizada no CASLEO devido a não ter poluição local. Por exemplo as figuras 56 e 57 mostram a variação diária do campo elétrico atmosférico durante uma intensa explosão solar e um intenso evento de prótons, respectivamente. A figura 56 mostra a comparação entre o fluxo de raios X e as variações do CEA obtidas com CAS1 e CAS2 durante o dia da explosão solar de 29 de outubro de 2013. No painel superior se mostra o fluxo de raios X nas faixas de 0,5 - 4 Angstrom (\AA) (linha pontilhada de cor vermelha) e 1-8 \AA (linha sólida de cor preta). No painel do meio se mostra a variação diária do CEA para a estação CAS1 utilizando-se uma constante de tempo de 10 minutos. A curva preta representa a variação para o dia do evento e a curva vermelha é a curva padrão mensal com barras de erro de 1σ . No painel inferior se mostra o mesmo que no painel do meio apenas para a estação CAS2. Por outro lado, a figura 57 mostra a comparação entre o fluxo de prótons e as variações do CEA obtidas com CAS1 e CAS2 durante o dia do evento de prótons de 03 de março de 2012. No painel superior se mostra o fluxo de prótons nos canais $\geq 10 \text{ MeV}$ (linha vermelha), $\geq 50 \text{ MeV}$ (linha azul) e $\geq 100 \text{ MeV}$ (linha verde). No painel do meio e inferior se mostra a variação do CEA para o dia do evento solar seguindo o descrito na figura 56.

Como é observado das figuras 56 e 57, não são encontrados efeitos significativos na variação diária do campo elétrico atmosférico durante esses eventos solares. Da figura 56, a explosão solar do dia 29 de outubro de 2013, foi um evento intenso X 2,3 (segundo a classificação GOES), iniciou às 21:42 UT, com o pico máximo em torno das 21:54 UT e final às 22:01 UT. Nesses horários não é observada uma variação significativa nos valores registrados do CEA. Por outro lado, da figura 57, o início do aumento do fluxo de prótons para o canal de $>100 \text{ MeV}$ começa às 02 UT e se mantém ao longo do dia. Os níveis de fluxo se mantiveram altos durante todo o dia para os três canais. Observa-se um aumento do valor do CEA, porém não muito significante quando comparado com as barras de erro de 1σ da curva padrão, nas duas estações CAS1e CAS2, em torno das 02:30 UT, com uma duração aproximada de 2 horas.

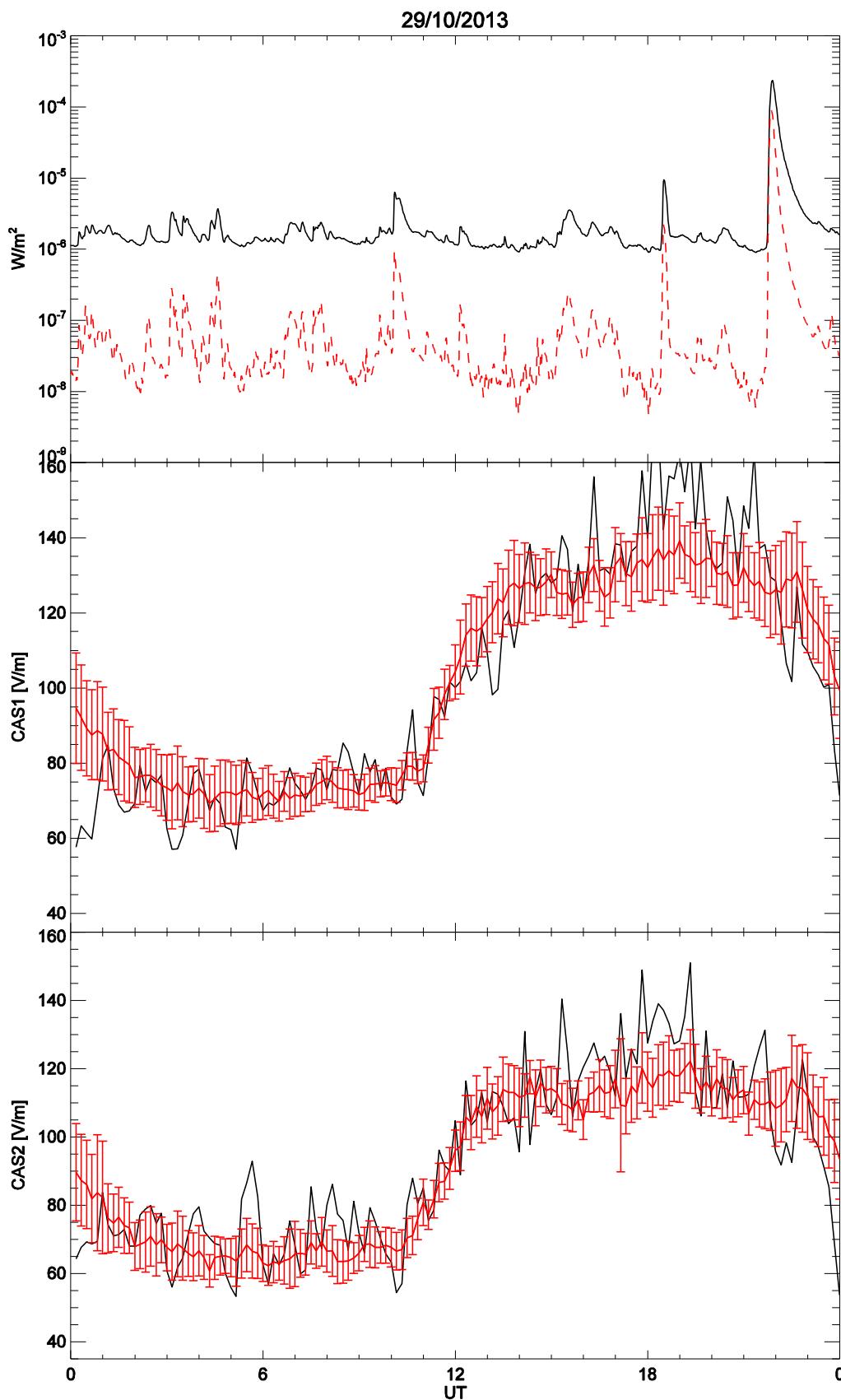


Figura 56: Parte Superior: Fluxo de raios X nas faixas de 0,5- 4 Å (linha pontilhada de cor vermelha) e 1-8 Å (linha sólida de cor preta), com médias cada 10 minutos. No meio: A curva de cor preta representa a variação diária do CEA para o dia da explosão solar. A curva de cor vermelha representa a curva média mensal de dias de tempo bom com suas respectivas barras de erro de 1σ . Ambas as curvas foram feitas com médias cada 10 minutos. Parte Inferior: Como mostrado no gráfico do meio apenas para a estação CAS2.

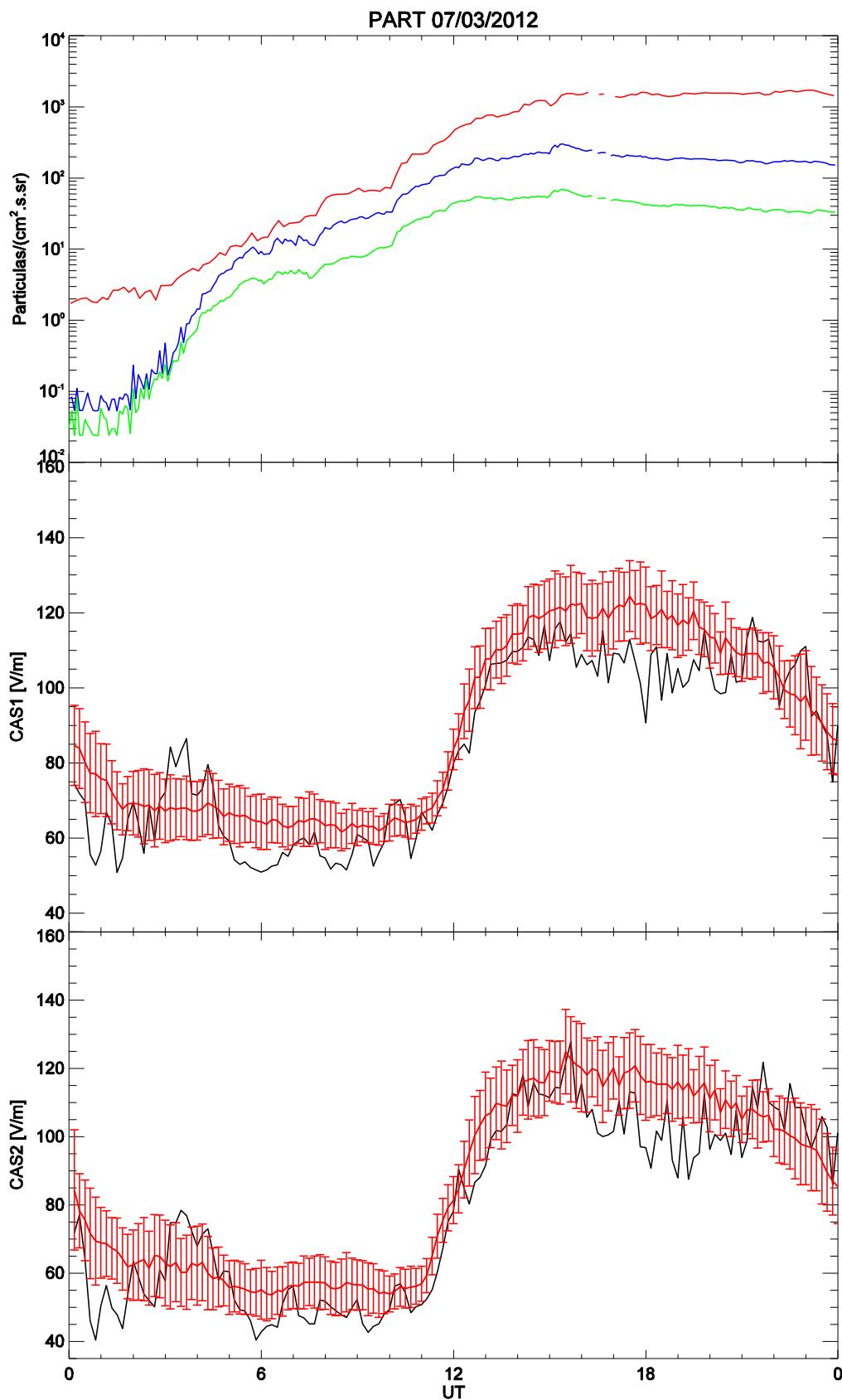


Figura 57: Parte Superior: Fluxo de prótons energéticos nos canais ≥ 10 MeV (cor vermelha), ≥ 50 MeV (cor azul) e ≥ 100 MeV (cor verde), com médias cada 10 minutos. No meio: A curva de cor preta representa a variação diária do CEA para o dia do evento. A curva de cor vermelha representa a curva média mensal de dias de tempo bom com suas respectivas barras de erro de 1σ . Ambas as curvas foram feitas com médias cada 10 minutos.

Parte Inferior: Como mostrado no gráfico do meio apenas para CAS2.

Nas seguintes subseções são mostrados os resultados de aplicar a análise de épocas superpostas (AES) as variações do CEA, segundo o descrito na seção 4.3.

5.4.1 EXPLOSÕES SOLARES

A Figura 58 mostra o resultado de aplicar a AES para as explosões solares para 114 eventos (curva preta). O nível do ‘background’ (curva vermelha) é obtido da mesma maneira a partir de 46 dias de bom tempo sem nenhuma explosão solar. A barra de erro representa dois erros padrão da média. A figura mostra que a variabilidade em ambas as curvas está entre ± 4 V/m, evidenciando que não são encontrados efeitos significativos nos valores do campo elétrico atmosférico desde o início da explosão solar até 48 horas depois. Isso não é uma surpresa, desde que o aumento das radiações de raios X e UV são absorvidas acima de 60 km de altitude (Mironova et al., 2015). Isso está bem acima da região onde variações de condutividade provavelmente afetarão o fluxo de corrente no Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG). Portanto, qualquer efeito direto de fótons das explosões solares no CEAG parece improvável de produzir mudanças no CEA medido em regiões de tempo bom.

5.4.2 PARTÍCULAS ENERGÉTICAS (EVENTOS DE PRÓTONS SOLARES)

A Figura 59 mostra o resultado de aplicar a AES para os eventos de prótons solares para 15 eventos (curva preta). As barras de erro representam dois erros padrão da média. A curva vermelha mostra o nível de ‘background’ com suas respectivas barras de erro, similar como na figura 58. É evidente um aumento de ~ 10 V/m nos excessos do campo elétrico atmosférico após o início do EPS (tempo zero). Esse aumento corresponde a um excesso de $\sim 13\%$ em relação aos valores médios do CEA. Durante o período de análise, o evento do 17 de maio de 2012 foi catalogado como ‘Ground Level Enhancement’ (GLE). Uma análise mais aprofundada foi feita para determinar se o efeito do GLE foi importante para obter o excesso da figura 59. Para isso, não foi considerado o evento do GLE na análise mantendo apenas 14 EPS aos quais se aplicou a AES. O resultado foi muito semelhante, com discrepâncias muito insignificantes (curva azul tracejada).

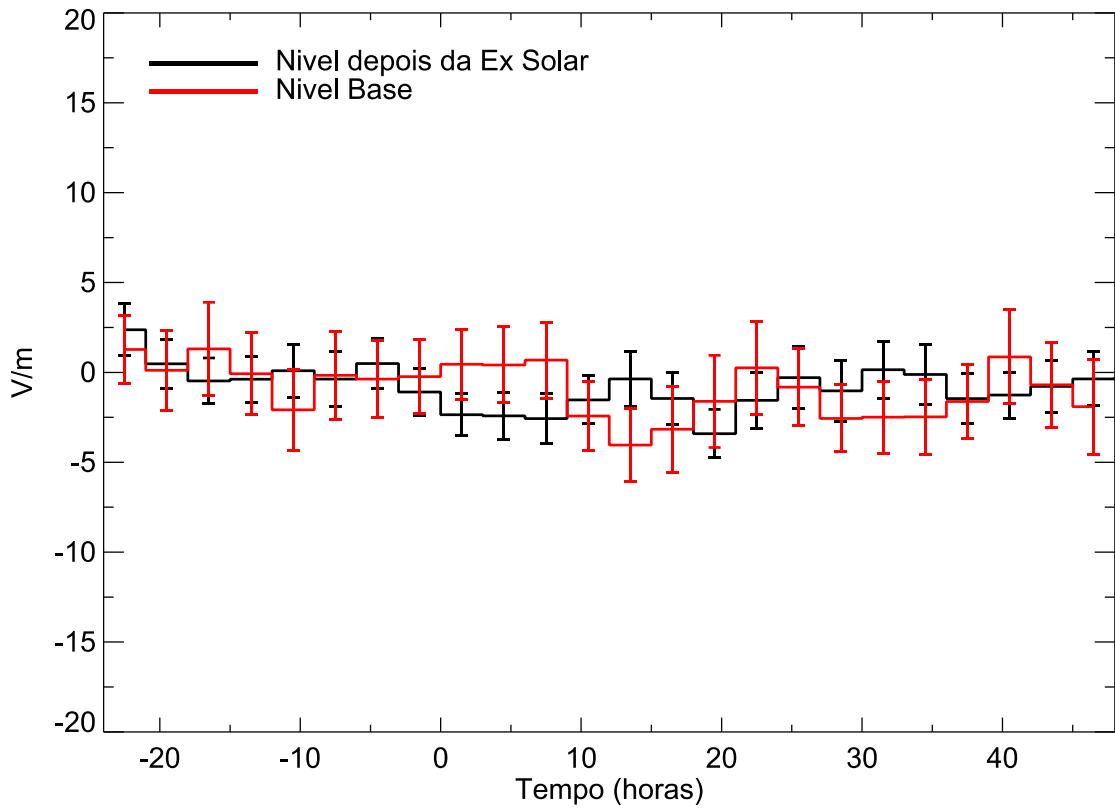


Figura 58: Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a explosões solares (curva preta) e a períodos aleatórios de tempo bom (curva vermelha). O tempo zero é a hora de início da explosão solar. As barras de erro indicam dois erros padrão da média.

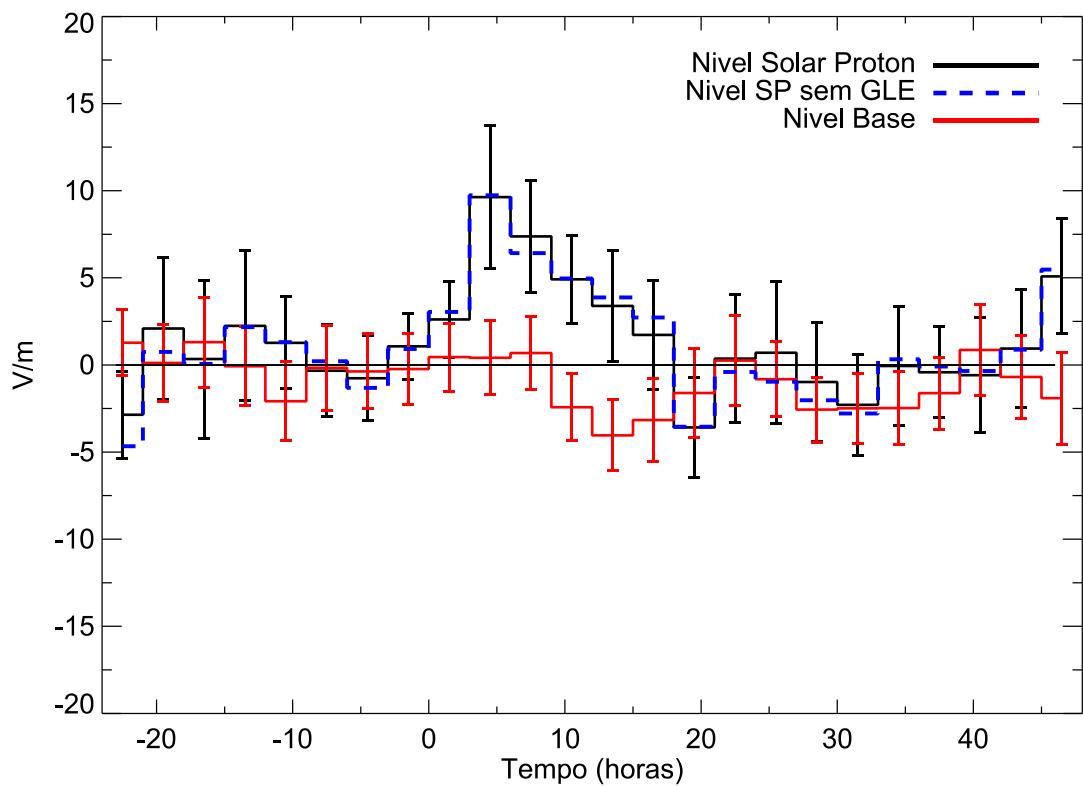


Figura 59: Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a eventos de prótons solares (curva preta), sem GLE (curva azul) e a períodos aleatórios de tempo bom (curva vermelha). O tempo zero é a hora de início do evento de prótons. As barras de erro indicam dois erros padrão da média.

Da figura 59 se nota um aumento de aproximadamente 10 V/m em relação aos valores médios de tempo bom, o que corresponde a um excesso de $\sim 13\%$. Esse aumento ocorre apenas entre 3-8 horas após o início do evento de prótons solares. Os resultados encontrados estão de acordo com trabalhos anteriores. Cobb (1967) encontrou um desvio máximo de 10% dos valores médios na corrente ar-terra um dia depois das explosões solares em Mauna Loa (3400 m.a.s.l.). Da mesma forma, Reiter (1969, 1971) encontrou um incremento máximo de cerca de 60% e 25% nos valores do CEA a 2964 masl e 1780 masl um dia após as explosões solares, respectivamente. Este aumento durou até 3-4 dias após o evento solar, mas com menor intensidade. Deve-se ressaltar que nesses trabalhos, os eventos de evento de prótons solares e de explosões solares (não seguidos por nenhum evento do EPS) não são tratados separadamente. Além disso, e diferentemente do que foi feito na presente tese, esses autores não consideram o possível efeito de outros fenômenos solares, interplanetários e geomagnéticos (como ejeções de massa coronal, tempestade geomagnética e decréscimos Forbush).

Considerando exclusivamente explosões solares e eventos de prótons solares influenciando no campo elétrico atmosférico, os resultados mostram que somente EPS podem produzir um aumento no campo elétrico atmosférico em regiões de tempo bom com uma duração de algumas horas após o início do evento. Este resultado é apoiado qualitativamente por modelos propostos por vários autores (Markson, 1978; Willett, 1979; Farrell & Desch, 2002). Markson (1978) postulou que as partículas energéticas carregadas aumentam a taxa de ionização acima das tempestades elétricas, alterando a resistência e, portanto, a condutividade atmosférica nessa região. Como as regiões de tempo perturbado incluem a maior parte da resistência ôhmica do circuito elétrico atmosférico global, a região acima das tempestades se comporta como uma válvula que regula a corrente de fluxo ascendente. A resistência acima das regiões de tempo bom, nesta parte do circuito elétrico global, é afetada, mas há pouca ou nenhuma mudança porque esta resistência é fraca. Então, espera-se um aumento do potencial elétrico no limite superior do CEAG acima das regiões de tempo bom, o que resultará em um aumento similar do CEA. Da mesma forma, Farrell e Desch (2002) também propuseram que o perfil de condutividade atmosférica aumentasse acima das tempestades elétricas, aumentando a corrente ascendente e, portanto, produzindo um aumento no CEA em regiões de tempo bom no nível do solo. Independentemente dos diferentes modelos existentes, devemos enfatizar que todos eles resultam em um aumento no CEA nas regiões de tempo bom no nível do solo após intensos eventos de prótons solares. Assim, nossos resultados concordam com esses trabalhos anteriores realizados em outros locais.

