

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

Gabriela de Sousa Felix Neves

**DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS EM ESCALA GLOBAL, ASSOCIADOS A *FLARES*
NO PERÍODO DE MÁXIMA ATIVIDADE SOLAR**

***IONOSPHERIC DISTURBANCES ON A GLOBAL SCALE DUE TO SOLAR
FLARE DURING MAXIMUM SOLAR ACTIVITY***

São José dos Campos, SP
2026

Gabriela de Sousa Felix Neves

Distúrbios ionosféricos em escala global, associados a *flares* no período de máxima atividade solar

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Astronomia e Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

Coorientador: Prof. Dr. Valdir Gil Pillat

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Neves, Gabriela de Sousa Felix

Distúrbios ionosféricos em escala global, associados a flares no período de máxima atividade solar / Gabriela de Sousa Felix Neves; orientador, Paulo Roberto Fagundes; co-orientador Valdir Gil Pillat. - São José dos Campos, SP, 2026.

127 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Ionosfera. 3. Solar Flare. 4. Campo geomagnético. I. Fagundes, Paulo Roberto, orient. II. Pillat, Valdir Gil, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Gabriela de Sousa Felix Neves, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 17 de Março de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIELA DE SOUSA FELIX NEVES
Data: 17/03/2026 09:09:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



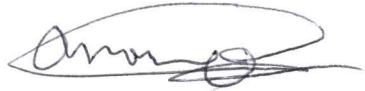

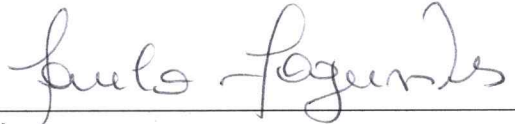
Autor(a) da Obra

Data da defesa: 24 / 02 / 2026

GABRIELA DE SOUSA FELIX NEVES

**“DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS EM UMA ESCALA GLOBAL DEVIDO A SOLAR FLARE
DURANTE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA.”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Tardelli	
Prof. Dr. Alexandre Alvares Pimenta – INPE	
Prof. Dr. Arian Ojeda González	
Prof. Dr. Valdir Gil Pillat	
Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes	

Prof.^a Dr.^a Juliana Ferreira Strixino

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 24 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida, por ter me concedido as forças necessárias para chegar até aqui e concluir todo este processo.

Agradeço as pessoas que puderam fazer essa etapa ser vivida, a aqueles que estiveram ao meu lado durante esta caminhada desde me dando coragem de me matricular no Mestrado, em especial as mulheres da minha família, minha mãe Ana e avó Gertrudes (*in memory*), pois sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço meu orientador e professor Paulo Roberto Fagundes pela imensa paciência, pelo apoio, confiança e por ter me aceitado como orientanda, guiando-me ao longo de todo o percurso acadêmico. Fui extremamente feliz durante esse processo graças à sua enorme generosidade. E ao coorientador Prof. Dr. Valdir Gil Pillat, agradeço a orientação, atenção, paciência, comentários e sugestões, além da disposição de sempre em ajudar, especialmente no suporte tecnológico, que foi essencial ao longo deste percurso.

Agradeço aos alunos e professores do laboratório 91 que contribuíram de alguma forma na minha formação. Em especial a Sheila e a faxineira Terezinha, que chegaram no meio desse processo e que ajudaram como puderam e tornaram mais leves os dias. À banca examinadora deste trabalho, meu sincero agradecimento pela cuidadosa avaliação, pelas valiosas sugestões e pelo carinho demonstrado durante a análise desta dissertação.

Agradeço, a Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, pela oportunidade de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia (PPGFA). Finalizo agradecendo o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Cnpq), a bolsa de Mestrado.