Adicionalmente, se analisou em mais detalhe o evento de 17 de maio de 2012 (GLE71). A figura 60 mostra, no painel superior, o fluxo de prótons GOES para três canais de energia: $\geq 100\text{MeV}$ (curva verde), $\geq 50\text{MeV}$ (curva azul) e $\geq 10\text{MeV}$ (curva vermelha). No segundo painel se mostra o aumento de raios cósmicos durante o GLE registrado por dois monitores de nêutrons (NM): Polo Sul (curva preta) e Oulu (curva azul). O terceiro e último painel exibe a curva padrão mensal do CEA para maio de 2012 (curva vermelha) e as medições do campo elétrico atmosférico registradas no dia do evento GLE no CAS1 e CAS2 (curvas pretas). Nesta figura, as barras de erro representam um desvio padrão (1σ).

A figura 60 mostra evidências de que, durante o aumento do fluxo de prótons, e até o seu máximo, partículas altamente energéticas produziram um aumento nas medições do monitor de nêutrons. Logo após o início do aumento nos raios cósmicos, a variação do campo elétrico atmosférico começa a diminuir e têm uma duração de aproximadamente 3h. Esta primeira resposta é indicada por uma seta apontando para baixo. Depois de 7 horas após o início do evento de prótons solares, a resposta do campo elétrico atmosférico é positiva e apresenta valores mais elevados em relação aos seus valores médios. Este excesso positivo é ilustrado por uma seta apontando para cima, maximizando em ~ 09 UT, antes de recuperar os valores da curva padrão após $\sim 11:30$ UT.

Para descartar qualquer tempestade geomagnética (Kleimenova et al., 2013) e/ou efeito meteorológico no comportamento do CEA durante o GLE71, a atividade geomagnética global e as condições atmosféricas locais foram examinadas durante o período de tempo de 00 a 16 UT. A Figura 61 mostra: (i) Painel superior: o desvio do campo elétrico atmosférico relativo à curva padrão mensal registrada no CAS1 (o mesmo que o terceiro painel da figura 60); (ii) Painel do meio: o índice K_p planetário usado para caracterizar qualquer atividade geomagnética e a velocidade do vento; e (iii) Painel inferior: a umidade relativa e a precipitação pluviométrica.

A Figura 61 mostra que as condições geomagnéticas e atmosféricas foram calmas durante o desenvolvimento do GLE. Apesar da velocidade do vento apresentar variações de curto prazo, permaneceu sempre abaixo de 8 m/s, o que é característico de condições de tempo bom, sem influência meteorológica nas medições do campo elétrico atmosférico (Harrison, 2013). O período de interesse também é caracterizado pelo nível zero de precipitação pluviométrica. As medições de umidade relativa indicam condições de céu limpo e seco, com valores registrados

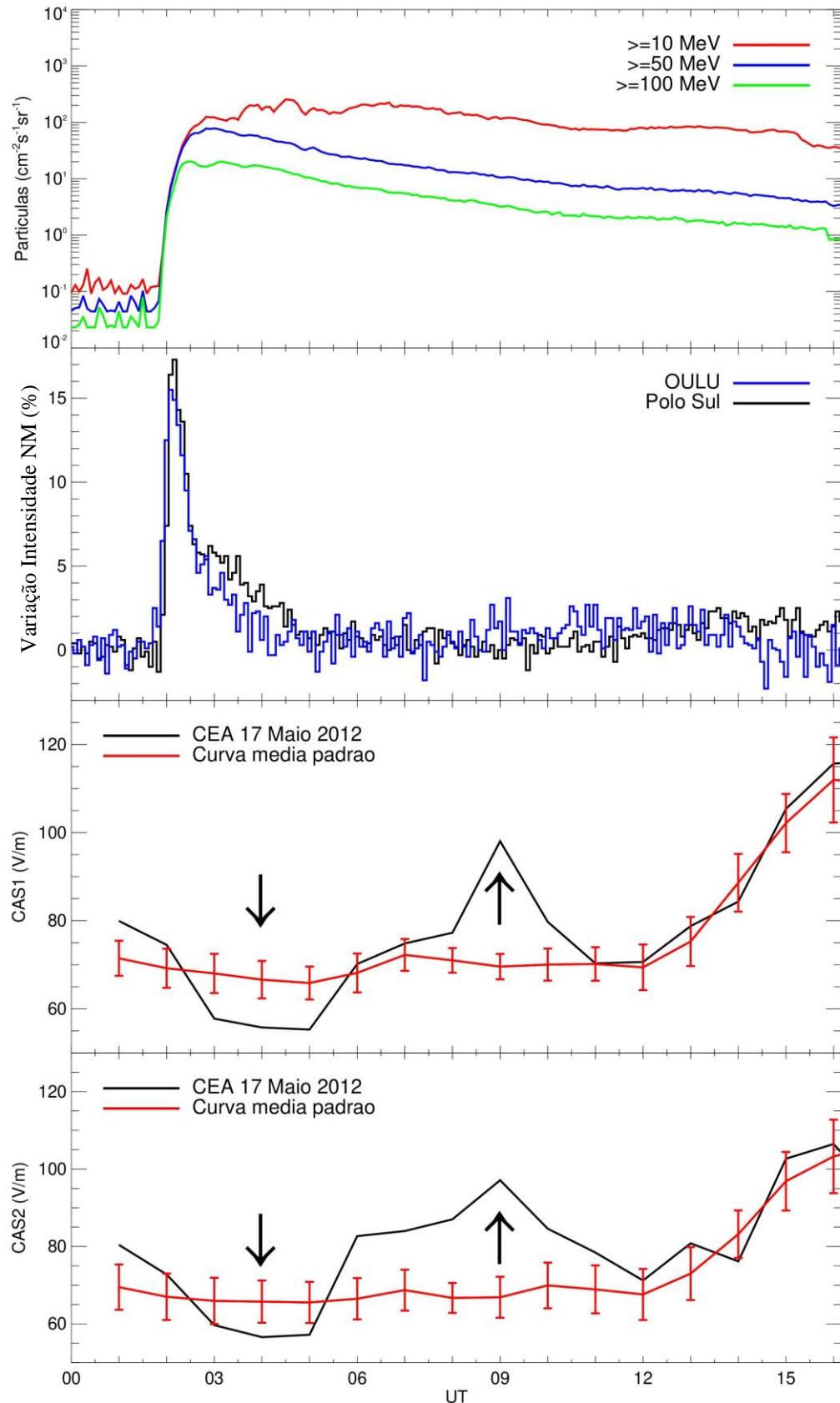


Figura 60: Painel superior: fluxo de prótons energéticos nos canais $\geq 100 \text{ MeV}$ (curva verde), $\geq 50 \text{ MeV}$ (curva azul) e $\geq 10 \text{ MeV}$ (curva vermelha). Segundo painel: Aumento na taxa de contagem do monitor de nêutrons nas estações do Pólo Sul (curva preta) e Oulu (curva azul). Terceiro painel: valores horários do CEA para CAS1 no dia do evento (curva preta) e a curva padrão mensal (curva vermelha) com suas respectivas barras de erro de um desvio padrão (1σ). Painel inferior: Igual ao terceiro painel, apenas para dados da estação CAS2.

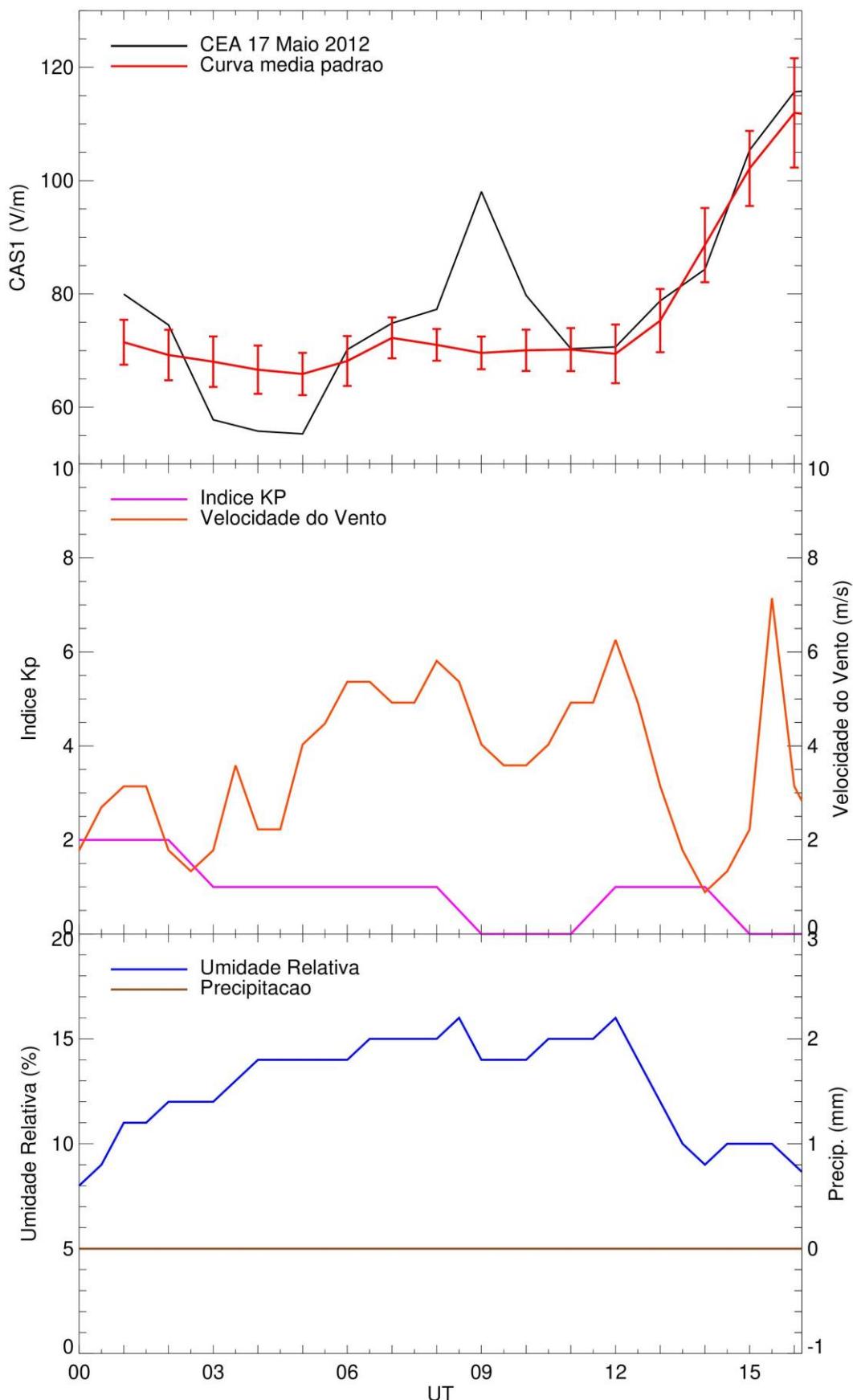


Figura 61: A evolução do campo elétrico atmosférico, atividade geomagnética e meteorológica em 17 de maio de 2012. Painel superior: o mesmo que o terceiro painel da figura 60. Painel do meio: o índice Kp (linha roxa) e a velocidade do vento (linha laranja). Painel inferior: a umidade relativa (linha azul) e a chuva (linha marrom).

abaixo de 15%, ou seja, bem abaixo dos níveis que podem produzir variações nas medidas do CEA (Bennett & Harrison, 2007). Portanto, os resultados apresentados na figura 60 sugerem fortemente que os excessos significativos observados no CEA podem estar relacionados ao evento de prótons solares/GLE ocorrido em 17 de maio de 2012.

A figura 60 mostra uma diminuição significativa dos valores do campo elétrico atmosférico em que o evento de prótons solar foi acompanhado por um GLE. Essa diminuição que mostra a mesma duração do GLE pode ser relacionada a um aumento direto na ionização do solo no local de medição durante condições de tempo bom. Os GLE são eventos muito intensos que produzem partículas secundárias de alta energia que atingem o nível do solo. Os nêutrons secundários gerados nesse processo foram observados pelas estações Polo Sul e Oulu (segundo painel da figura 60). Se nota um aumento máximo às ~ 2 UT, que durou até às ~ 6UT para o Polo Sul. Durante o mesmo período, se observa uma diminuição dos valores do CEA para estações CAS1 e CAS2. Se sugere que este efeito pode estar relacionado a um aumento local de ionização do solo produzido por um aumento do fluxo secundário de partículas de alta energia. Essas partículas podem ionizar a superfície da Terra, causando um aumento na condutividade atmosférica. Pela Lei de Ohm, e levando em conta que a densidade de corrente de ar-Terra é constante com a altitude, é esperada uma diminuição do CEA como observado na figura 60. Este comportamento decrescente do CEA foi observado por medições de balão durante um intenso evento de prótons solares (Holzworth e Mozer, 1979; Holzworth et al., 1987; Reagan et al., 1983; Kokorowski et al., 2006). Portanto, é possível que o mesmo processo possa afetar a condutividade do nível do solo quando um evento muito intenso de prótons solares é acompanhado por um GLE. A figura 60 também mostra um aumento (~ 6 horas depois do início do GLE). Como discutido anteriormente, se acredita que este aumento é produzido pelo excesso da ionização atmosférica produzida acima das tempestades elétricas (isto é, em regiões de tempo perturbado). Então, para este evento em particular, observamos um efeito local, que é imediato, e um efeito global, que leva tempo para produzir perturbações no circuito elétrico atmosférico global (o que é evidenciado na figura 59, onde o aumento do CEA é de aproximadamente 3-8 horas após o início do evento de prótons solares). É importante notar que no gráfico da AES (figura 59), não se observa uma diminuição significativa nos valores do CEA após o início do evento de prótons solares ao analisar todos os eventos juntos. Isto pode ser devido ao fato de que o evento de 17 de maio de 2012 foi o único que foi acompanhado por um evento GLE durante o período estudado. Os eventos de prótons solares incluídos na AES foram intensos, mas não fortes o suficiente para causar mudanças na ionização no nível do solo.

5.4.3 DECRÉSCIMO FORBUSH

Outros fenômenos que podem perturbar o campo elétrico atmosférico de tempo bom são os decréscimos Forbush (DF). As figuras 62 e 63 mostram a variação do campo elétrico atmosférico durante dois DF muito intensos. Os DF produziram uma diminuição da intensidade na taxa do monitor de nêutrons de 10 e 8 %, respectivamente, segundo o grupo IZMIRAN o qual dá um catálogo dos DF desde 1960 (Lingri et al., 2016). Esses dois DF estiveram associados a dois intensas tempestades geomagnéticas. Na figura 62 mostra-se no painel superior a variação horária do índice Dst (curva preta), no painel do meio e inferior a variação horária do campo elétrico atmosférico para CAS1e CAS2, respectivamente (curva preta). Os valores médios diários estão representados pela curva vermelha. O período corresponde entre 19 até 30 de junho de 2015. Segundo o IZMIRAN um DF teve início no dia 22 de junho às 18:33UT, tendo seu máximo no dia 23 de junho (tempo zero na figura). Observa-se um aumento do CEA de aproximadamente 20 V/m para CAS1 e CAS2 nas médias diárias durante o dia 23 de junho o qual coincide com o máximo DF e mínimo valor do índice Dst. Da mesma forma, a figura 63 mostra a variação temporal para os mesmos parâmetros da figura 62 (índice Dst, CEA para CAS1 e CAS2) para o período entre 10 até 21 de julho de 2012. Segundo o IZMIRAN um DF teve início no dia 14 de julho às 18:09 UT. Se pode observar um aumento nos valores médios diários do CEA que coincide com o mínimo Dst.

Como explicado na subseção 2.7.2, o decréscimo Forbush produz uma queda rápida do fluxo de raios cósmicos, ou seja, de partículas carregadas na atmosfera terrestre. O resultado é uma diminuição da ionização, reduzindo assim a condutividade elétrica. Segundo a lei de Ohm, é esperado um aumento no CEA como mostrado nas figuras 62 e 63. É importante mencionar que neste local (perto dos sensores CAS1 e CAS2) há um detector de raios cósmicos (CARPET) que registrou uma diminuição do fluxo de partículas carregadas para o DF do 23 de junho de 2015 (Augusto et al., 2018), o qual confirma nossa hipótese inicial de uma diminuição na condutividade elétrica no solo.

É importante notar que o aumento do CEA produzido pelo DF corresponde a um efeito local, ou seja, uma mudança na ionização no local de medição. Por outro lado, o aumento do CEA produzido pelos eventos de prótons solares é um efeito global, ou seja, uma mudança na ionização acima das tempestades elétricas ocorrendo a grandes distâncias do local de medição.

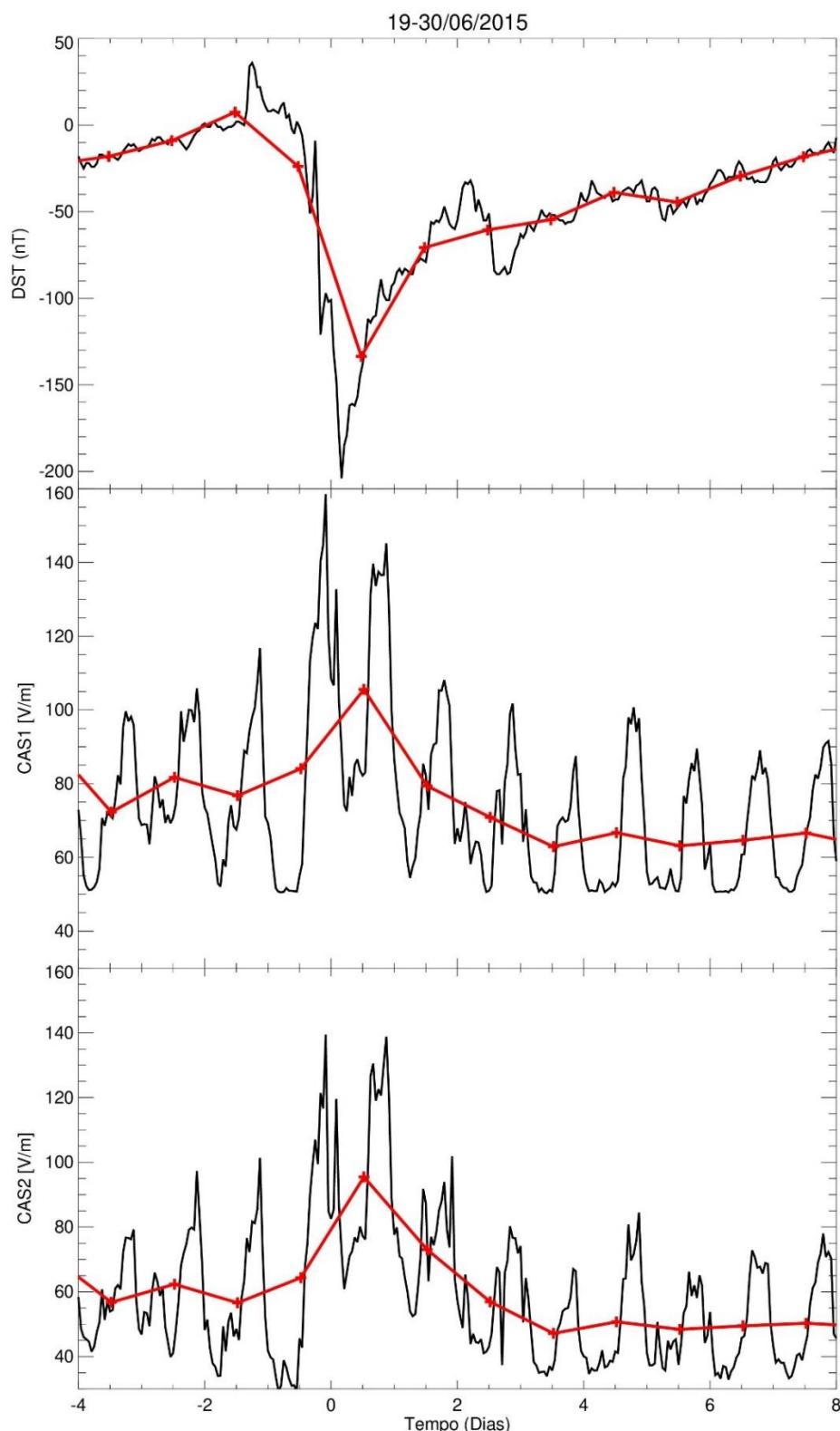


Figura 62: variação horária do índice Dst (painel superior), o campo elétrico atmosférico para CAS1 (painel do meio) e para CAS2 (painel inferior) para o período entre 19 até 30 de junho de 2015. A linha vermelha representa as médias diárias para cada uma das variáveis.