RESUMO

Erupções solares (*solar flares* – SFs) são fenômenos que emitem intensa radiação eletromagnética, especialmente nas faixas de raios X (RX) e extremo ultravioleta (EUV), capazes de provocar distúrbios ionosféricos súbitos (SID - *sudden ionospheric disturbances*) e perturbações geomagnéticas em escala global. Durante períodos de atividade solar máxima, esses eventos aumentam a frequência e a intensidade, fazendo com que possa haver consequências sobre sistemas tecnológicos. Este trabalho investiga as respostas ionosféricas e geomagnéticas associadas a dois *flares* intensos ocorridos em 9 e 22 de fevereiro de 2024, classificadas como X3.38 e X6.37, respectivamente. A análise baseia-se em dados de magnetômetros distribuídos globalmente, com resolução temporal de um minuto, permitindo o estudo das variações nas componentes horizontal (ΔH) e vertical (ΔZ) do campo magnético terrestre em diferentes faixas latitudinais, incluindo regiões de altas, médias, baixas latitudes e a região equatorial. Além disso, os parâmetros ionosféricos derivados de sistemas GNSS, como o Conteúdo Eletrônico Total (TEC) e a Taxa de Variação do TEC (ROT), foram usados para avaliar as alterações na densidade eletrônica associadas aos eventos. A abordagem multi-instrumental adotada possibilita uma análise comparativa detalhada das respostas ionosféricas e geomagnéticas em regiões iluminadas pela radiação solar. Os resultados indicam que as perturbações observadas em ΔH , ΔZ e ROT apresentam clara sincronização temporal com os picos de emissão de raios X, evidenciando a forte ligação entre a radiação solar e a dinâmica ionosférica.

Palavras-Chaves: erupções solares, ionosfera, campo geomagnético, TEC, ROT.

ABSTRACT

Solar flares (SFs) are phenomena characterized by the emission of intense electromagnetic radiation, particularly in the X-ray and extreme ultraviolet (EUV) ranges, capable of producing sudden ionospheric disturbances (SIDs) and geomagnetic perturbations on a global scale. During periods of solar maximum, both the frequency and intensity of these events increase, potentially impacting technological systems.

This study investigates the ionospheric and geomagnetic responses associated with two intense flares that occurred on February 9 and 22, 2024, classified as X3.38 and X6.37, respectively. The analysis is based on data from globally distributed magnetometers with a one-minute temporal resolution, enabling the investigation of variations in the horizontal (ΔH) and vertical (ΔZ) components of the Earth's magnetic field across different latitudinal regions, including high, mid, low, and equatorial latitudes.

Additionally, ionospheric parameters derived from GNSS systems, such as Total Electron Content (TEC) and the Rate of TEC (ROT), were used to assess changes in electron density associated with the events. The multi-instrumental approach adopted allows for a detailed comparative analysis of ionospheric and geomagnetic responses in sunlit regions.

The results indicate that the perturbations observed in ΔH , ΔZ , and ROT exhibit clear temporal synchronization with the X-ray emission peaks, highlighting the strong coupling between solar radiation and ionospheric dynamics.

Keywords: solar flare, ionosphere, geomagnetic field, TEC and ROT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Representação simplificada da interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre. Na figura destaca-se a frente de choque, magnetopausa, bainha magnética e lóbulos da cauda magnética.	26
Figura 2 - Classificação das camadas da atmosfera neutra de acordo com o perfil de temperatura, composição, escape gasoso em função da altura e perfil vertical de densidade eletrônica da ionosfera.....	29
Figura 3 - Perfil da densidade eletrônica e suas camadas ionosféricas correspondentes, durante o dia (linha contínua) e noite (linha tracejada) em função do máximo (linha vermelha) e mínimo (linha azul) do ciclo solar.	30
Figura 4 - Fluxograma dos dois principais fenômenos de origem solar na Terra, destacando os tempos de viagem e as respectivas consequências.	33
Figura 5 - Flares de categoria X no mês de fevereiro de 2024. Os dias estudados neste trabalho são os que estão circulados	37
Figura 6 - Mapas mostrando as áreas iluminadas (região clara) e não iluminadas (região escura) durante os eventos (a) X6.37 (22/02/2024) e (b) X3.38 (09/02/2024).	38
Figura 7 - Decomposição do campo magnético em um sistema de coordenadas geográficas e cartesianas.....	46
Figura 8 - Magnetograma da Rede Embrace na estação Porto Velho no dia 22/02/2024. O retângulo preto destaca as variações no campo magnético.	48
Figura 9 - Interface do UMAGDA	49
Figura 10 - Trajetória geométrica do sinal GPS de um satélite até um receptor terrestre através da ionosfera.....	53
Figura 11 - Interface UTECDA.....	54
Figura 12 - Variação das radiações Raio X e Extremo Ultravioleta (EUV) com foco próximo a hora dos eventos nos flares estudados. (a) Dia 22 de fevereiro de 2024 com flares de categoria M às 20:46UT e X6.37. (b) Dia 09 de fevereiro de 2024 com flare X3.8.....	56
Figura 13 - Regiões latitudinais da Ionosfera.	57
Figura 14 - Índices geomagnéticos Kp, Dst, número de manchas solares, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz (IMF), Raio-X e extremo ultravioleta (EUV): para o mês de fevereiro de 2024. A barra em amarelo representa os dois dias dos eventos estudados.	59