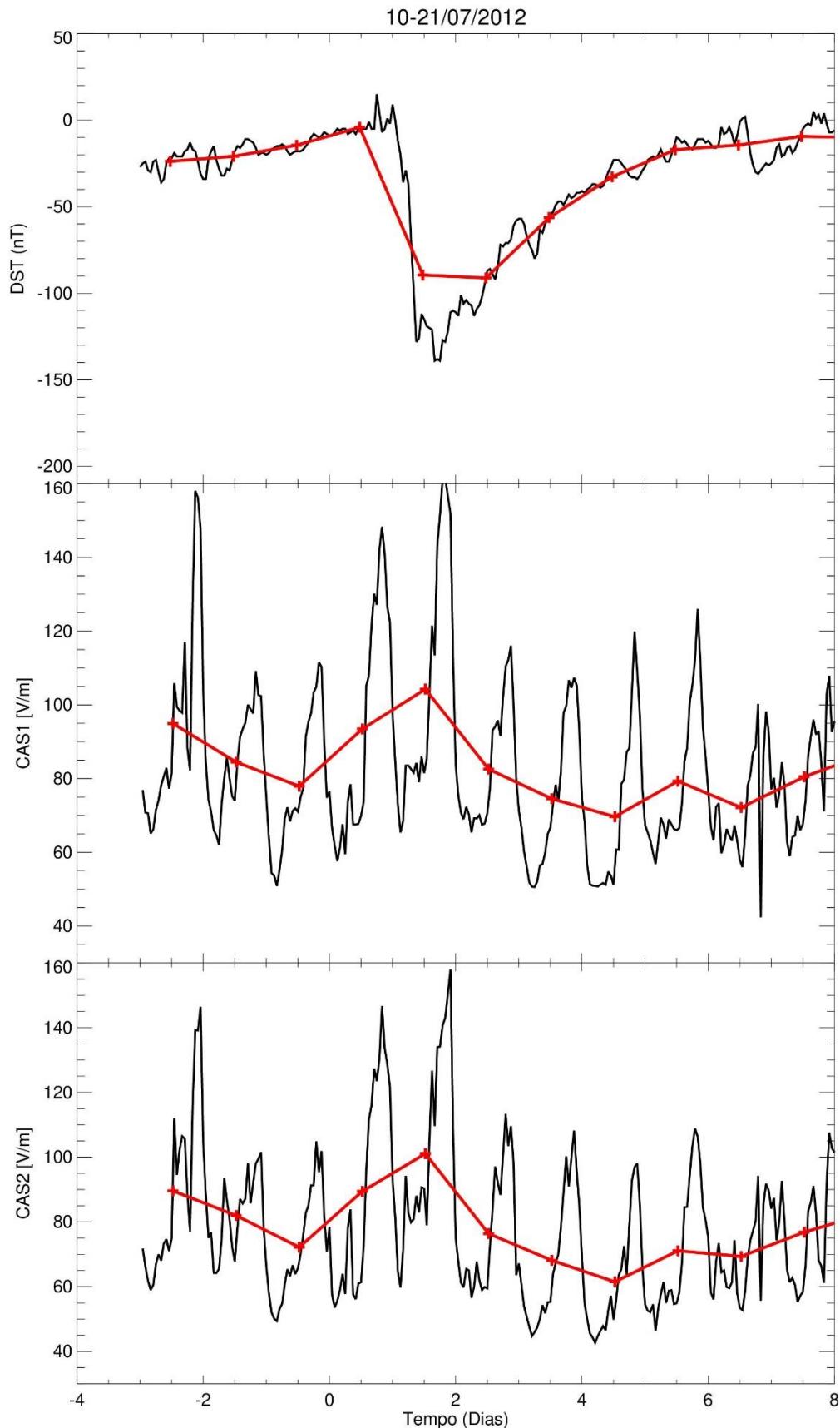


Figura 63: Como na figura 62 apenas para o período 10 até 21 de julho de 2012.

Para uma maior análise dos Decréscimos Forbush, também se utilizou a análises de épocas superpostas. A metodologia foi a mesma que para as explosões solares e eventos de prótons, só que em vez de utilizar valores horários do CEA se utilizaram médias diárias e as janelas temporais utilizadas foram de 10 dias antes e 10 dias depois do início do DF, como já relatado na subseção 4.3. Adicionalmente, só se consideraram DF que não tiveram EPS acontecendo +/- 1 dia do início do DF. Os eventos considerados foram 17 DF cuja queda de intensidade do fluxo de raios cósmicos esteve entre 4-7 % (segundo o catálogo do IZMIRAN).

Na figura 64 mostra-se o resultado do aplicar a AES para os 17 eventos (curva preta). As barras de erro representam dois erros padrão da média. Se pode observar um aumento de aproximadamente 4 V/m um dia depois do início do DF. Uma análise mais aprofundada foi feita para determinar o efeito dos dois DF muito intensos (mostrados nas figuras 62 e 63) no resultado da figura 64. Para isso, não foram considerados esses eventos na AES mantendo apenas 15 eventos DF (curva azul). O resultado foi muito semelhante, porém o aumento do 4 V/m 1 dia depois do início do DF diminuiu completamente. Isso evidencia que o aumento encontrado 1 dia depois do início do DF foi devido só a esses dois DF muito intensos (10 e 8 %, respectivamente). Pode-se concluir então que só os DF muito intensos podem produzir câmbios na ionização da superfície terrestre.

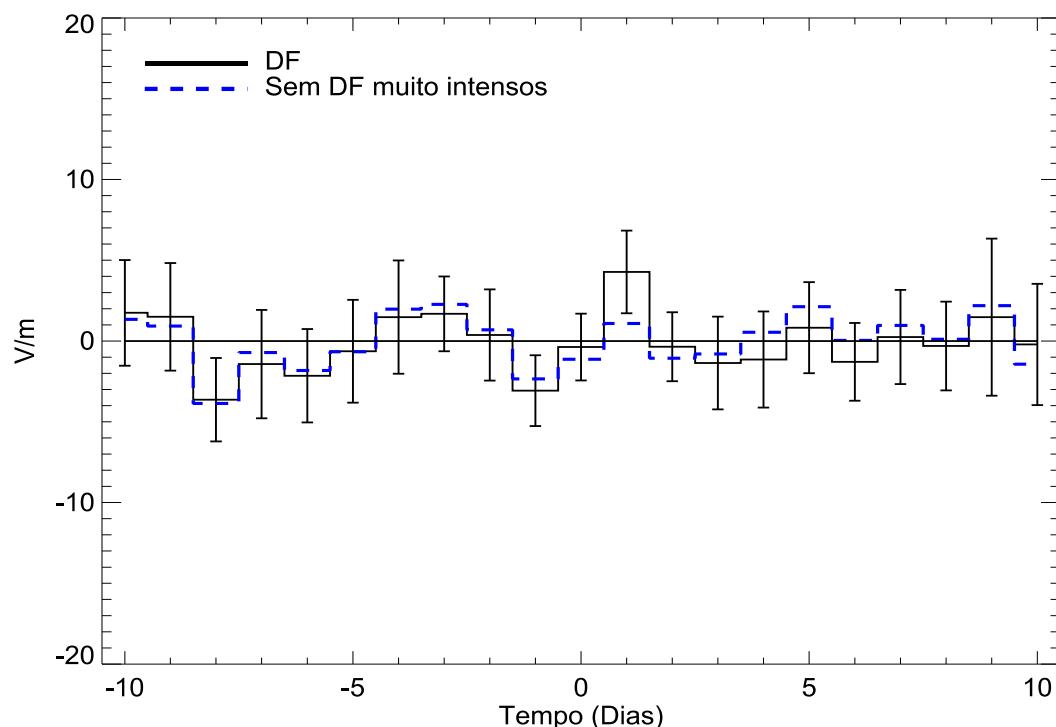


Figura 64: Análise de Épocas Superpostas da resposta do desvio do campo elétrico atmosférico a decréscimo Forbush (curva preta) e sem os dois DF muito intensos (curva azul). O tempo zero é o dia do início do DF. As barras de erro indicam dois erros padrão da média.

6 CONCLUSÕES

Nesta tese apresenta-se os resultados da variação diária do campo elétrico atmosférico em condições de tempo bom e diferentes fenômenos naturais e antropogênicos. Os dados utilizados foram de uma rede instrumental de sensores de campo elétrico instalados na América do Sul, chamada AFINSA (Atmospheric Electric Field Network in South America). A rede AFINSA foi consolidada no decorrer da presente tese com a instalação de 4 novos sensores EFM instalados em Peru e Brasil. Adicionalmente, a partir de 2018 a rede AFINSA forma parte da rede global para monitoramento do campo elétrico atmosférico chamada GLOCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements).

Um objetivo importante cumprido na tese foi encontrar um critério para escolher os dias de tempo bom. O critério adotado foi muito simples, que é considerar a forma da variação diária do CEA e segundo os histogramas dos valores de amplitude do CEA, e foi bem validado ao comparar com o critério rígido das condições meteorológicas de tempo bom (velocidade de vento $< 8 \text{ m/s}$ e não precipitação). Depois de escolher os dias de tempo foram calculadas médias mensais/sazonais/anuais, chamadas curvas padrão. Os resultados encontrados indicam a possibilidade de obter curvas padrão confiáveis do campo elétrico atmosférico de tempo bom, que foram e seguiram sendo utilizadas para estudar a dinâmica do circuito elétrico atmosférico global em diferentes escalas temporais durante tempo bom e distúrbios geofísicos externos.

As curvas padrão anuais do campo elétrico atmosférico refletem a contribuição de efeitos globais e locais. A contribuição do efeito global é verificada através dos altos valores de correlação entre as curvas padrão, para a maioria das estações da rede AFINSA, e a curva universal de Carnegie. Isso será muito importante para estudar a dinâmica do circuito elétrico global. Adicionalmente, também foram encontrados a contribuição de diferentes efeitos locais nas curvas padrões de acordo ao lugar de instalação. Por exemplo, para as estações de CAS1 e CAS2, encontrou-se um incremento nos valores de amplitude das curvas padrão devido a efeitos de turbulência e/ou convecção. Esses efeitos produzem mudanças na condutividade elétrica da superfície terrestre devido à ligação das partículas ultrafinas de aerossol com pequenos íons ou ao incremento do tamanho das partículas de aerossol. Adicionalmente, observou-se nessas esta-

ções o incremento simultâneo dos valores de amplitude do CEA e da espessura óptica de aerosóis no dia 15 de junho de 2011. Supõe-se que isso foi devido ao trajeto das partículas de aerossol ejetadas pôr o vulcão Puyehue - Cordón (Chile).

Para as estações CGR1 e CGR2, foram encontrados valores negativos nas curvas padrões dos meses entre outubro e fevereiro. Esse reverso de polaridade no campo elétrico atmosférico foi associado com a presença de nuvens o qual foi confirmado na comparação com imagens de satélite. Por outro lado, foi encontrado influência de trânsito veicular nos valores de amplitude da curva padrão da estação SPA com um pico máximo às 10 LT. Isso foi verificado na boa correlação entre a variação do CEA e indicadores de poluição local. A curva padrão da estação HYO também apresenta um pico máximo às 10 LT. Supõe-se que isso é devido também a influência de trânsito veicular. Esses resultados sugerem que medições de campo elétrico atmosférico podem ser utilizados como indicadores de poluição local.

A série temporal inteira da variação do CEA para as estações CAS1 e CAS2 mostram uma clara variação sazonal para os períodos 00-08, 08-16, 16-24 e 00-24 UT. Porém, de forma oposta à distribuição global das tempestades elétricas. Foi suposto que a presença de aerossóis esteve obscurecendo um efeito global. Depois de remover a influência dos aerossóis nos valores do campo elétrico, encontrou-se uma boa semelhança entre as variações sazonais do CEA e as tempestades elétricas, que foi evidenciado ao comparar com a variação sazonal do número de ocorrências de raios.

Com respeito à análise dos desvios da curva padrão do campo elétrico atmosférico de tempo bom durante eventos solares foram utilizados os dados das estações localizadas no observatório CASLEO devido a ter pouca poluição local. Para o caso de explosões solares não foram encontradas mudanças significativas na variação do campo elétrico. Aparentemente, um efeito direto dos fôtons produzidos pelas explosões solares sobre o circuito elétrico global parece improvável para produzir variações registradas na superfície terrestre. Porém, excessos de campo elétrico de aproximadamente 10V/m foram encontrados depois do início de eventos de prótons solares. O resultado encontrado suporta modelos teóricos que preveem que eventos de prótons solares produzem um incremento na condutividade elétrica atmosférica acima de tempestades elétricas afetando o circuito elétrico global e, portanto, incremento o campo elétrico em regiões de tempo bom. Adicionalmente, o evento de prótons do dia 17 de maio de 2012 foi o suficientemente intenso para produzir mudanças de ionização na superfície terrestre

incrementando a condutividade elétrica e, pela lei de Ohm, diminuindo o campo elétrico atmosférico. Por outro lado, dois decréscimos Forbush muito intensos observados nos dias 22 de junho de 2015 e 14 de julho de 2012 ($>10\%$ e $>8\%$, respectivamente) também produziram mudanças na ionização da superfície terrestre. Nesse caso os decréscimos Forbush produziram uma diminuição na ionização e, portanto, na condutividade elétrica. Como resultado, obtive-se um incremento no campo elétrico atmosférico. Decrescimentos Forbush menos intensos (com variação na intensidade $> 4\%$) não produziram mudanças significativas no campo elétrico.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A intensidade e modulação de raios cósmicos, observadas por detectores na superfície terrestre, podem modificar os processos climáticos de nosso planeta (por exemplo a variação na cobertura de nuvens). Por isso é necessário estudar e compreender os mecanismos envolvidos. Como trabalho futuro pretende-se analisar esses mecanismos através do estudo das variações rápidas no campo elétrico atmosférico comparado com as variações de partículas altamente energéticas. Para isso serão utilizados os sensores EFM, o detector de raios cósmicos CARPET, detector de nêutrons e detectores de radiação gama instalados no CASLEO (Argentina).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adlerman, E.J., Williams, E.R. Seasonal variation of the global electrical circuit. *Journal of Geophysical Research*, 101, D23, 29679-29688, 1996.
- Anderson, R.V. Universal diurnal variations in Air-Earth current density. *Journal of Geophysical Research*, 74, 6, 1697-1700, 1969.
- Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Aphinogenov, K.V., et al. Radon volumetric activity and ion production in the undisturbed lower atmosphere: Ground-based observations and numerical modeling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53, 1, 147-161, 2017.
- Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Aphinogenov, K.V., et al. Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability. *Boundary-Layer Meteorology*, 167 (2), 327-348, 2018. DOI: 10.1007/s10546-017-0328-0
- Augusto, C.R.A., Navia, C.E., de Oliveira, M.N., et al. The 2015 summer solstice storm: one of the major geomagnetic storm of solar cycle 24 observed at ground level. *Solar Physics*, 293:84, 2018.
- Balogh, A., Hudson, H.S., Petrovay, K., et al. Introduction to the solar activity cycle: Overview of causes and consequences. In Balogh A., Hudson, H., Petrovay K., von Steiger, R. *The solar activity cycle*. Space Sciences Series of ISSI, 53, Springer, New York, NY, 2015.
- Bazilevskaya, G.A., Krainev, M.B., Makhmutov, V.S. Effects of cosmic rays on the Earth's environment. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1577-1586, 2000.
- Bazilevskaya, G.A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere. *Advances in Space Research*, 35, 458-464, 2005.
- Bennett, A.J., Harrison, R.G. Atmospheric electricity in different weather conditions. *Weather*, 62, 10, 277-283, 2007. *Space Science Reviews*,
- Blakeslee, R.J., Mach, D.M., Bateman, M.G., Bailey, J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implication for the global electrical circuit. *Atmospheric Research*, Vol. 135-136, 228-243, 2014.
- Browning, K.A. The structure and mechanisms of hailstorms. *Meteorological Monographs*, v.16, n.38, 1-43, 1977.
- Burns, G.B., Tinsley, B.A., Frank-Kamenetsky, A.V., et al. Monthly diurnal global atmospheric circuit estimates derived from Vostok electric field measurements adjusted for local meteorological and solar wind influences. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69, 6, 2061-2082, 2012. DOI: 10.1175/JAS-D-11-0212.1
- Byrne, G.J., Benbrook, J.R., Bering, E.A. Balloon observations of stratospheric electricity above the South Pole: vertical electric field, conductivity and conduction current. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 53, 859-868, 1991.

Canton, J. Electrical Experiments, with an Attempt to Account for Their Several Phenomena; Together with Some Observations on Thunder-Clouds. *Phil Trans* 48, 1753 -1754, 350-358, 1753.

Cargill, P.J., Harra, L.K. Coronal Mass Ejection. In: Kamide Y., Chian, A. *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 539, 2007.

Cane, H.V. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases. *Space Science Reviews*, 93:55, 2000.

Cecil, D.J., Buechler, D.E., Blakeslee, R.J., Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Data description. *Atmospheric Research*, 135-136, 404-414, 2014. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.06.028

Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccipio, D.J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, D1, 4005, 2003. DOI: 10.1029/2002JD002347

Cobb, W.E. Evidence of a solar influence on the atmospheric electric elements at Mauna Loa Observatory. *Monthly Weather Review* 95 (12), 905-911, 1967.

_____. The atmospheric electric climate at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25, 470-480, 1968.

Cole, R.K., Pierce, E.T. Electrification in the Earth's atmosphere for altitude between 0 and 100 kilometers. *Journal of Geophysical Research*, 70, 2, 2735-2749, 1965.

Cotton, R.W., Anthes, B.R. *Storm and cloud dynamics*. Academic Press, Inc. International Geophysics Series, V. 44, 1989.

De, S.S., Paul, S., Barui, S., et al. Studies on the seasonal variation of atmospheric electricity parameters at a tropical station in Kolkata, India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105-106, 135-141, 2013. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.09.006

De Mendonça, R.R.S., Raulin, J.-P., et al. Observation of cosmic ray and electric field variation in the surface atmosphere. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 73 (3), 1410-1416, 2009.

De Mendonça, R.R.S., Raulin, J.-P., Echer, E., et al. Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic rays measurements. *Journal of Geophysical Research: Solar Physics*, 118, 1403-1409, 2013. DOI: 10.1029/2012JA018026

DeSouza-Machado, S., Strow, L., Maddy, E., et al. A novel retrieval of daytime atmospheric dust and volcanic ash heights through a synergy of AIRS infrared radiances and MODIS L2 optical depths. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*, 8, 443-485, 2015. DOI: 10.5194/amtd-8-443-2015

Dickinson, R.E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, 1240-1248, 1975.

Dorman, L.I. Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004.

Elhalel, G., Yair, Y., Nicoll, K., et al. Influence of short-term solar disturbances on the fair weather conduction current, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A26, 2014. DOI: 10.1051/swsc/2014022.

Ellisondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., et al. Chronology and Impact of the 2011 Puyehue-Cordón Caulle eruption, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3, Issue 9, 5383-5452, 2015.

Engfer, D.W., Tinsley, B.A. An investigation of short-term solar wind modulation of atmospheric electricity at Mauna Loa Observatory. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 61, 943-953, 1999.

Farrel, W.M., Desch, M.D. Solar proton events and the fair weather electric field at ground. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, N°9, 37-1, 37-4, 2002. DOI: 10.1029/2011GL013908

Frank-Kamenetsky, A.V., Troshichev, O.A., Burns, G.B., et al. Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 106, 01, 179-190, 2001.

Garcia, H.A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements. *Solar Physics*, v.154, n.2, p.275-308, 1994.

GOES I-M Databook, Prepared for NASA DRL 101-08, GSFC Specification S-480-21A, Contract NAS5-29500, Reference S-415-19, Revision 1, Greenbelt, Md, 1996.

Gosling, J.T., Pizzo, V.J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure. *Space Science Reviews*, 89, 21-52, 1999.

Gringel, W., Rosen, J., Hofmann, D. Electrical structure from 0 to 30 kilometers. *The Earth's Electrical Environment*, National Academy Press, Washington, DC, pp. 166-182, 1986.

Guha, A., De, B.K., Gurubaran, S., et al. First results of fair-weather atmospheric electricity measurements in Northeast India. *Journal of Earth System Science*, 119 (2), 221-228, 2010.

Gurmani, S.F., Ahmad, N., Tacza, J., et al. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179, 441-449, 2018. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.09.011

Haldoupis, C., Rycroft, M., Williams, E., et al. Is the "Earth-ionosphere capacitor" a valid component in the atmospheric electric circuit? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164, 127-131, 2017.

Hargreaves, J.K. The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, 1992.

Harrison R.G., Aplin, K.L. Mid-nineteenth century smoke concentrations near London.

Atmospheric Environment 36, 4037-4043, 2002. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00334-5

Harrison R.G. Twentieth - century atmospheric electrical measurements at the observatories of Kew, Eskdalemuir and Lerwick. Weather, 58, 11-19, 2003. DOI: 10.1256/wea.239.01

Harrison, R.G. Urban smoke concentrations at Kew, London, 1898 – 2004. Atmospheric Environment 40, 3327 – 3332, 2006. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.01.042

Harrison, R.G., Märcz, F. Heliospheric timescale identified in surface atmospheric electricity. Geophysical Research Letters 34, L23816, 2007.

Harrison, R.G., Usoskin, I. Solar modulation in surface atmospheric electricity. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72, 176-182, 2010.

Harrison, R.G., Joshi, M., Pascoe, K. Inferring convective responses to El Niño with atmospheric electricity measurements at Shetland. Environmental Research Letters 6, 044028, 2011. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044028

Harrison,R.G. The Carnegie Curve. Surveys in Geophysics, 34, 2, 209-232. DOI: 10.1007/s10712-012-9210-2, 2013

Harrison, R.G., Nicoll, K.A., McWilliams, K.A. Space Weather driven changes in lower atmosphere phenomena. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 98 (), 22-30, 2013.

Harrison, R.G., Nicoll, K.A., Aplin, K.L. Evaluating stratiform cloud base charge remotely. Geophysical Research Letters, 44, 2017. DOI: 10.1002/2017GL073128

Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. Remote Sensing of Environment, 66 (1), 1-16, 1998. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5.

Holzworth, R., Mozer, F. S. Direct evidence of solar flare modification of stratospheric electric field. Journal Geophysical Research, 84, 2559-2566, 1979.

Holzworth, R. H., Norville, K. W., Williamson, P. R. Solar flares perturbations in stratospheric current systems. Geophysical Research Letters, 14, 852-855, 1987.

Holzworth, R.H., Bering, E.A., Kokorowski, M.F., et al. Balloon observations of temporal variation in the global circuit compared to global lightning activity. Advance Space Research, 36 (11), 2223-2228, 2005.

Imyanitov, I.M., Chubarina, E.V. Electricity of the free atmosphere. Leningrad Gidrometeoizdat Press, Translation from Russian, Israel Program for Scientific Translation, 210 pp, 1965.

Israelsson, S., Tammet, H. Variation of fair weather atmospheric electricity at Marsta Observatory, Sweden, 1993-1998. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 63, 1693-1703, 2001.

- James, M.R., Lane, S.J., Gilbert, J.S. Volcanic plume monitoring using atmospheric electric potential gradients. *Journal of the Geological Society*, 155, 587-590, 1998.
- Jeeva, K., Gurubaran, S., Williams, E.R., et al. Anomalous diurnal variation of atmospheric potential gradient and air-Earth current density observed at Maitri, Antártida. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 2016. DOI: 10.1002/2016JD025043
- Kamsali, N., Pawar, S.D., Murugavel, P., et al. Estimation of small ions concentration near the Earth's surface. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 2345-2351, 2011. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.07.011
- Kamogawa, M., Suzuki, Y., Sakai, R., et al. Diurnal variation of atmospheric electric field at the summit of Mount Fuji, Japan, distinctly different from the Carnegie curve in the summertime. *Geophysical Research Letters*, 42, 3019-3023, 2015. DOI: 10.1002/2015GL063677
- Kamra, A.K., Deshpande, C.G., Gopalakrishnan, V. Challenge to the assumption of the unitary diurnal variation of the atmospheric electric field based on observations in the Indian Ocean, Bay of Bengal and Arabian Sea. *Journal of Geophysical Research*, 99, N° D10, 21,043-21,050., 1994.
- Kartalev, M. D., Rycroft, M. J., Fullekrug, et al. A possible explanation for the dominant effect of South American thunderstorms on the Carnegie curve. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 457-468, 2006.
- Kleimenova, N., Kozyreva, O., Michnowski, S., et al. Influence of geomagnetic disturbances on atmospheric electric field (E_z) variations at high and middle latitudes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 99, 117-122, 2013.
- King, J.H., Papitashvili, N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110, A2, A02209, 2005. DOI: 10.1029/2004JA010649
- Kokorowski, M., Sample, J. G., Holzworth, R. H., et al. Rapid fluctuations of stratospheric electric field following a solar energetic particle event. *Geophysical Research Letters*, 33(L20105), 1-6, 2006.
- Kokorowski, M., Seppälä, A., Sample, J.G., et al. Atmosphere-ionosphere conductivity enhancements during a hard solar energetic particle event, *Journal of Geophysical Research*, 117, A05319, 2012. DOI: 10.1029/2011JA017363.
- Kumar, V.V., Ramachandran, V., Buadromo, V., et al. Surface fair-weather potential gradient measurements from a small tropical island station Suva, Fiji. *Earth Planets and Space*, 61, 747-753, 2009.
- Laken, B.A, Calogovic, J. Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds. *Journal Space Weather Space Climate* 3, A29, 2013. DOI: 10.1051/swsc/2013051
- Lingri, D., Mavromichalaki, H., Belov, A., et al. Solar activity parameters and associated

Forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24. *Solar Physics*, 291, 1429-1444, 2016. DOI: 10.1007/s11207-016-0863-8

Liu, C., Williams, E., Zipser, E.J., Burns, G. Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit. *Journal of Atmospheric Sciences*, 67, 309-323, 2010. DOI: 10.1175/2009JAS3248.1

Lopes, F.M., Silva, H.G., Bennett, A.J., et al. Global electric circuit research at Graciosa Island (ENA-ARM facility): First year of measurements and ENSO influences. *Journal of Electrostatics*, 87, 203-2011, 2017.

MacGorman, D.R., Rust, W.D. The electrical nature of storm. Oxford University Press New York, 422 p, 1998.

Mach, D.M., Blakeslee, R.J., Baterman, R.G. Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics. *Journal of Geophysical Research*, 116, D05201, 2011. DOI: 10.1029/2010JD014462

Märcz, F. Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59 (9), 975-982, 1997.

Märcz, F., Harrison, R.G. Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagycenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew. *Annales Geophysicae*, 21, 2193-2200, 2003. DOI: 10.5194/angeo-21-2193-2003.

Markson, R. Solar Modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun-Weather relationship. *Nature*, 273, 103-109, 1978.

_____. Modulation of the Earth's electric field by cosmic radiation. *Nature* 391, 5813, 304-308, 1981.

_____. The global circuit intensity: Its measurements and variation over the last 50 years. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(2), 223-242, 2007. DOI: 10.1175/BAMS-88-2-223

Markson, R., Ruhnke, L.H., Williams, E.R. Global scale comparisons of simultaneous ionospheric potential measurements. *Atmospheric Research*, 51, 315-321, 1999.

Markson, R. The global circuit intensity. Its measurements and variation over the last 50 years. *Bulletin American Meteorological Society*, 88 (2), 1-19, 2007.

Mironova, I. A, Aplin, K. L., Arnold, F., et al. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Science Reviews*, 194, 1-96, 2015.

Morales, C.A., Anagnostou, E.N. Extending the capabilities of high-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 141-159, 2003.

Muraki, Y., Axford, W.I., Matsubara, Y., et al. Effects of atmospheric electric fields on cosmic rays. *Physical Review D*69, 123010, 2004. DOI: 10.1103/PhysRevD.69.123010

Nicoll, K.A., Harrison R.G. Experimental determination of layer cloud edge charging from cosmic ray ionization. *Geophysical Research Letters*, 37, L13802, 2010. DOI: 10.1029/2010GL043605

_____. Detection of lower tropospheric responses to solar energetic particles at midlatitudes. *Physical Review Letters*, 112, 225001(1-5), 2014. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.225001

_____. Stratiform cloud electrification: comparison of theory with multiple in-cloud measurements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142 (700), 2679-2691, 2016. DOI: 10.1002/qj.2858

Nicoll, K.A., Harrison, R.G., Silva, H.G., et al. Electrical sensing of the dynamical structure of the planetary boundary layer. *Atmospheric Research*, 202, 81-95, 2018. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.009

Nicoll, K.A., Harrison, R.G., Barta, V., et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 184, 18-29, 2019.

Park, C.G. Solar magnetic sector effects on the vertical atmospheric field at Vostok Antártida. *Geophysical Research Letters* 3 (8), 475-478, 1976.

Parsons, J., Mazeas, W. Observations upon the Electricity of the Air, Made at the Chateau de Maintenon, during the Months of June, July, and October, 1753. *Phil Trans* 48, (1753 - 1754) (377-384), 1753.

Peterson, M., Deierling, W., Liu, C, et al. A TRMM/GPM retrieval of the total mean generator current for the global electric circuit. *Journal Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10025-10049, 2017. DOI: 10.1002/2016JD026336

Peterson, M., Deierling, W., Liu, C, et al. A TRMM assessment of the composition of the generator current that supplies the global electric circuit. *Journal Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 8208-8220, 2018. DOI: 10.1029/2018JD028844

Pierce, E.T., Whitson, A.L. The variation of potential gradient with altitude above ground of high radioactivity. *Journal of Geophysical Research* 69, 2895-2898, 1964.

Price, C. Global thunderstorm activity. In Fullekrug M et al. (eds) *Sprites, elves and intense lightning discharges*. Springer, Amsterdam, 85-99, 2006.

Rakov, V.A., Uman, M.A. *Lightning, Physics and effects*. 1ed. Cambridge, United Kingdom, 2003.

Raulin, J.-P., Tacza, J., Macotela, E. A new South America electric field monitor network. *Sun and Geosphere*, 9 (1-2), 111-114, 2014.

Reagan, J. B., Meyerott, R. E., Evans, J. E., et al. The effects of energetic particle precipitation on the atmospheric electric circuit. *Journal Geophysical Research*, 88, 3869-3878, 1983.

Reid, G.C. Electrical structure of the middle atmosphere. *Studies in Geophysics*, National Academy Press, 1986.

Reiter, R. Solar flares and their impact on potential gradient and air-earth current characteristic at high mountain stations. *Pure and Applied Geophysical*, 72, Issue 1, 259-267, 1969.

_____. Further evidence for impact of solar flares on potential gradient and air-Earth current characteristics at high mountain stations. *Pure and Applied Geophysical*, 86, Issue 1, 142-158, 1971.

Rycroft, M.J., Israelsson, S., Price, C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1563–1576, 2000.

Rycroft, M.J., Odzimek, A., Arnold, N.F., et al. New model simulations of the global atmospheric electrical circuit driven by thunderstorm and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 2485-2509, 2007.

Rycroft, M. J., Harrison, R. G., Nicoll, K. A., Mareev, E. A. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity. *Space Science Reviews*, 137 (1-4). 83-105. ISSN 0038-6308 doi: 10.1007/s11214-008-9368-6, 2008.

Rycroft, M. J., Nicoll, K. A., Aplin, K. L., Giles Harrison, R. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 90-91, 198-211, 2012.

Roble, R.G., Tzur, I. The global atmospheric-electrical circuit. In: *The Earth's Electrical Environment*. National Academies Press. C. 15, 206-231, 1986.

Sartor, D. Electric field perturbations in terrestrial clouds and solar flare events, *Mon. Weather Rev.*, 198, 499-505, 1980.

Sheftel, V.M., Bandilet, O.I., Yaroshenko, A.N., et al. Space-time structure and reasons of global, regional, and local variations of atmospheric electricity, *Journal of Geophysical Research*, 99, 10797-10806, 1994.

Silva, H.G., Conceição, R., Melgão, M., et al. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence. *Environmental Research Letters*, 9, 114025, 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/11/114025

Singh, D.K., Singh, R.P., Kamra, A.K. The electrical environment of the Earth's atmosphere: A review. *Space Science Reviews*, 113 (3), 375-408, 2004. DOI: 10.1023/B:SPAC.0000046747.32359.d8

Smart, D.F., Shea, M.A. Galactic cosmic radiation and solar energetic particles, in *Handbook of Geophysical and the Space Environment*, edited by A.S. Jursa, Nat. Tech. Inform. Service, Springfield VA, 1985.

Stolzenburg, M., Rust, W.D., Marshall, T.C. Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, N D12, 14,097-14,108, 1998.

Suarez, L., Alvarez, D., Bendezu, Y., Pomalaya, J. Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. Rev. Soc. Quím. Perú, 83 (2), 187-199, 2017.

Tacza, J. Análise do campo elétrico atmosférico durante tempo bom e distúrbios geofísicos. Dissertação de mestrado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015.

Tacza, J. Raulin, J.-P., Macotela, E., et al. A new South American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 120, 70-79, 2014.

DOI: 10.1016/j.jastp.2014.09.001

Tammet, H. A joint dataset of fair-weather atmospheric electricity. Atmospheric Research 91, 194-200, 2009. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.01.012

Velinov, P.I.Y., Asenovski, S., Kudela, K., et al. Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere, Journal of Space Weather and Space Climate, 3, A14, 2013. DOI: 10.1051/swsc/2013036.

Wallace, J.M., Hobbs, P.V. Atmospheric Science: An introductory survey. New York, Academic Press, 467 p, 1977.

Wallace, J.M., Hobbs, P.V. Atmospheric Science: An introductory survey. London, Elsevier, 483 p, 2006.

Willett, J.C. Solar modulation of the supply current for atmospheric electricity? Journal of Geophysical Research, 84, 4999-5002, 1979.

Williams, E.R. The electrification of thunderstorms. Scientific American, v259, n5, 88-99, 1989.

_____. Global circuit response to seasonal variations in global surface air temperature. Monthly Weather Review, 122, 1917-1929, 1994.

_____. The global electrical circuit: A review. Atmospheric Research, 91, 140-152. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.05.018, 2009

_____. Electricity in the atmosphere. In North G et al. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Elsevier, USA, Vol. 3, 1-8, 2015.

Whipple, F.J.W. On the association of the diurnal variation of electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 55, 1-17, 1929.

Wilson, C.T.R. Atmospheric electricity. Nature, 68, 101-104, 1903.

_____. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. Philos. Trans. Roy. Soc. London, 221A, 73-115, 1921.

Xu, B., Zou, D., Chen, B., et al. Periodic variations of atmospheric electric field on fair weather conditions at YBJ, Tibet. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 97, 85-90, 2013.

DOI: 10.1016/j.jastp.2013.02.013

Yaniv, R., Yair, Y., Price C., Katz, S, Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel. Atmospheric Research, 172-173, 119-125, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.12.025

Yaniv, R., Yair, Y., Price, C., et al. Ground-based measurements of the vertical E-field in mountainous regions and the “Austausch” effect. Atmospheric Research, 189, 127-133, 2017. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.01.018

Yeboah-Amankwah, D. Fair weather electric field in Port Moresby. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 51, 1035-1040, 1989.

APÊNDICE A: NÚMERO DE DIAS DE TEMPO BOM ESCOLHIDOS PARA TODAS AS ESTAÇÕES.

As tabelas A1 e A2 indicam o número de dias de tempo bom utilizados para o cálculo das médias, onde T é o número total de dias de tempo bom, Prop. indica a proporção de dias de tempo bom e as letras J, F, M ... indicam os meses do ano (Janeiro, Fevereiro, Março e assim sucessivamente)¹⁹. As cores preto e azul indicam o período analisado em Tacza (2015) e na presente tese, respectivamente. Para a estação HYO a cor vermelha indica os dias escolhidos com o critério meteorológico de tempo bom. Os símbolos ‘-’ e ‘x’ indicam que o sensor não esteve trabalhando e os dados estão errados, respectivamente.

Tabela A1 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por mês, para todas as estações.

| Ano/Mês | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | T |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| CAS1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2008 | - | 4 | 10 | 11 | 23 | 21 | 24 | 17 | 17 | 11 | 5 | 7 | 150 |
| Prop. (%) | - | 3 | 7 | 7 | 15 | 14 | 16 | 11 | 11 | 7 | 4 | 5 | 100 |
| 2009 | 11 | 11 | 21 | 30 | 22 | 24 | 28 | 19 | 15 | 19 | 21 | 5 | 226 |
| Prop. (%) | 5 | 5 | 9 | 14 | 10 | 11 | 12 | 8 | 7 | 8 | 9 | 2 | 100 |
| 2010 | 13 | 20 | 25 | 24 | 22 | 16 | 13 | 15 | 23 | 14 | 19 | 12 | 216 |
| Prop. (%) | 6 | 9 | 12 | 11 | 10 | 7 | 6 | 7 | 11 | 6 | 9 | 6 | 100 |
| 2011 | 10 | 11 | 17 | 20 | 28 | 20 | 12 | 7 | 19 | 18 | 16 | 9 | 187 |
| Prop. (%) | 5 | 6 | 9 | 11 | 15 | 11 | 6 | 3 | 10 | 10 | 9 | 5 | 100 |
| 2012 | 9 | 9 | 18 | 21 | 23 | 20 | 22 | 17 | 16 | 17 | 14 | 9 | 195 |
| Prop. (%) | 5 | 5 | 9 | 11 | 12 | 10 | 11 | 9 | 8 | 9 | 6 | 5 | 100 |
| 2013 | 3 | 15 | 21 | 26 | 18 | 23 | 22 | 21 | 16 | 17 | 16 | 8 | 206 |
| Prop. (%) | 1 | 7 | 10 | 13 | 9 | 11 | 11 | 10 | 8 | 8 | 8 | 4 | 100 |
| 2014 | 11 | 15 | 18 | 27 | 24 | 22 | 20 | 21 | 16 | 2 | - | - | 176 |
| Prop. (%) | 6 | 9 | 10 | 15 | 14 | 12 | 12 | 12 | 9 | 1 | - | - | 100 |
| 2015 | - | - | - | - | 13 | 26 | 23 | 15 | 23 | 10 | 11 | 16 | 137 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | 9 | 19 | 17 | 11 | 17 | 7 | 8 | 12 | 100 |
| 2016 | 13 | 4 | - | - | - | - | - | 11 | 11 | x | x | x | 39 |
| Prop. (%) | 34 | 10 | - | - | - | - | - | 28 | 28 | x | x | x | 100 |
| 2017 | x | x | 6 | 3 | 6 | 13 | | | | | | | 28 |
| Prop. (%) | x | x | 21 | 11 | 21 | 47 | | | | | | | 100 |
| CAS2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2010 | 3 | 17 | 19 | 20 | 13 | 15 | 18 | 10 | 13 | 10 | 18 | 10 | 166 |
| Prop. (%) | 2 | 10 | 11 | 12 | 8 | 9 | 11 | 6 | 8 | 6 | 11 | 6 | 100 |

(Continua)

¹⁹ As estações do ano foram definidas como: Verão – Dezembro, Janeiro e Fevereiro, Outono – Março, Abril e Maio, Inverno – Junho, Julho e Agosto, Primavera – Setembro, Outubro e Novembro.

Tabela A1 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por mês, para todas as estações. (Continuação)

| Ano/Mês | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | T |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| CAS2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2011 | 9 | 8 | 14 | 16 | 21 | 10 | 4 | 5 | 18 | 12 | 16 | 8 | 141 |
| Prop. (%) | 6 | 6 | 10 | 11 | 15 | 7 | 3 | 4 | 13 | 8 | 11 | 6 | 100 |
| 2012 | 8 | 6 | 21 | 18 | 21 | 8 | 15 | 12 | 20 | 17 | 15 | 21 | 182 |
| Prop. (%) | 4 | 3 | 12 | 10 | 12 | 4 | 8 | 7 | 11 | 9 | 8 | 12 | 100 |
| 2013 | 3 | 4 | 20 | 3 | - | 22 | 15 | 21 | 15 | 16 | 14 | x | 133 |
| Prop. (%) | 2 | 3 | 15 | 2 | - | 17 | 11 | 16 | 11 | 12 | 11 | x | 100 |
| 2014 | 9 | 13 | 21 | 26 | 24 | 16 | 15 | 17 | 3 | 3 | - | 11 | 158 |
| Prop. (%) | 6 | 8 | 13 | 17 | 15 | 10 | 9 | 11 | 2 | 2 | - | 7 | 100 |
| 2015 | 9 | 6 | 21 | 29 | 24 | 24 | 21 | 19 | 22 | 12 | 11 | 16 | 214 |
| Prop. (%) | 4 | 3 | 10 | 14 | 11 | 11 | 10 | 9 | 10 | 6 | 5 | 7 | 100 |
| 2016 | 13 | 18 | 21 | 16 | 28 | 25 | 20 | 20 | 23 | 14 | 17 | 22 | 237 |
| Prop. (%) | 5 | 8 | 9 | 7 | 12 | 11 | 8 | 8 | 10 | 6 | 7 | 9 | 100 |
| 2017 | 20 | 11 | 22 | 25 | 16 | 20 | 23 | 21 | 21 | 24 | 16 | 11 | 230 |
| Prop. (%) | 9 | 5 | 10 | 11 | 7 | 9 | 10 | 9 | 9 | 10 | 7 | 5 | 100 |
| 2018 | 10 | 10 | 21 | 23 | 20 | 23 | 22 | | | | | | 129 |
| Prop. (%) | 8 | 8 | 16 | 18 | 15 | 18 | 17 | | | | | | 100 |
| ICA | | | | | | | | | | | | | |
| 2011 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 2 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | 100 |
| 2012 | 4 | 4 | 8 | 8 | 18 | 12 | 12 | 6 | 2 | 11 | 4 | 10 | 99 |
| Prop. (%) | 4 | 4 | 8 | 8 | 19 | 12 | 12 | 6 | 2 | 11 | 4 | 10 | 100 |
| 2013 | 4 | 3 | 2 | 13 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | 25 |
| Prop. (%) | 16 | 12 | 8 | 52 | 12 | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| 2014 | 0 | 5 | 7 | - | - | 9 | - | 9 | 7 | | | | 37 |
| Prop. (%) | 0 | 14 | 19 | - | - | 24 | | 24 | 19 | | | | 100 |
| 2015 | - | - | - | - | - | 12 | 28 | 19 | 8 | - | - | - | 67 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - | 18 | 42 | 28 | 12 | - | - | - | 100 |
| 2016 | 8 | 9 | 3 | 8 | 9 | 10 | 8 | 12 | 8 | 7 | - | 0 | 82 |
| Prop. (%) | 10 | 10 | 4 | 10 | 10 | 12 | 10 | 15 | 10 | 9 | - | 0 | 100 |
| 2017 | 0 | 5 | 10 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 23 |
| Prop. (%) | 0 | 22 | 43 | 35 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | 7 | 13 | 15 | 15 | 17 | 22 | | | | | | 89 |
| Prop. (%) | - | 8 | 15 | 17 | 17 | 19 | 24 | | | | | | 100 |
| PLO | | | | | | | | | | | | | |
| 2011 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 3 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 62 | 38 |
| 2012 | 3 | 5 | 7 | 2 | 5 | 6 | 4 | 0 | 3 | 10 | 5 | 2 | 52 |
| Prop. (%) | 6 | 10 | 13 | 4 | 10 | 11 | 7 | 0 | 6 | 19 | 10 | 4 | 100 |

(Continua)