Figura 15 -Variação dos índices geomagnéticos Kp, Dst, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz (GSE), Campo Magnético interplanetário (IMF), Raio-X e extremo ultravioleta (EUV) para o dia 19 de fevereiro de 2024.....60

Figura 16 -Variação dos índices geomagnéticos Kp, Dst, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz, Campo Magnético interplanetário (IMF), Raio-X e EUV. (a) representa o dia 22 de fevereiro de 2024 e (b) representa o dia 9 de fevereiro de 2024. A linha vertical amarela destaca os flares estudados de classe X analisadas neste estudo. As linhas verticais brancas indicam os demais flares que ocorreram nesses dias.61

Figura 17 - Estações de magnetômetros em verde usadas, as linhas cinzas são as regiões latitudinais e a cinza pontilhada representa equador magnético. (a) são referentes aos dias 22 de fevereiro e (b) ao dia 9 de fevereiro.62

Figura 18 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em altas latitudes para o dia 22 fevereiro, sendo (b) Polo Norte e (c) Polo Sul. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.....64

Figura 19 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em médias latitudes para o dia 22 fevereiro separadas em três regiões, (b) América do Norte, (c) Ásia e (d) Oceania. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas repentina no valor de ΔH66

Figura 20 – (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetros na região equatorial e em baixas latitudes para o dia 22 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas repentinas no valor de ΔH67

Figura 21 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em altas latitudes para o dia 22 fevereiro separadas em duas regiões, sendo o lado (b) Polo Norte e (c) Polo sul. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.68

Figura 22 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em médias latitudes para dia 22 de fevereiro separadas em três regiões: (b) América do Norte, (c) Ásia e (d) Oceania. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas repentinos no valor de ΔZ69

Figura 23 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros da região equatorial e de baixas latitudes para dia 22 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ70

Figura 24 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetros de alta latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.....	72
Figura 25 – (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro na Europa, sendo (b) Oeste e Norte e (c) Sul e Leste. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH	73
Figura 26 - (a)Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro nas regiões da América do Norte (b) e África (c). A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH	74
Figura 27 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetro na região equatorial e baixas latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH	75
Figura 28 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de alta latitudes para o dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.	76
Figura 29 – (a)Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro na Europa, sendo (b) Oeste e Norte e (c) Sul e Leste. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ	77
Figura 30 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para o dia 09 de fevereiro separadas nas regiões da América do Norte (b) e África (c). A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ	77
Figura 31 - Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e estações de magnetômetros da região equatorial e de baixas latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ	78
Figura 32 - Mapa das estações de magnetômetros disponíveis para a análise do Eletrojato Equatorial. (a) corresponde ao dia 22 de fevereiro de 2024 e (b) ao dia 9 de fevereiro de 2024. As estações de referência são indicadas em azul, as estações equatoriais em vermelho e as estações de baixa latitude em verde.	80

Figura 33 - Variação do Eletrojato Equatorial no dia 22 de fevereiro. (a) estações e magnetômetros TTB – KOU e (b) estações de magnetômetros HUA-IPM. A linha vertical amarela corresponde ao flare estudado e as linhas verticais brancas os outros flares que ocorrem no dia. As linhas verticais contínuas representam o máximo do flare e as pontilhas início e fim do evento.	82
Figura 34 - Variação do Eletrojato Equatorial no dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela corresponde ao flare estudado e as linhas verticais brancas os outros flares que ocorrem no dia. As linhas verticais contínuas representam o máximo do flare e as pontilhas início e fim do evento.	83
Figura 35 - Variação do Eletrojato Equatorial (TTB-KOU) no mês de fevereiro. A cor vermelha indica os dias estudado, amarelo os dias calmos do mês de fevereiro e azul os demais dias do mês.	84
Figura 36 - Variação do Eletrojato Equatorial (HUA-IPM) no mês de fevereiro. A cor vermelha indica os dias estudado, amarelo os dias calmos do mês de fevereiro e azul os demais dias do mês.	85
Figura 37 - Estações de GPS-TEC usadas sendo os pontos vermelhos representando as estações na parte iluminada e os pontos azuis as estações na área não iluminadas. (a) dia 22 de fevereiro e (b) 09 de fevereiro.	87
Figura 38 - Variação do VTEC ao longo de 24 horas no dia 22 de fevereiro para a estação BERP no Polo Sul. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	88
Figura 39 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)AC07 e (b) BERP no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	89
Figura 40 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)BTNG e (b) CN23 no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	90
Figura 41 - Variação do VTEC para a estação GNSS SANT no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	91
Figura 42 - Distribuição global do VTEC em resolução temporal de 1 minuto no dia 22 de fevereiro, durante o intervalo associado ao SF. As cores representam a magnitude do VTEC.	92
Figura 43 – Variação do VTEC para as estações GNSS (a) NNVN, (b)BAKU e (c)MSCG no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	93
Figura 44 - Variação do ROT ao longo de 24 horas no dia 22 de fevereiro para a estação BERP. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	95

Figura 45 - Variação do ROT para as estações (a)AC07 e (b)BERP. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	96
Figura 46 - Variação do ROT para as estações (a)BTNG e (b)CN23. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	97
Figura 47 - Variação do ROT para a estação SANT. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.....	98
Figura 48 - Distribuição global da taxa de variação do ROT, com resolução temporal de 1 minuto, no dia 22 de fevereiro, durante o intervalo do flare. As cores indicam a intensidade das flutuações temporais do TEC em TECU/min, sendo valores elevados (cores quentes) associados a variações rápidas da densidade eletrônica e à presença de distúrbios ionosféricos induzidos pela radiação solar.....	99
Figura 49 – Variação do VTEC para as estações GNSS (a) NNVN, (b)BAKU e (c)MSCG no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.....	100
Figura 50 - Variação do VTEC ao longo de 24 horas no dia 09 de fevereiro para a estação OLO9 na África. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.....	101
Figura 51 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)HJOR e (b) GANJ no dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	102
Figura 52 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)CN57 e (b)OLO9 no dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare	103
Figura 53 - Variação do VTEC para a estação GNSS INMN para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	104
Figura 54 - Variação VTEC em resolução temporal de 1 minuto no dia 09 de fevereiro de 2024, durante o intervalo associado ao SF. As cores representam a magnitude do VTEC.....	104
Figura 55 - Variação do VTEC para as estações GNSS, (a)AC13, (b) KAEO e (c) KMTR para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.....	105
Figura 56 - Variação do ROT ao longo de 24 horas no dia 09 de fevereiro para a estação OLO9. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.....	106
Figura 57 - Variação do ROT para as estações (a)HJOR e (b)GANJ. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.	107

Figura 58 - Variação do ROT para as estações (a)CN57 e (b)OLO9. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado. 108

Figura 59 - Variação do ROT para a estação INMN. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado..... 109

Figura 60 - Distribuição global da taxa de variação do ROT, com resolução temporal de 1 minuto, no dia 09 de fevereiro, durante o intervalo do flare. As cores indicam a intensidade das flutuações temporais do TEC em TECU/min, sendo valores elevados (cores quentes) associados a variações rápidas da densidade eletrônica e à presença de distúrbios ionosféricos induzidos pela radiação solar. 110