Tabela A1 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por mês, para todas as estações. (Continuação)

| Ano/Mês | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | T |
|-------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| PLO | | | | | | | | | | | | | |
| 2013 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7 |
| Prop. (%) | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| 2014 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 9 | 12 | 25 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 16 | 36 | 48 | 100 |
| 2015 | 12 | 0 | 3 | 2 | 17 | 11 | 7 | 7 | 4 | 3 | 5 | 5 | 76 |
| Prop. (%) | 16 | 0 | 4 | 3 | 22 | 14 | 9 | 9 | 5 | 4 | 7 | 7 | 100 |
| 2016 | 21 | 16 | 25 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | - | 7 | 86 |
| Prop. (%) | 24 | 19 | 29 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | - | 8 | 100 |
| 2017 | 9 | 12 | 5 | 6 | 19 | - | - | - | - | - | - | 4 | 55 |
| Prop. (%) | 16 | 22 | 9 | 11 | 35 | - | - | - | - | - | - | 7 | 100 |
| 2018 | 7 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7 |
| Prop. (%) | 100 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 |
| ROR | | | | | | | | | | | | | |
| 2014 | | | 5 | 11 | 0 | - | 0 | 3 | - | - | - | - | 19 |
| Prop. (%) | | | 26 | 58 | 0 | - | 0 | 16 | - | - | - | - | 100 |
| 2015 | - | - | - | - | 2 | 0 | 1 | 8 | 19 | 9 | 9 | 0 | 48 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | 4 | 0 | 2 | 16 | 40 | 19 | 19 | 0 | 100 |
| 2016 | 0 | - | 0 | 0 | 5 | 0 | 2 | 7 | 2 | 5 | 21 | 5 | 47 |
| Prop. (%) | 0 | - | 0 | 0 | 10 | 0 | 4 | 15 | 4 | 11 | 45 | 11 | 100 |
| 2017 | 5 | 10 | 14 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 | 11 | 13 | 76 |
| Prop. (%) | 7 | 13 | 18 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 20 | 14 | 17 | 100 |
| 2018 | 15 | 8 | 2 | 7 | 2 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 34 |
| Prop. (%) | 43 | 24 | 6 | 21 | 6 | 0 | 0 | - | - | - | - | - | 100 |
| HYO | | | | | | | | | | | | | |
| 2016 | | | | | | 12 | 2 | 2 | 7 | 3 | 3 | 7 | 3 |
| | | | | | | 10 | | | | 2 | | 2 | 21 |
| Prop. (%) | | | | | | 35 | 5 | 21 | 9 | 21 | 9 | 9 | 100 |
| | | | | | | 48 | 10 | 14 | 14 | 10 | 4 | 4 | 100 |
| 2017 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | - | 0 | 2 | 17 | 23 | 18 | - | - | - | - | - | 60 |
| Prop. (%) | - | - | 0 | 3 | 28 | 38 | 31 | - | - | - | - | - | 100 |
| CGR1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2016 | | | | | | | | | | | 5 | 21 | 26 |
| Prop. (%) | | | | | | | | | | | 19 | 81 | 100 |
| 2017 | 18 | 20 | 16 | 7 | 12 | 7 | 6 | 16 | 6 | 15 | 18 | 7 | 148 |
| Prop. (%) | 12 | 13 | 11 | 5 | 8 | 5 | 4 | 11 | 4 | 10 | 12 | 5 | 100 |
| 2018 | 7 | 9 | 16 | 4 | 14 | 11 | 13 | - | - | - | - | - | 74 |
| Prop. (%) | 9 | 12 | 22 | 5 | 19 | 15 | 18 | - | - | - | - | - | 100 |

(Continua)

Tabela A1 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por mês, para todas as estações. (Continuação)

| Ano/Mês | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | T |
|-------------|----|----|---|----|----|----|----|----|---|----|----|----|-----|
| CGR2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2017 | - | - | - | - | 2 | 5 | 5 | 14 | 5 | 9 | 22 | 23 | 85 |
| Prop. (%) | - | - | - | - | 2 | 6 | 6 | 16 | 6 | 11 | 26 | 27 | 100 |
| 2018 | 19 | 6 | 6 | 7 | 11 | 8 | 9 | | | | | | 66 |
| Prop. (%) | 29 | 9 | 9 | 11 | 17 | 12 | 14 | | | | | | |
| SPA | | | | | | | | | | | | | |
| 2017 | - | - | - | 11 | 10 | 6 | 8 | 6 | 4 | 7 | 4 | 5 | 61 |
| Prop. (%) | - | - | - | 18 | 16 | 10 | 13 | 10 | 7 | 11 | 7 | 8 | 100 |
| 2018 | 5 | 13 | 5 | 17 | 13 | 10 | 8 | | | | | | 71 |
| Prop. (%) | 7 | 18 | 7 | 24 | 18 | 14 | 12 | | | | | | 100 |

Tabela A2 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por estação, para todas as estações.

| Ano/Sazão | Verão DJF | Outono MAM | Inverno JJA | Priamvera SON | T |
|-------------|--------------|---------------|----------------|------------------|-----|
| CAS1 | | | | | |
| 2008 | 4 | 44 | 62 | 33 | 143 |
| Prop. (%) | 3 | 31 | 43 | 23 | 100 |
| 2009 | 29 | 73 | 71 | 55 | 228 |
| Prop. (%) | 13 | 32 | 31 | 24 | 100 |
| 2010 | 38 | 71 | 44 | 56 | 209 |
| Prop. (%) | 18 | 34 | 21 | 27 | 100 |
| 2011 | 33 | 65 | 39 | 53 | 190 |
| Prop. (%) | 17 | 34 | 21 | 28 | 100 |
| 2012 | 27 | 62 | 59 | 47 | 195 |
| Prop. (%) | 14 | 32 | 30 | 24 | 100 |
| 2013 | 27 | 65 | 66 | 33 | 191 |
| Prop. (%) | 14 | 34 | 35 | 17 | 100 |
| 2014 | 34 | 69 | 63 | 18 | 184 |
| Prop. (%) | 18 | 38 | 34 | 10 | 100 |
| 2015 | - | 13 | 64 | 44 | 121 |
| Prop. (%) | - | 11 | 53 | 36 | 100 |
| 2016 | 33 | - | 11 | 11 | 55 |
| Prop. (%) | 60 | - | 20 | 20 | 100 |
| 2017 | x | 15 | 13 | | 28 |
| Prop. (%) | x | 54 | 46 | | 100 |
| CAS2 | | | | | |
| 2010 | 20 | 52 | 43 | 41 | 156 |
| Prop. (%) | 13 | 33 | 28 | 26 | 100 |
| 2011 | 27 | 51 | 19 | 46 | 143 |
| Prop. (%) | 19 | 36 | 13 | 32 | 100 |
| 2012 | 22 | 60 | 35 | 52 | 169 |
| Prop. (%) | 13 | 35 | 21 | 31 | 100 |
| 2013 | 19 | 23 | 58 | 45 | 145 |
| Prop. (%) | 13 | 16 | 40 | 31 | 100 |
| 2014 | 22 | 71 | 48 | 6 | 147 |
| Prop. (%) | 15 | 48 | 33 | 4 | 100 |
| 2015 | 26 | 74 | 64 | 45 | 209 |
| Prop. (%) | 12 | 35 | 31 | 22 | 100 |
| 2016 | 47 | 65 | 65 | 54 | 231 |
| Prop. (%) | 20 | 28 | 28 | 24 | 100 |
| 2017 | 53 | 63 | 20 | 61 | 197 |
| Prop. (%) | 27 | 32 | 10 | 31 | 100 |
| 2018 | 31 | 64 | 45 | | 140 |
| Prop. (%) | 22 | 46 | 32 | | 100 |

(Continua)

Tabela A2 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por estação, para todas as estações. (Continuação)

| Ano/Sazão | Verão DJF | Outono MAM | Inverno JJA | Priamvera SON | T |
|------------|--------------|---------------|----------------|------------------|-----|
| ICA | | | | | |
| 2012 | 10 | 34 | 30 | 17 | 91 |
| Prop. (%) | 11 | 37 | 33 | 19 | 100 |
| 2013 | 17 | 18 | - | - | 35 |
| Prop. (%) | 49 | 51 | - | - | 100 |
| 2014 | 12 | 9 | 16 | - | 37 |
| Prop. (%) | 32 | 24 | 44 | - | 100 |
| 2015 | - | - | 59 | 8 | 67 |
| Prop. (%) | - | - | 88 | 12 | 100 |
| 2016 | 17 | 20 | 30 | 15 | 82 |
| Prop. (%) | 21 | 24 | 37 | 18 | 100 |
| 2017 | 5 | 18 | - | - | 23 |
| Prop. (%) | 22 | 78 | - | - | 100 |
| 2018 | 7 | 43 | 39 | - | 89 |
| Prop. (%) | 8 | 48 | 44 | - | 100 |
| PLO | | | | | |
| 2012 | 11 | 14 | 10 | 18 | 53 |
| Prop. (%) | 21 | 26 | 19 | 34 | 100 |
| 2013 | 10 | - | - | - | 10 |
| Prop. (%) | 100 | - | - | - | 100 |
| 2014 | - | - | - | 13 | 13 |
| Prop. (%) | - | - | - | 100 | 100 |
| 2015 | 24 | 22 | 25 | 12 | 83 |
| Prop. (%) | 29 | 27 | 30 | 14 | 100 |
| 2016 | 42 | 25 | 0 | 16 | 83 |
| Prop. (%) | 51 | 30 | 0 | 19 | 100 |
| 2017 | 28 | 30 | - | - | 58 |
| Prop. (%) | 48 | 52 | - | - | 100 |
| 2018 | 11 | - | - | - | 11 |
| Prop. (%) | 100 | - | - | - | 100 |
| ROR | | | | | |
| 2014 | | 16 | 0 | 3 | 19 |
| Prop. (%) | | 84 | 0 | 16 | 100 |
| 2015 | - | 2 | 9 | 37 | 48 |
| Prop. (%) | - | 4 | 19 | 77 | 100 |
| 2016 | 0 | 5 | 9 | 28 | 42 |
| Prop. (%) | 0 | 12 | 21 | 67 | 100 |
| 2017 | 26 | 15 | 0 | 31 | 72 |
| Prop. (%) | 36 | 21 | 0 | 43 | 100 |
| 2018 | 36 | 11 | 0 | - | 47 |
| Prop. (%) | 77 | 23 | 0 | - | 100 |

(Continua)

Tabela A2 - Número total (T) e Proporção (Prop.) de dias de tempo bom, selecionados por estação, para todas as estações. (Continuação)

| Ano/Sazão | Verão DJF | Outono MAM | Inverno JJA | Priamvera SON | T |
|-------------|--------------|---------------|----------------|------------------|------------|
| HYO | | | | | |
| 2016 | | | 14 12 | 17 8 | 31 20 |
| Prop. (%) | | | 45 60 | 55 40 | 100 100 |
| 2017 | - | - | - | - | - |
| Prop. (%) | - | - | - | - | - |
| 2018 | - | 19 | 41 | | 60 |
| Prop. (%) | - | 32 | 68 | | 100 |
| CGR1 | | | | | |
| 2017 | 59 | 23 | 29 | 39 | 150 |
| Prop. (%) | 39 | 15 | 19 | 27 | 100 |
| 2018 | 23 | 34 | 24 | | 81 |
| Prop. (%) | 28 | 42 | 30 | | 100 |
| CGR2 | | | | | |
| 2017 | - | 2 | 24 | 36 | 62 |
| Prop. (%) | - | 3 | 39 | 58 | 100 |
| 2018 | 48 | 24 | 17 | | 89 |
| Prop. (%) | 54 | 27 | 19 | | 100 |
| SPA | | | | | |
| 2017 | - | 21 | 20 | 15 | 56 |
| Prop. (%) | - | 38 | 36 | 26 | 100 |
| 2018 | 23 | 35 | 18 | | 76 |
| Prop. (%) | 30 | 46 | 24 | | 100 |

APÊNDICE B: CURVAS MÉDIAS MENSAIS/SAZONALIS PARA AS ESTAÇÕES CAS2, ICA, PLO, ROR, HYO, CGR1, CGR2 E SPA.

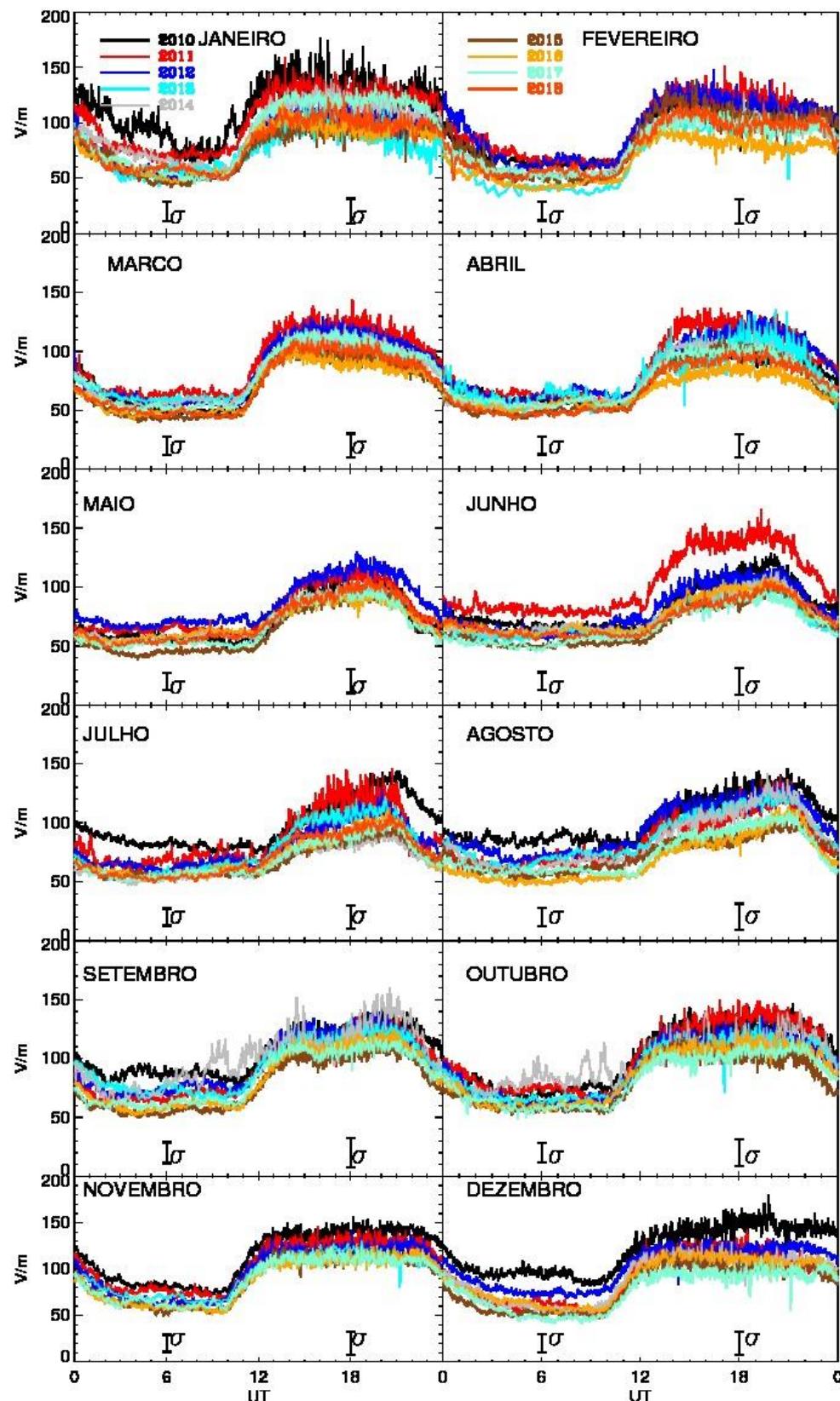


Figura B1: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação CAS2 durante dez anos (2010 - 2018). As barras de erro representam valores médios 1σ para os dez anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

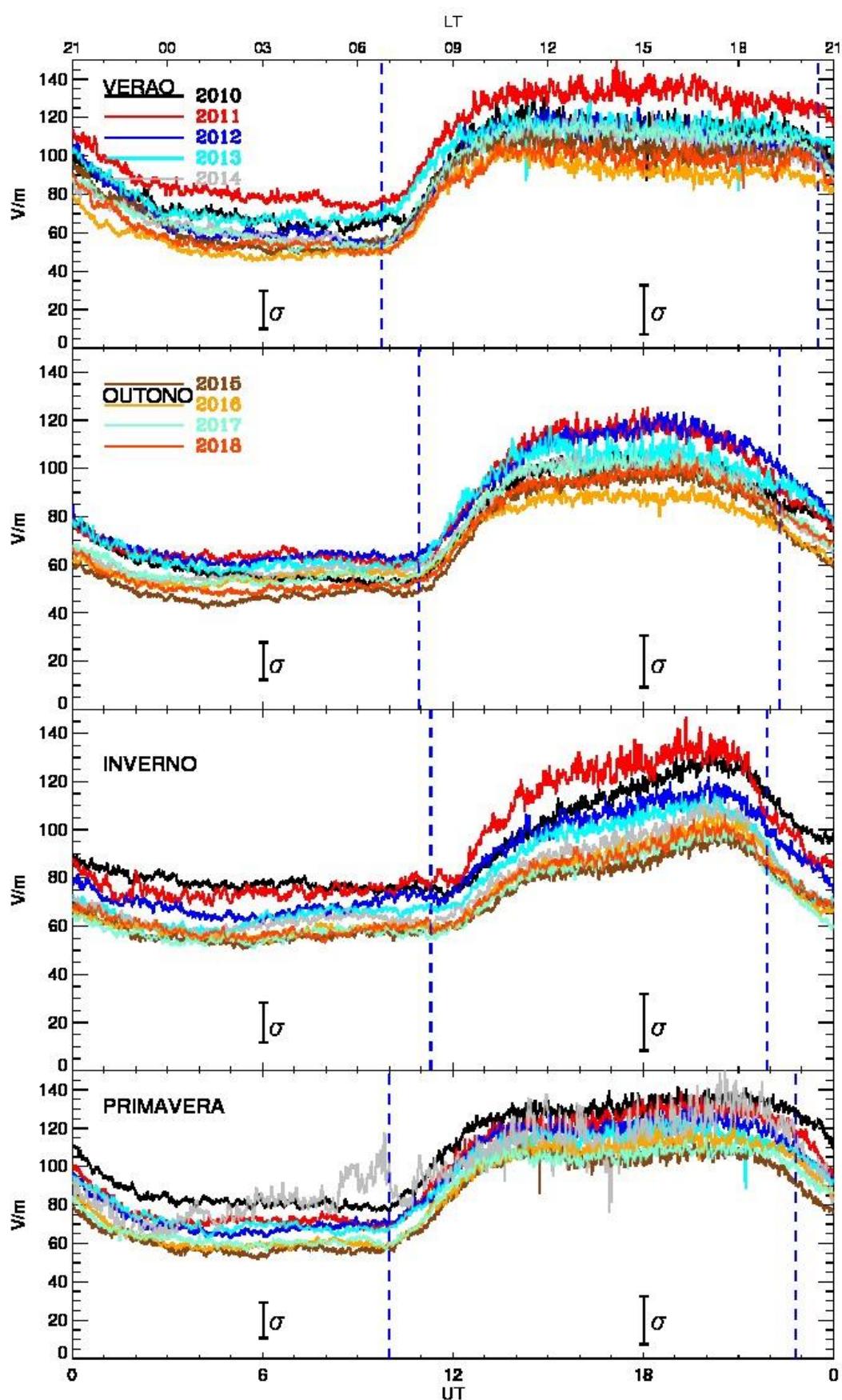


Figura B2: Como na figura B1 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

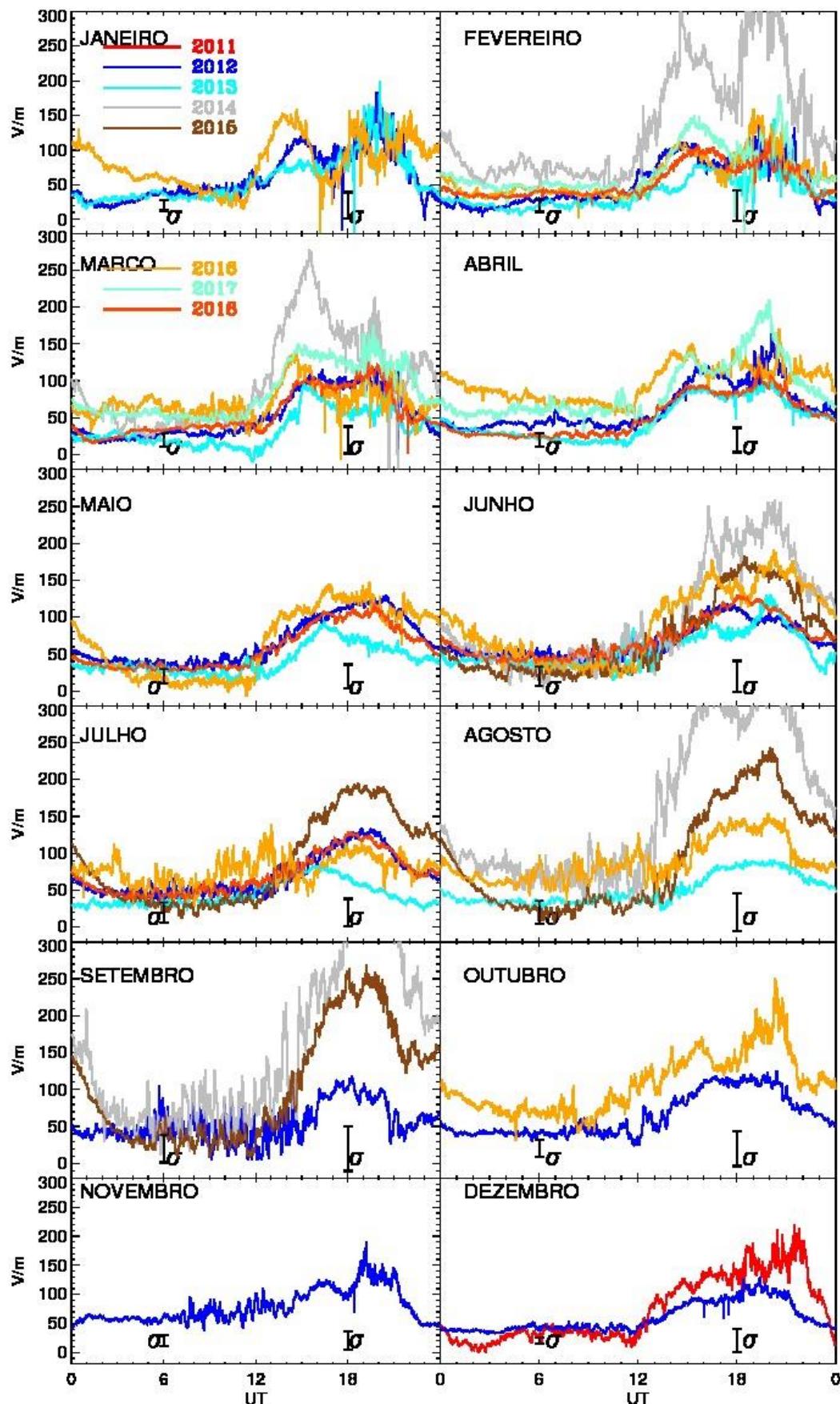


Figura B3: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação ICA durante sete anos (2012-2018). As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