Figura 61 - Variação do ROT para as estações GNSS, (a)AC13, (b) KAEO e (c) KMTR para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare*. 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura Vertical e Perfil de Temperatura.	28
Tabela 2 - As camadas ionosféricas e suas principais características.	32
Tabela 3 - Classificação do <i>Solar Flare</i> de acordo com sua intensidade.	36
Tabela 4 - Intensidade, data, região ativa, início, máximo e fim dos SFs X6.37 e X3.38 que ocorreram em 22 e 09 de fevereiro de 2024, respectivamente.	39
Tabela 5 - Classificação de tempestade geomagnética com base no índice Dst	40
Tabela 6 - Lista dos 10 dias mais calmos para o mês de fevereiro de 2024.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDS	Sistema de Navegação por Satélite BeiDou (<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>)
CEJ	Contra Eletrojato Equatorial (<i>Counter Electrojet</i>)
CME	Ejeção de Massa Coronal (<i>Coronal Mass Ejection</i>)
DDEF	Campo Elétrico do Dínamo de Perturbação (<i>Disturbance Dynamo Electric Field</i>)
Dst	Tempo de Distúrbio da Tempestade (<i>Disturbance Storm Time</i>)
EEJ	Eletrojato Equatorial (<i>Equatorial Electrojet</i>)
EIA	Anomalia de Ionização Equatorial (<i>Equatorial Ionization Anomaly</i>)
EMBRACE	Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
Es	Esporádica
EUV	Extremo Ultravioleta (<i>Extreme Ultraviolet</i>)
FUV	Ultravioleta distante (<i>Far Ultraviolet</i>)
GLONASS	Sistema Orbital Global de Navegação por Satélite (<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistem</i>)
GNSS	Sistema de Navegação Global por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GOES	Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário (<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
GSE	Eclíptica Solar Geocêntrica (<i>Geocentric Solar Ecliptic</i>)
HF	Altas Frequências (<i>High Frequency</i>)
HSA	Atividade Solar Máxima (<i>High Solar Activity</i>)
ICME	Ejeção de Massa Coronal Interplanetária (<i>Interplanetary Coronal Mass Ejection</i>)
IMF	Campo Magnético Interplanetário (<i>Interplanetary Magnetic Field</i>)
INTERMAGNET	Rede Internacional de Observatórios Magnéticos em Tempo Real (<i>International Real-time Magnetic Observatory Network</i>)
IR	Infravermelho (<i>Infra-red</i>)
Kp	Índice Planetário (<i>Planetary Kennziffer</i>)
LASP	Laboratório de Física Atmosférica e Espacial (<i>Laboratory for Atmospheric and Space Physics</i>)

LT	Hora local (<i>Local Time</i>)
MAS	Moderada Atividade Solar (<i>Moderate to High Solar Activity</i>)
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)
Np	Número de partículas
PPEF	Campo Elétrico de Penetração Imediata (<i>Prompt Penetration Electric Field</i>)
ROT	Taxa de variação do TEC (<i>Rate of change TEC</i>)
RX	Raio X
SIDs	Perturbação Ionosférica Súbita (<i>Sudden Ionospheric Disturbances</i>)
SF	Explosão Solar (<i>Solar Flare</i>)
SFE	Efeito do Solar Flare (<i>Solar Flare Effect</i>)
SOHO	Observatório Solar e Heliosférico (<i>Solar and Heliospheric Observatory</i>)
Sq	Solar quiet
TEC	Conteúdo Total de Elétrons (<i>Total Electron Content</i>)
UA	Unidade Astronômica
UNAVCO	Consórcio da Universidade NAVSTAR (<i>University NAVSTAR Consortium</i>)
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba
UT	Hora Universal (<i>Universal Time</i>)
UV	Ultravioleta
Vp	Vento Solar (<i>Solar Wind</i>)
VTEC	TEC Vertical