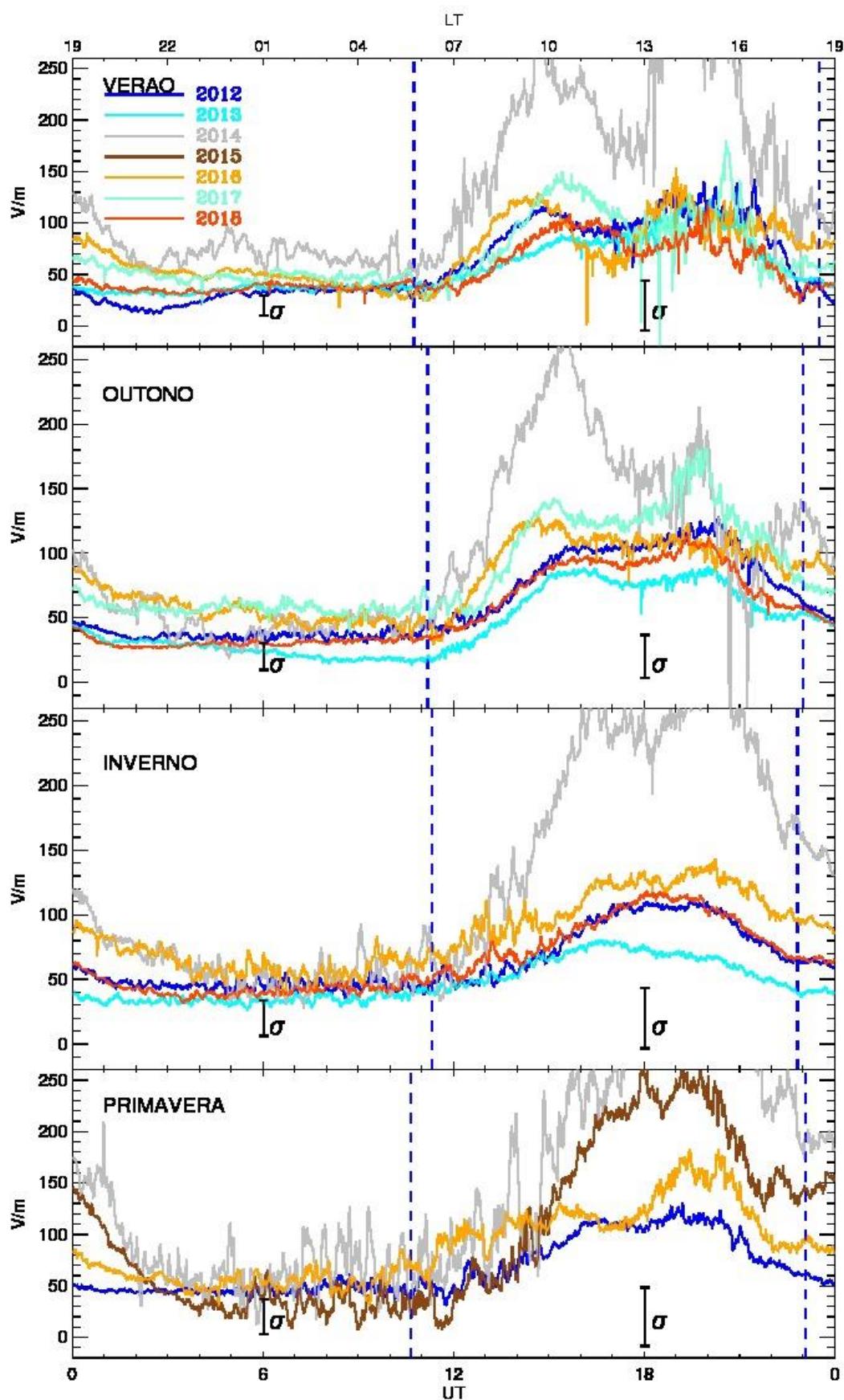


Figura B4: Como na Figura B3 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

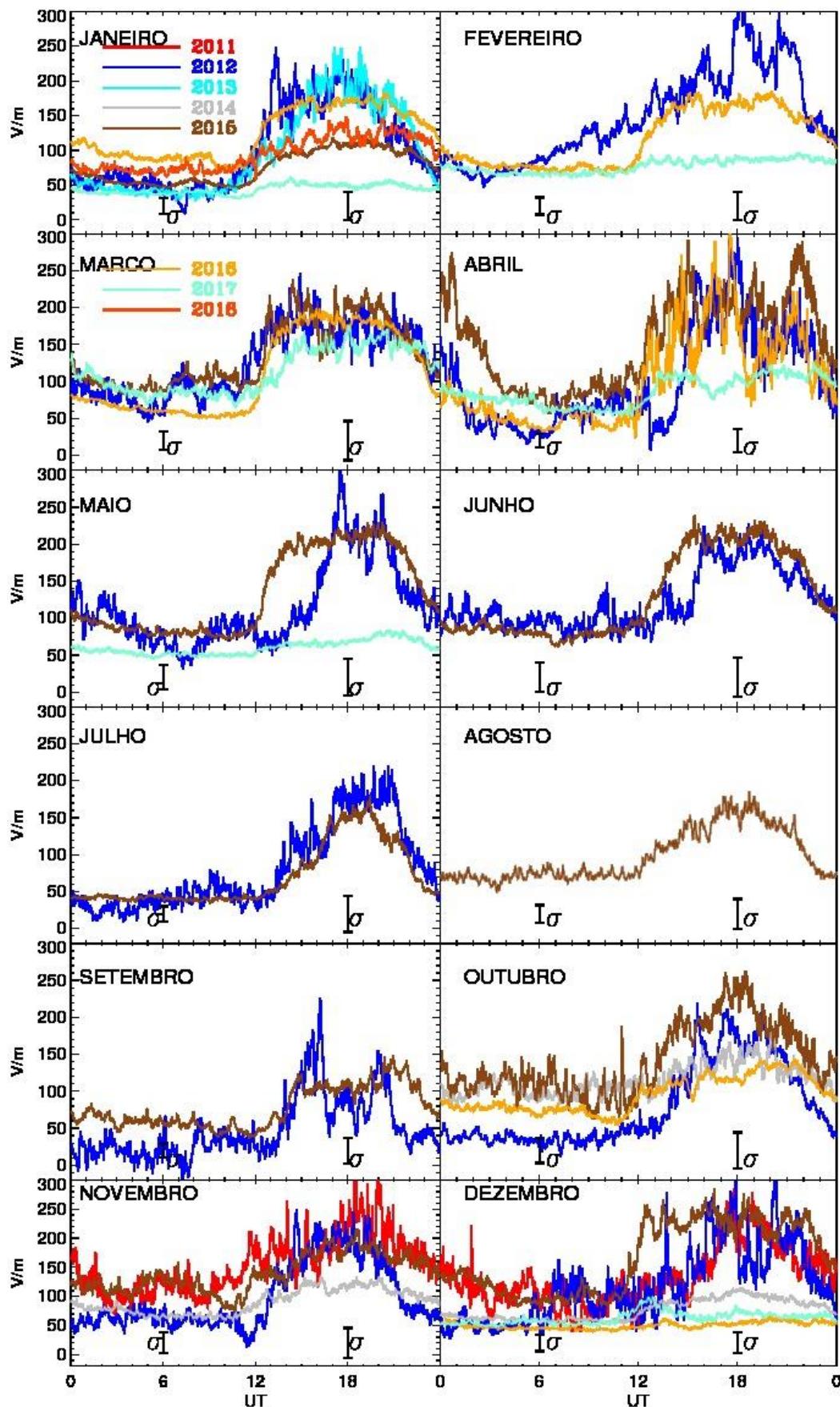


Figura B5: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação PLO durante sete anos (2012-2018). As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

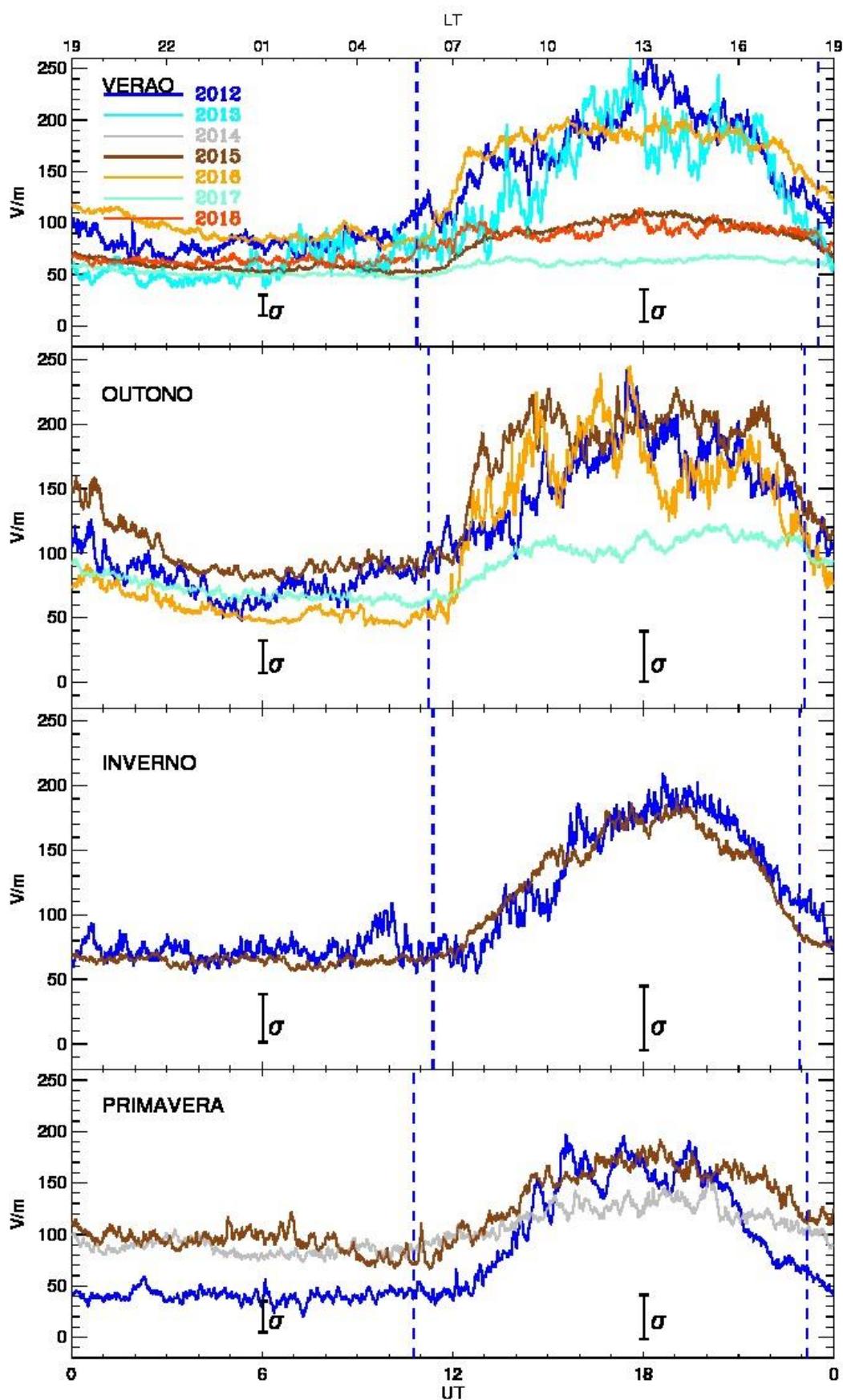


Figura B6: Como na Figura B5 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

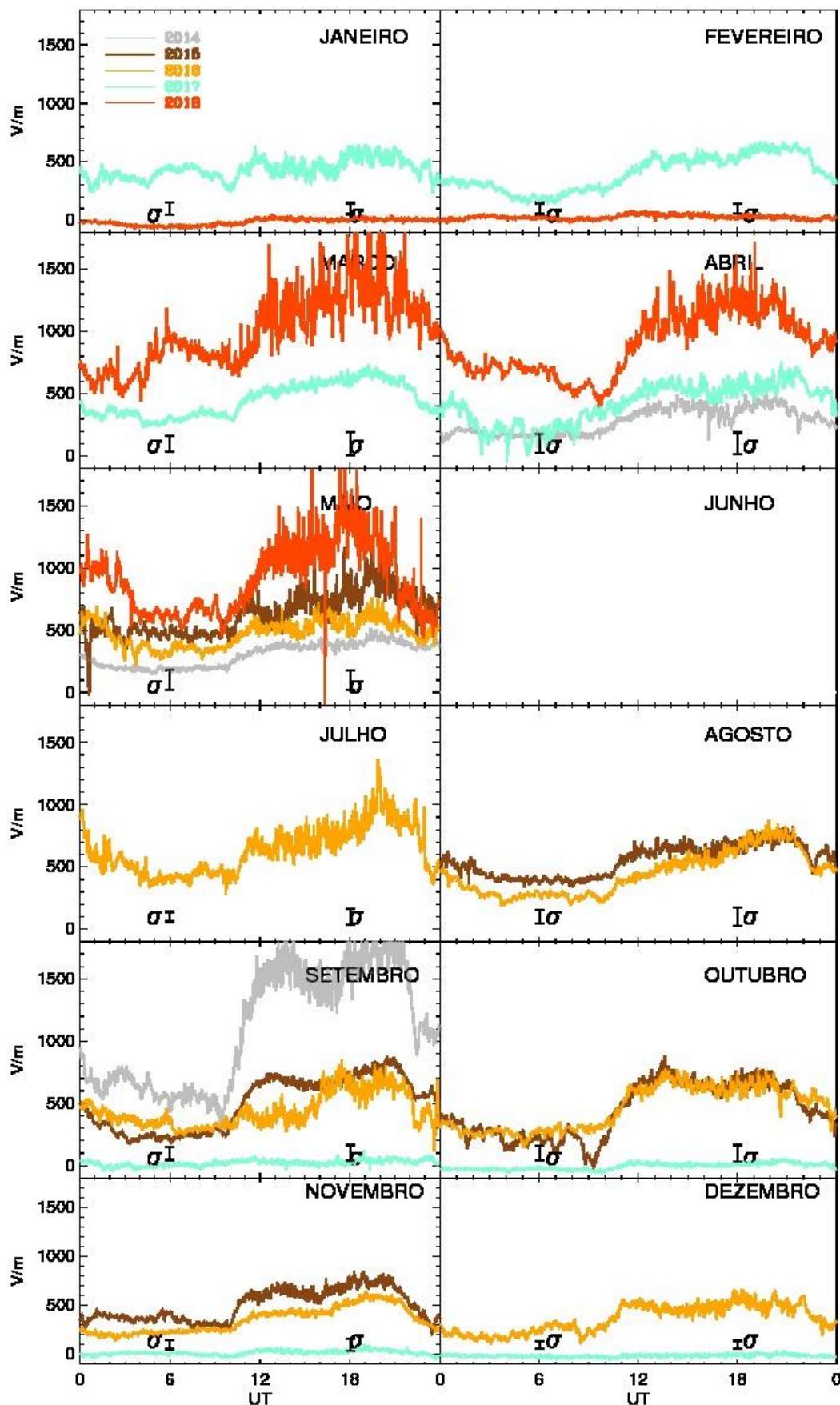


Figura B7: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação ROR durante cinco anos (2014 - 2018). As barras de erro representam valores médios 1σ para os quatro anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

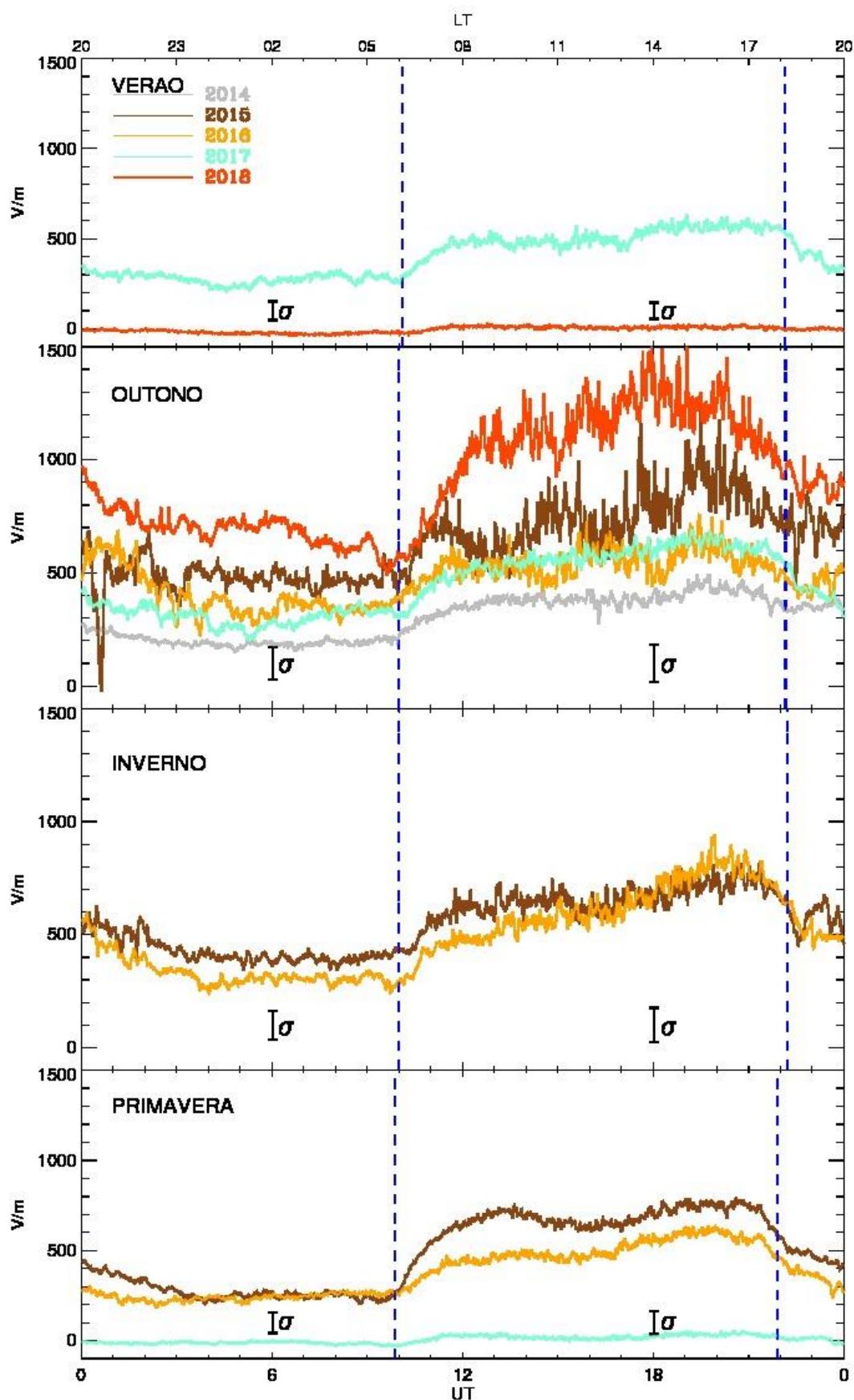


Figura B8: Como na figura B7 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

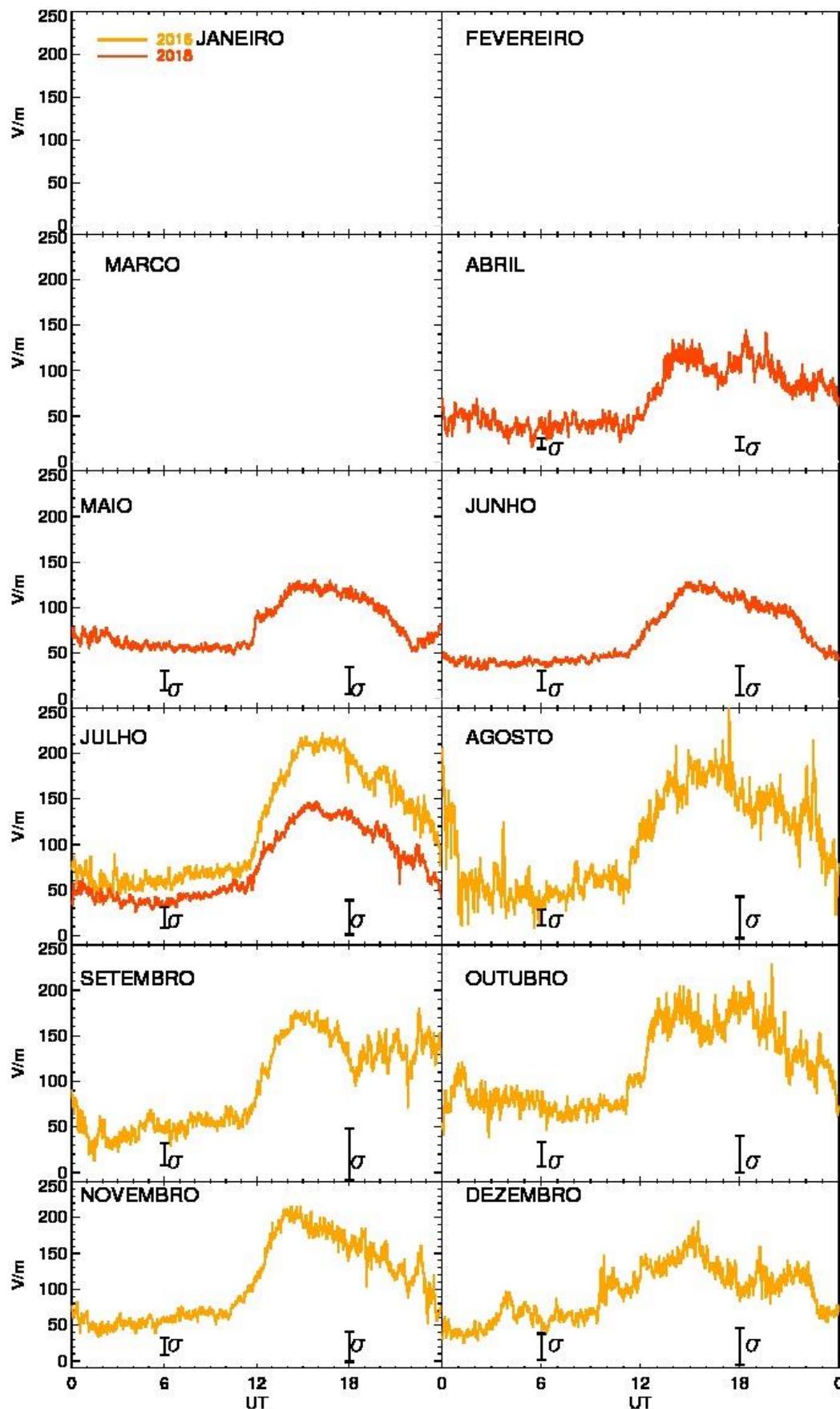


Figura B9: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação HYO durante 2016 e 2018. As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

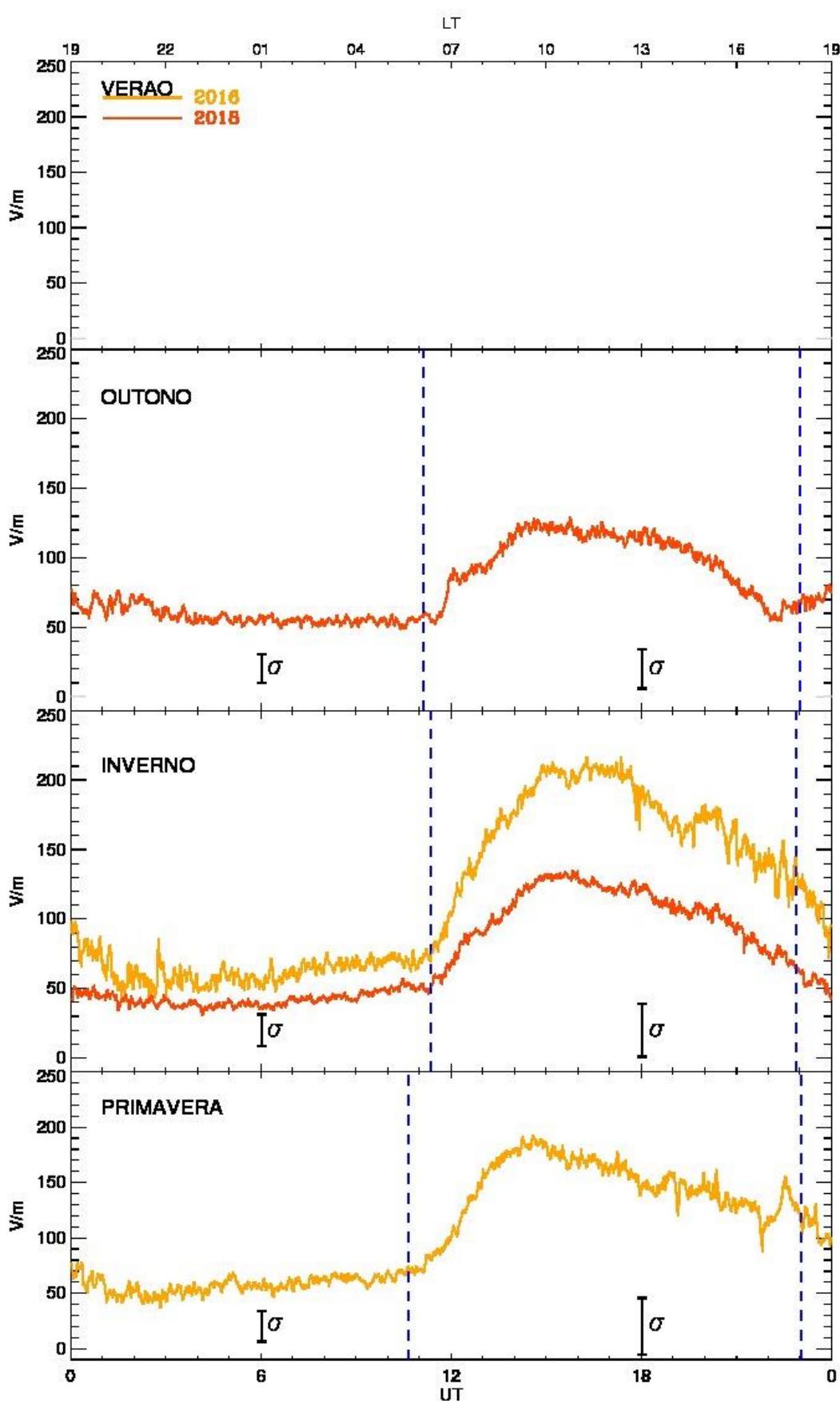


Figura B10: Como na figura B9 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

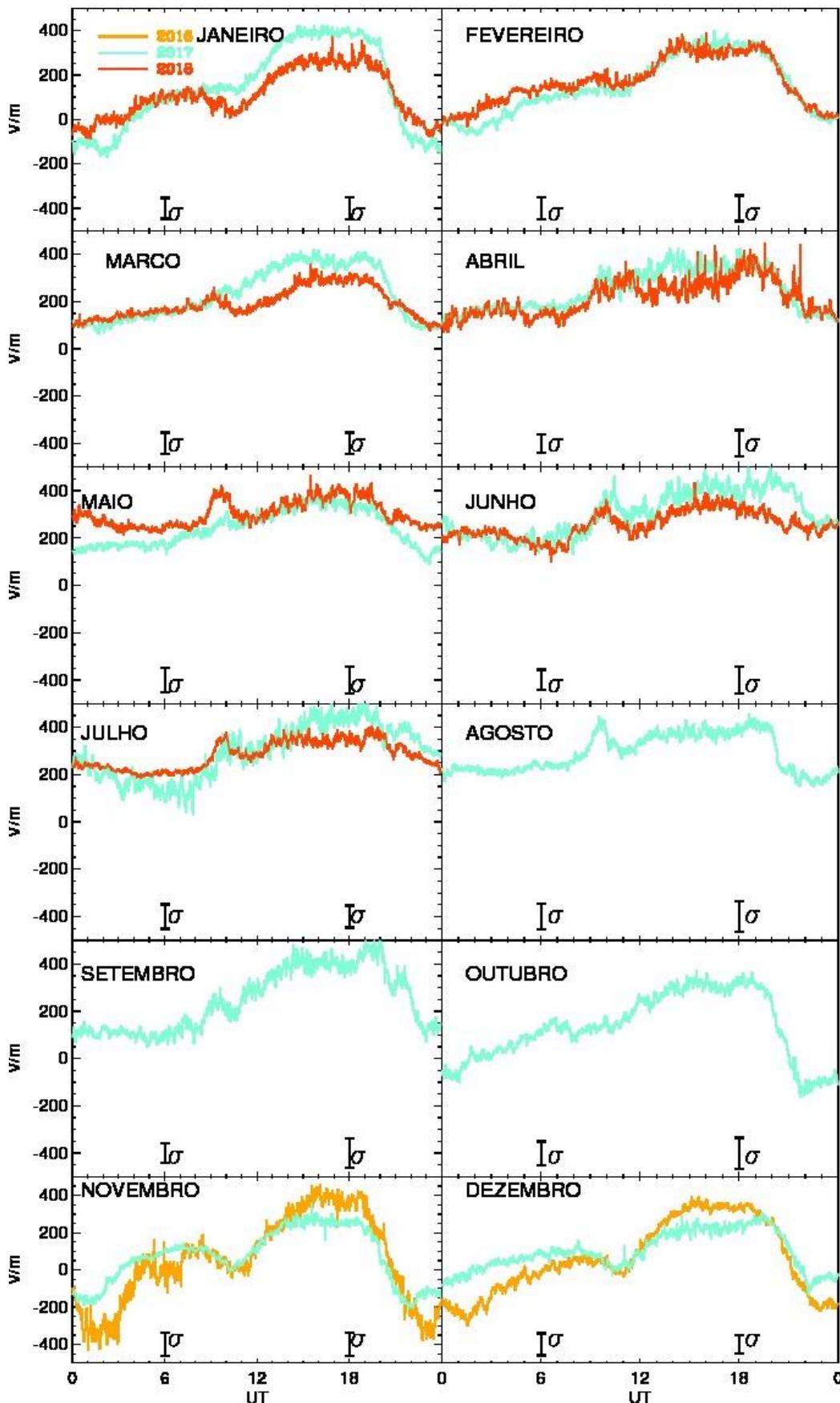


Figura B11: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação CGR1 durante 2016-2018. As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

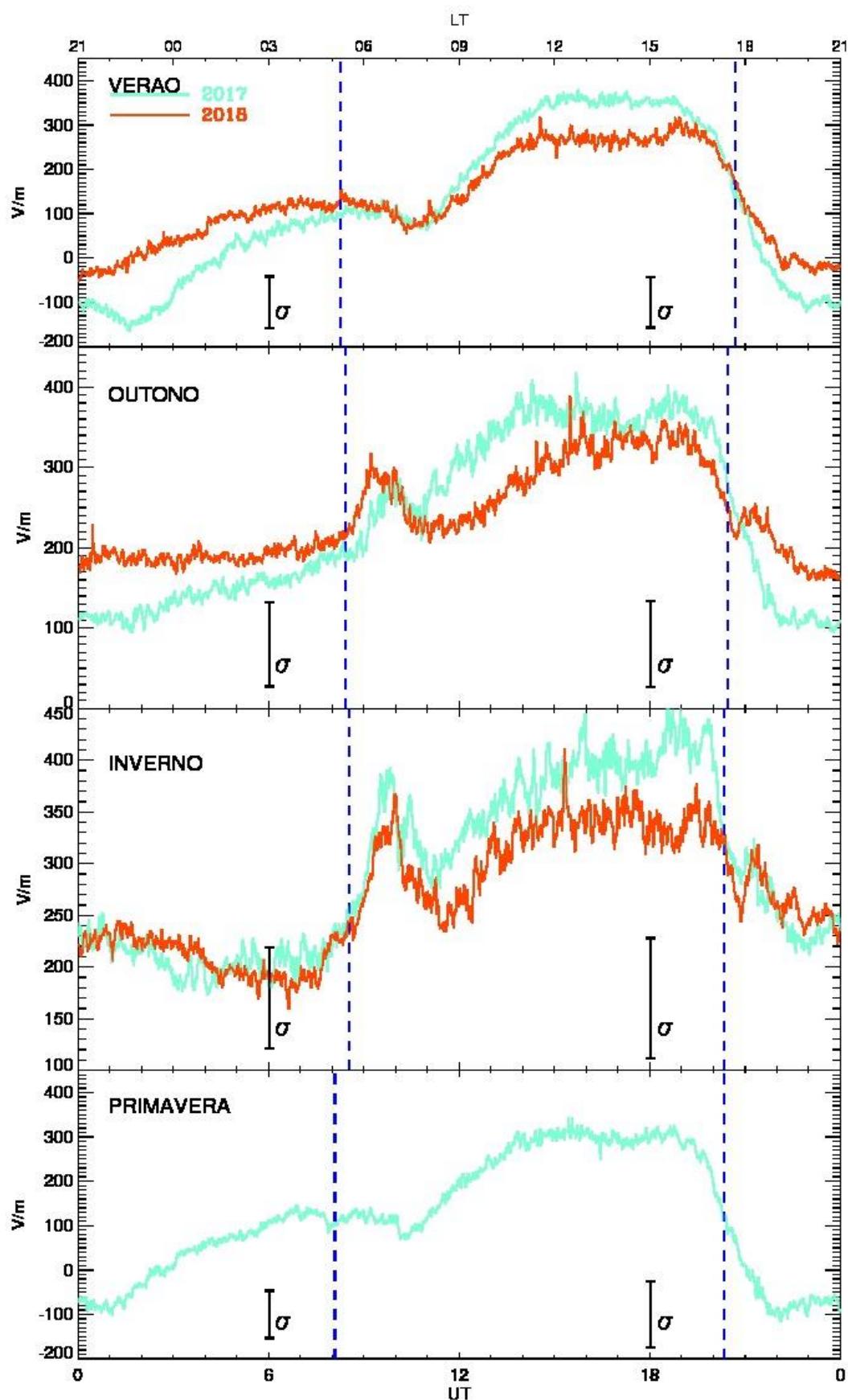


Figura B12: Como na figura B11 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

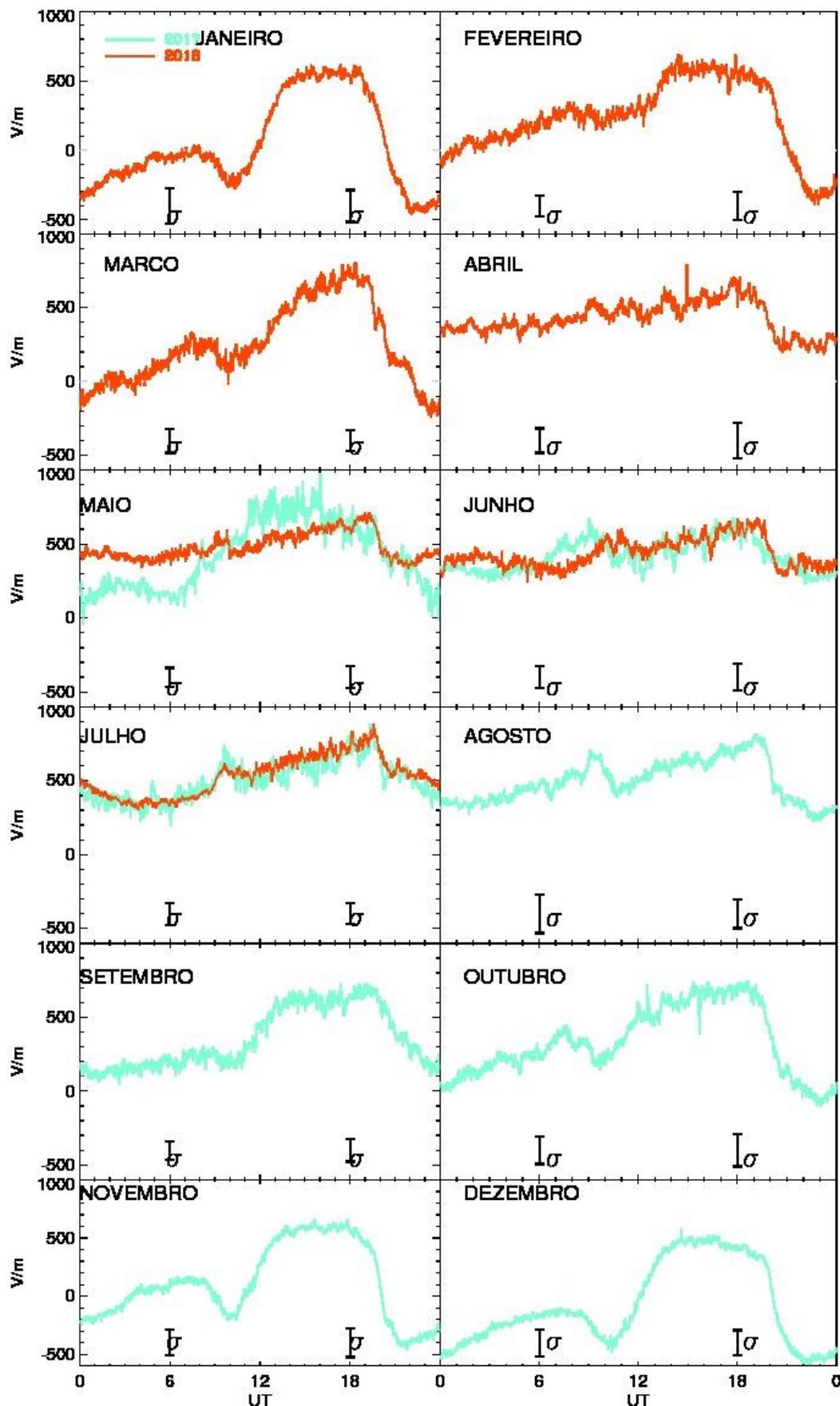


Figura B13: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação CGR2 durante 2017-2018. As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

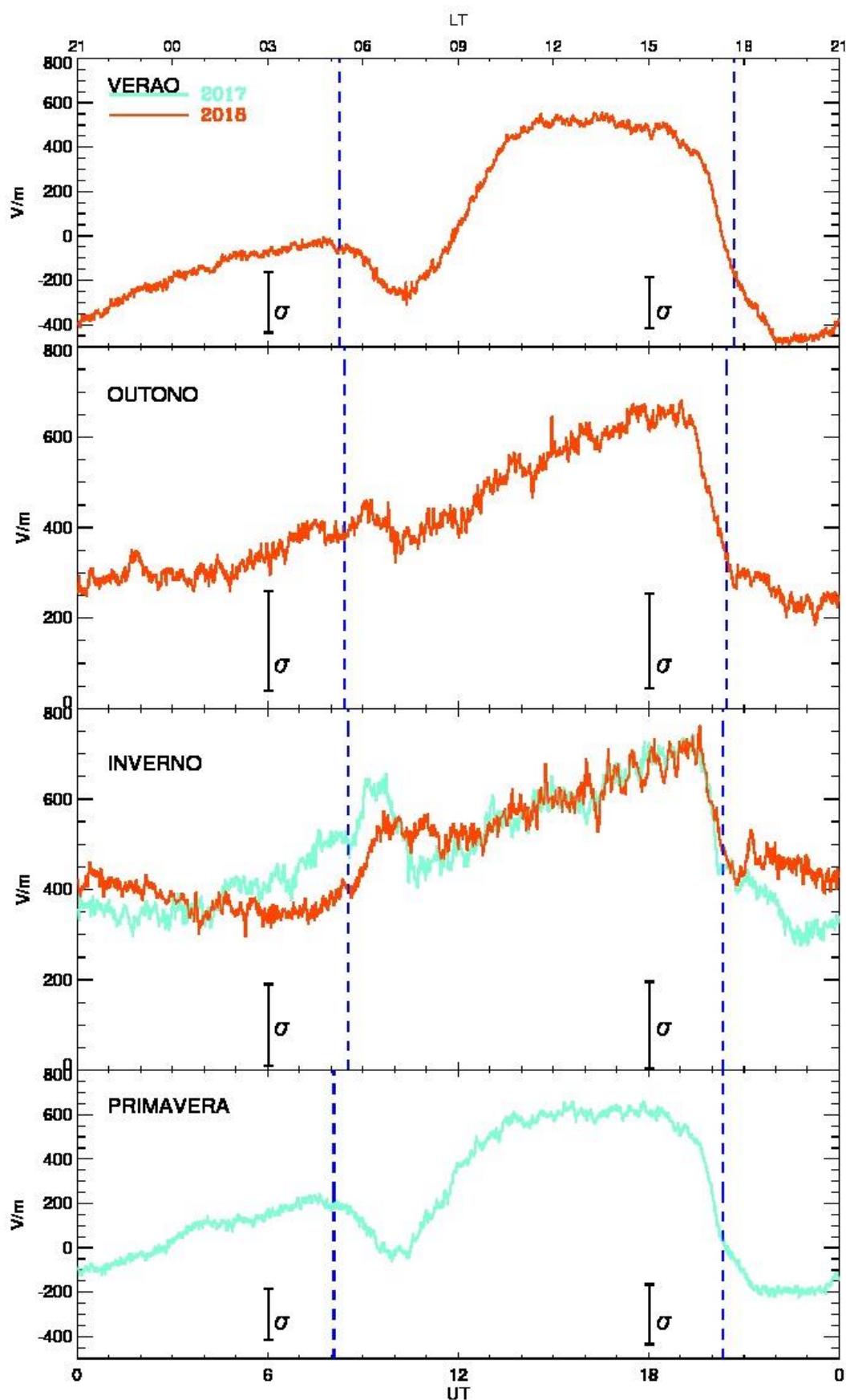


Figura B14: Como na figura B13 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

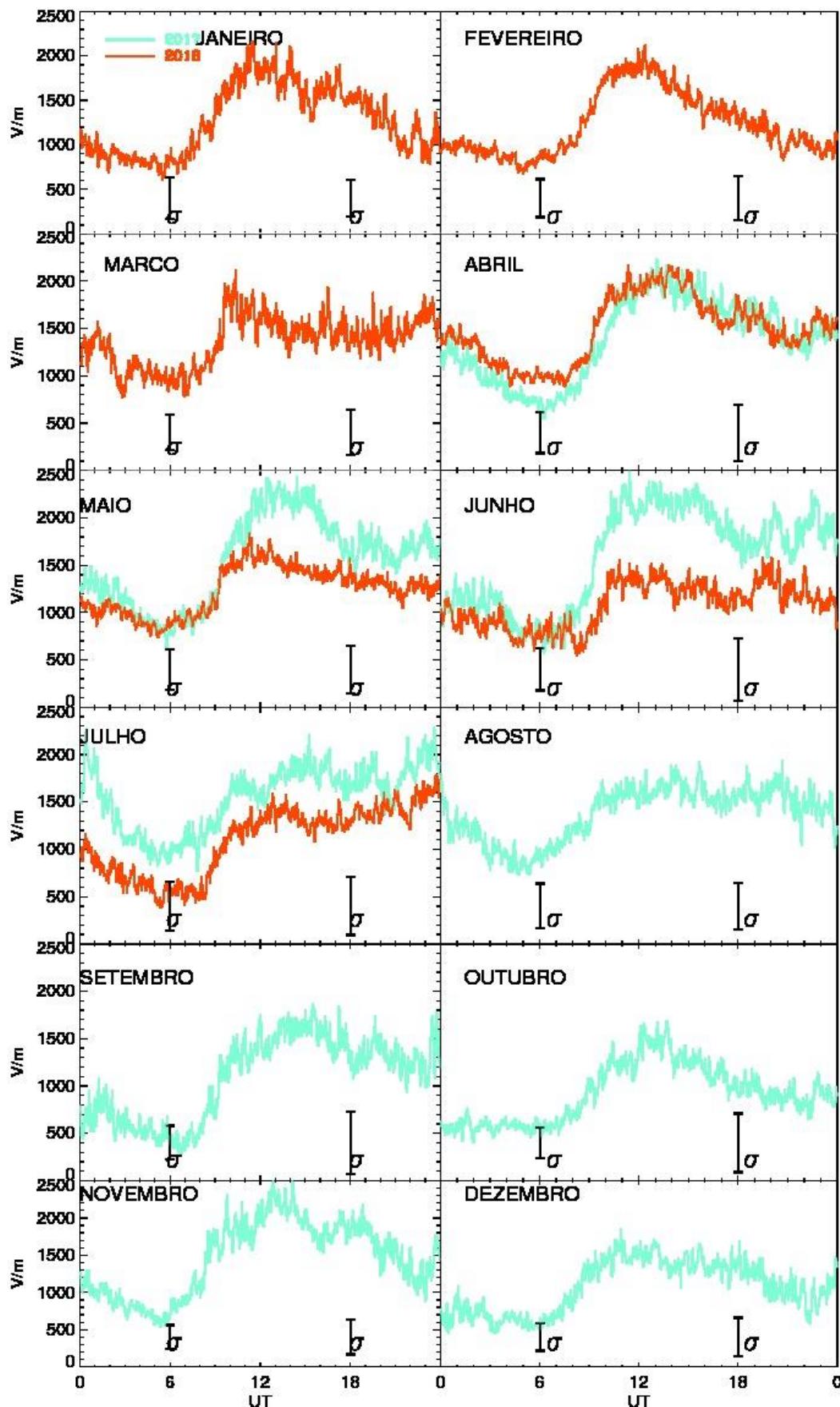


Figura B15: Variação diária média mensal do campo elétrico atmosférico na estação SPA durante 2017-2018. As barras de erro representam valores médios 1σ segundo a quantidade dos anos, no tempo do dia (à direita) e à noite (à esquerda).

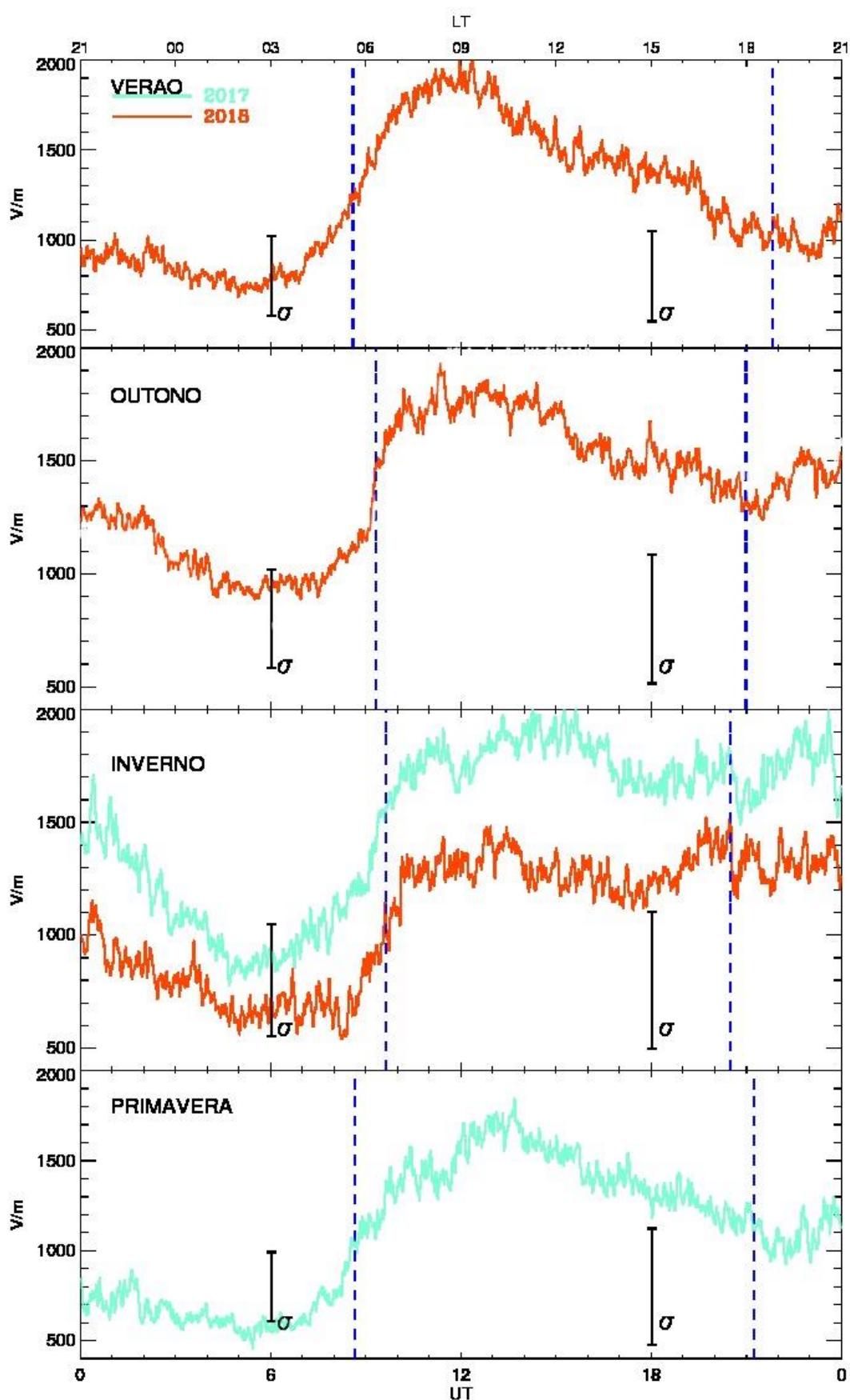


Figura B16: Como na figura B15 apenas para médias sazonais. As linhas verticais azuis indicam o nascer e o pôr do sol para cada sazão do ano.

APÊNDICE C: TABELA DE EVENTOS SOLARES E DECRÉSCIMOS FORBUSH

Tabela C1 – Lista de explosões solares.

| Nº | Data | Início (UT) | Classe | Kp (Período) | Dst (Período) |
|----|------------|-------------|--------|-----------------|------------------|
| 1 | 2010/05/07 | 7 | C2 | 3 | -20 |
| 2 | 2010/05/08 | 5 | M1 | 2 | -30 |
| 3 | 2010/05/08 | 12 | C1.7 | 2 | -30 |
| 4 | 2010/05/08 | 20 | C2.2 | 2 | -30 |
| 5 | 2010/07/09 | 9 | C2 | 2 | -15 |
| 6 | 2010/07/09 | 20 | C3.5 | 2 | -15 |
| 7 | 2011/03/23 | 2 | M1.7 | 3 | -15 |
| 8 | 2011/03/24 | 12 | M1 | 2 | 0 |
| 9 | 2011/03/24 | 17 | C9 | 2 | 0 |
| 10 | 2011/05/09 | 17 | C1.5 | 4 | 0 |
| 11 | 2011/05/09 | 21 | C5 | 4 | 0 |
| 12 | 2011/05/12 | 12 | C2 | 1 | 0 |
| 13 | 2011/11/22 | 4 | C4 | 3 | -20 |
| 14 | 2011/11/22 | 9 | C2 | 3 | -20 |
| 15 | 2011/11/22 | 18 | C3 | 3 | -20 |
| 16 | 2012/03/21 | 11 | C2 | 2 | -20 |
| 17 | 2012/03/23 | 17 | C6 | 5 (4 depois) | -70(4 depois) |
| 18 | 2012/03/24 | 9 | C3 | 5 (3 depois) | -70(3 depois) |
| 19 | 2012/04/30 | 7 | C4 | 1 | -10 |
| 20 | 2012/04/30 | 10 | C4 | 1 | -10 |
| 21 | 2012/05/01 | 4 | C4 | 2 | -10 |
| 22 | 2012/05/02 | 1 | C2 | 3 | -10 |
| 23 | 2012/05/02 | 11 | C3 | 3 | -10 |
| 24 | 2012/05/02 | 18 | C2 | 3 | -10 |
| 25 | 2012/05/02 | 20 | C2 | 3 | -10 |
| 26 | 2012/05/03 | 16 | C2 | 3 | -10 |
| 27 | 2012/05/04 | 15 | C2 | 1 | -10 |
| 28 | 2012/05/04 | 19 | C2 | 1 | -10 |
| 29 | 2012/05/05 | 9 | C6 | 5(4) | -40(4) |
| 30 | 2012/05/05 | 13 | M1 | 5(4) | -40(4) |
| 31 | 2012/05/05 | 18 | C4 | 5(4) | -40(4) |
| 32 | 2012/05/05 | 23 | M1 | 5(4) | -40(4) |
| 33 | 2012/05/10 | 4 | M5 | 4 | -15 |
| 34 | 2012/05/10 | 20 | M2 | 4 | -15 |
| 35 | 2012/05/13 | 4 | C4 | 4 | -45 |
| 36 | 2012/05/13 | 8 | C6 | 4 | -45 |
| 37 | 2012/07/27 | 17 | M3 | 2 | 20 |
| 38 | 2012/07/28 | 20 | M6 | 4 | 30 |
| 39 | 2012/07/29 | 6 | M2 | 2 | -30 |
| 40 | 2012/08/25 | 2 | C2 | 3 | -20 |
| 41 | 2012/08/30 | 12 | M1 | 6(4) | -70(4) |
| 42 | 2012/09/08 | 18 | M1.5 | 3 | -25 |
| 43 | 2012/09/09 | 22 | M1 | 1 | -10 |
| 44 | 2012/09/18 | 10 | C1 | 4 | -40 |
| 45 | 2012/09/19 | 15 | C2 | 4 | -40 |

(Continua)

Tabela C1 – Lista de explosões solares. (Continuação)

| Nº | Data | Início (UT) | Classe | Kp (Período) | Dst (Período) |
|----|------------|-------------|--------|-----------------|------------------|
| 46 | 2012/09/23 | 15 | C1.5 | 3 | 20 |
| 47 | 2012/11/21 | 7 | M1 | 4 | -40 |
| 48 | 2012/11/21 | 15 | M3 | 4 | -40 |
| 49 | 2012/12/10 | 5 | C5 | 1 | 10 |
| 50 | 2013/03/05 | 7 | M1 | 2 | -10 |
| 51 | 2013/03/11 | 16 | C1.5 | 2 | -10 |
| 52 | 2013/03/12 | 10 | C2 | 4 | -10 |
| 53 | 2013/03/20 | 1 | C5 | 4 | -40 |
| 54 | 2013/03/21 | 22 | M1.5 | 4 | -40 |
| 55 | 2013/06/09 | 2 | C4 | 3 | -10 |
| 56 | 2013/06/17 | 8 | C2 | 4 | -40 |
| 57 | 2013/06/18 | 2 | C2 | 4 | -40 |
| 58 | 2013/06/19 | 9 | C8 | 4 | -40 |
| 59 | 2013/08/11 | 22 | C8 | 4 | -20 |
| 60 | 2013/08/12 | 10 | M1 | 5(4) | -30(5) |
| 61 | 2013/08/17 | 18 | M3 | 5 | -30 |
| 62 | 2013/08/22 | 5 | C3 | 4 | -20 |
| 63 | 2014/03/09 | 13 | M1 | 4 | -40 |
| 64 | 2014/03/12 | 11 | M2 | 4 | -40 |
| 65 | 2014/03/12 | 22 | M9 | 4 | -40 |
| 66 | 2014/03/18 | 5 | C3 | 4 | -20 |
| 67 | 2014/03/18 | 15 | C4 | 4 | -20 |
| 68 | 2014/03/18 | 22 | C4 | 4 | -20 |
| 69 | 2014/03/19 | 6 | M1 | 4 | -20 |
| 70 | 2014/03/19 | 11 | C4 | 4 | -20 |
| 71 | 2014/03/19 | 16 | C3 | 4 | -20 |
| 72 | 2014/03/20 | 1 | C9 | 4 | -20 |
| 73 | 2014/03/20 | 3 | M1.5 | 4 | -20 |
| 74 | 2014/03/21 | 10 | C2.5 | 4 | -20 |
| 75 | 2014/03/22 | 7 | M1 | 4 | -20 |
| 76 | 2014/04/14 | 4 | C7 | 4 | -20 |
| 77 | 2014/04/14 | 7 | C5 | 4 | -20 |
| 78 | 2014/04/15 | 3 | C4 | 4 | -20 |
| 79 | 2014/04/15 | 9 | C8 | 4 | -20 |
| 80 | 2014/04/15 | 18 | C7 | 4 | -20 |
| 81 | 2014/04/23 | 1 | C4 | 3 | -20 |
| 82 | 2014/04/23 | 12 | C5 | 3 | -20 |
| 83 | 2014/04/24 | 10 | C3 | 3 | -20 |
| 84 | 2014/04/24 | 21 | C2 | 3 | -20 |
| 85 | 2014/04/25 | 1 | X1.5 | 3 | -20 |
| 86 | 2014/05/13 | 22 | C7 | 2 | 10 |
| 87 | 2014/05/14 | 13 | C8 | 2 | 10 |
| 88 | 2014/07/08 | 16 | M6 | 3 | -30 |
| 89 | 2014/12/17 | 4 | M9 | 3 | -30 |
| 90 | 2014/12/18 | 21 | M8 | 3 | -30 |
| 91 | 2014/12/30 | 6 | C2.5 | 4 | -40 |

(Continua)

Tabela C1 – Lista de explosões solares. (Continuação)

| Nº | Data | Início (UT) | Classe | Kp (Período) | Dst (Período) |
|-----|------------|-------------|--------|-----------------|------------------|
| 92 | 2015/03/11 | 7 | M3 | 4 | -20 |
| 93 | 2015/03/11 | 16 | X2 | 4 | -20 |
| 94 | 2015/03/12 | 4 | M3 | 4 | -20 |
| 95 | 2015/03/12 | 11 | M1.5 | 4 | -20 |
| 96 | 2015/03/12 | 21 | M2 | 4 | -20 |
| 97 | 2015/03/13 | 4 | M1 | 6(4) | -200(4) |
| 98 | 2015/03/13 | 6 | M2 | 6(4) | -200(4) |
| 99 | 2015/04/04 | 23 | C4 | 3 | -20 |
| 100 | 2015/04/05 | 21 | C3 | 3 | -20 |
| 101 | 2015/04/06 | 18 | C3 | 5(4) | -40(4) |
| 102 | 2015/06/02 | 6 | C2 | 4 | -20 |
| 103 | 2015/06/04 | 9 | C8 | 4 | -20 |
| 104 | 2015/06/13 | 7 | M1.5 | 4 | -20 |
| 105 | 2015/06/14 | 1 | M2 | 4 | -20 |
| 106 | 2015/07/19 | 9 | C2 | 5(4) | -80(4) |
| 107 | 2015/08/30 | 2 | M1.5 | 4 | -40 |
| 108 | 2015/08/31 | 5 | C2 | 4 | -40 |
| 109 | 2015/09/27 | 10 | M2 | 4 | -40 |
| 110 | 2015/09/28 | 3 | M4 | 4 | -40 |
| 111 | 2015/09/28 | 14 | M8 | 4 | -40 |
| 112 | 2015/11/21 | 13 | C3 | 3 | -10 |
| 113 | 2015/11/22 | 1 | C5 | 3 | -10 |
| 114 | 2015/12/16 | 8 | C6 | 5(4) | -150(4) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C2 – Lista de eventos de prótons solares.

| Evento de Prótons Solares (>=100 MeV) | | | Ejeção de Massa Coronal Associada | | |
|--|------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Ano | Inicio Data/tempo[U T] | Fluxo Prótons (Prótons/cm ² - day-sr) | Primeiro C2 Data/tempo [UT] | Central PA (deg) | Velocidade Linear (km/s) |
| 2011 | Mar 21/04 | 8.4e+03 | Mar 21/02:24 | Halo | 1341 |
| 2011 | Set 23/02 | 7.7e+03 | Set 23/00:48 | 105 | 1116 |
| 2012 | Jan 27/18 | 1.6e+05 | Jan 27/18:27 | Halo | 2508 |
| 2012 | Mai 17/02 | 3.2e+05 | Mai 17/01:48 | Halo | 1582 |
| 2012 | Jul 12/17 | 3.7e+03 | Jul 12/16:48 | Halo | 885 |
| 2012 | Jul 19/07 | 1.9e+04 | Jul 19/05:24 | Halo | 1631 |
| 2012 | Jul 23/07 | 2.9e+04 | Jul 23/02:36 | Halo | 2003 |
| 2012 | Set 28/01 | 5.0e+03 | Set 28/00:12 | Halo | 947 |
| 2013 | Abr 11/08 | 7.0e+04 | Abr 11/07:24 | Halo | 861 |
| 2013 | Mai 15/12 | 2.8e+03 | Mai 15/01:48 | Halo | 360 |
| 2013 | Mai 22/14 | 9.4e+04 | Mai 22/13:25 | Halo | 1466 |
| 2013 | Set 30/02 | 6.5e+03 | Set 29/22:12 | Halo | 1179 |
| 2014 | Jan 06/08 | 9.4e+04 | Jan 06/08:00 | Halo | 1402 |
| 2014 | Jan 07/19 | 6.1e+04 | Jan 07/18:24 | Halo | 1830 |
| 2014 | Abr 18/13 | 1.3e+04 | Abr 18/13:25 | Halo | 1203 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C3 – Lista de Decréscimos Forbush.

| Nº | Data do Início | MagnM | B(max) | Bz(min) | V(max) | Dst(min) |
|----|------------------------|-------|--------|---------|--------|----------|
| 1 | 2011/06/22 03:00:00 | 4.4 | 10.5 | -5.3 | 661.0 | -26.0 |
| 2 | 2011/09/26 12:35:00 | 5.6 | 34.2 | -16.4 | 704.0 | -101.0 |
| 3 | 2012/07/14 18:09:00 | 8.2 | 27.3 | -17.7 | 667.0 | -133.0 |
| 4 | 2012/06/16 20:19:00 | 4.8 | 40.1 | -16.0 | 519.0 | -86.0 |
| 5 | 2012/11/12 23:11:00 | 4.5 | 22.8 | -17.5 | 454.0 | -109.0 |
| 6 | 2012/11/23 21:51:00 | 4.2 | 15.1 | -6.9 | 409.0 | -42.0 |
| 7 | 2013/03/17 05:59:00 | 5.0 | 17.8 | -14.0 | 725.0 | -132.0 |
| 8 | 2013/04/13 22:54:00 | 5.3 | 12.9 | -4.5 | 516.0 | -16.0 |
| 9 | 2013/06/23 04:26:00 | 6.0 | 7.6 | -5.0 | 697.0 | -49.0 |
| 10 | 2013/10/02 01:55:00 | 4.2 | 22.2 | -14.0 | 629.0 | -67.0 |
| 11 | 2014/06/07 16:52:00 | 4.5 | 26.0 | -8.7 | 616.0 | -38.0 |
| 12 | 2014/12/21 19:11:00 | 7.0 | 16.7 | -15.5 | 429.0 | -51.0 |
| 13 | 2015/03/17 04:45:00 | 6.6 | 31.5 | -24.1 | 683.0 | -223.0 |
| 14 | 2015/06/22 18:33:00 | 10.4 | 37.7 | -26.3 | 742.0 | -204.0 |
| 15 | 2015/08/25 18:00:00 | 4.1 | 16.3 | -13.1 | 469.0 | -77.0 |
| 16 | 2015/11/06 18:18:00 | 4.0 | 19.4 | -10.3 | 677.0 | -96.0 |
| 17 | 2015/12/31 00:50:00 | 7.3 | 16.9 | -16.1 | 485.0 | -110.0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.