LISTA DE SÍMBOLOS

B - Campo magnético interplanetário total, nT

B_z - Componente vertical do campo magnético interplanetário

G - gauss

m - Metros

s - Segundos

nT – Nanotesla – 10^{-9} T

UA – Unidade astronômica, 1UA = 149,597 870 km

μ T – microtesla

T – Tesla - 10^4 G

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 O SOL	23
2.2 A TERRA.....	25
2.3 A ATMOSFERA NEUTRA.....	26
2.4 A IONOSFERA.....	29
2.5 EVENTOS SOLARES E AS PERTURBAÇÕES NO SISTEMA TERRESTRE	32
2.5.1 EJEÇÃO DE MASSA CORONAL (CME) E TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS	33
2.5.2 EXPLOSÕES SOLARES (SFs) E OS DISTÚRBIOS SÚBITOS IONOSFÉRICOS (SIDs).....	34
3 DADOS	37
3.1 DADOS SOLARES, INTERPLANETÁRIOS, GEOMAGNÉTICOS E IONOSFÉRICOS DOS EVENTOS DE FEVEREIRO DE 2024.....	37
3.2 ELETROJATO EQUATORIAL.....	42
4 INSTRUMENTAÇÃO E TÉCNICAS	45
4.1 MAGNETÔMETRO.....	45
4.1.1 UMAGDA – UNIVAP MAGNETOMETER DATA ANALYSIS	49
4.2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE (GNSS).....	50
4.2.1 CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS - TEC	51
4.2.2 UTECDA – UNIVAP TOTAL ELECTRONIC CONTENT DATA ANALYSIS.....	53
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	55
5.1 ANÁLISE DA GEOEFETIVIDADE NO PÉRIOSO DE INTERESSE	58
5.2 MAGNETÔMETROS	62
5.2.1 SOLAR FLARE X.6.37 EM 22 DE FEVEREIRO 2024	63
5.2.1.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔH E RAIOS-X E EUV.....	63
5.2.2.2 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔZ E RAIOS-X E EUV.....	67
5.2.2 SOLAR FLARE X3.38 EM 09 DE FEVEREIRO 2024	70
5.2.2.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔH E RAIOS-X E EUV.....	71
5.2.2.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔZ E RAIOS-X E EUV.....	75
5.3 ELETROJATO EQUATORIAL.....	80
5.4 TEC VERTICAL E TAXA DE VARIAÇÃO DO TEC	86
5.4.1 SOLAR FLARE X.6.37 EM 22 DE FEVEREIRO 2024	87
5.4.2 SOLAR FLARE X.6.37 EM 09 DE FEVEREIRO 2024	101

6 CONCLUSÃO.....	113
7 TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS	116
APÊNDICE A: DADOS DAS ESTAÇÕES DE MAGNETÔMETRO.....	120
APÊNDICE B: ESTAÇÕES COM FALHA DE DADOS NOS DIAS CALMOS	122
APÊNDICE C: ESTAÇÕES ELETROJATO EQUATORIAL.....	123
APÊNDICE D: ESTAÇÕES USADAS PARA O VTEC E ROT	124
ANEXO 1: COORDENADAS DOS OBSERVATÓRIOS DO DST	125
ANEXO 2: OBSERVATÓRIOS GEOMAGNÉTICOS DO KP	126

1 INTRODUÇÃO

O Sol, estrela central do sistema solar, desempenha papel importante para a manutenção da vida na Terra. A região entre o Sol e os planetas, denominada na literatura científica como meio interplanetário (Tavares, 2000), caracteriza-se por um plasma ionizado, altamente rarefeito e magnetizado, predominantemente composto por prótons e elétrons, cuja dinâmica é dominada pelo vento solar e pelo campo magnético interplanetário por ele transportado. Os efeitos dessa interação constituem o objeto de estudo do chamado Clima Espacial, área da ciência dedicada a compreender como a atividade do Sol modula o meio interplanetário e o ambiente espacial próximo à Terra, influenciando sistemas tecnológicos e atividades humanas.

As consequências do Clima Espacial despertam crescente preocupação, uma vez que seus impactos atingem diretamente sistemas tecnológicos essenciais. Desde o registro de Richard Carrington, em 1859¹, sabe-se que explosões solares (*solar flare* - SF) podem produzir perturbações significativas na Terra. Atualmente, a sociedade moderna é fortemente dependente de tecnologias que são sensíveis a variações no ambiente espacial, o que torna tais riscos ainda mais críticos. Fenômenos solares repentinos como os associados a SFs podem interromper transmissões de rádio, danificar satélites e induzir correntes elétricas em linhas de distribuição de energia, com potencial para causar danos permanentes. A variação rápida do campo geomagnético pode levar à queima de transformadores e, conseqüentemente, ao colapso do fornecimento elétrico para residências, hospitais e indústrias etc. Sistemas de comunicação como sinais de TV, celulares e rádio navegação também podem sofrer colapsos por tempo indeterminado (Santarine; Domingos, 2014). Conforme Vasconcelos (2025), “estima-se que entre 5% e 9% da energia elétrica consumida no mundo seja destinada à infraestrutura de TI e comunicações em geral e ao seu uso”, o que evidencia a importância socioeconômica da resiliência desses sistemas.

A ionosfera é continuamente moldada pela interação com a atividade solar, especialmente através de episódios intensos como os SFs. Esses eventos, caracterizados pelo aumento abrupto da radiação eletromagnética nas bandas de

¹ Richard Carrington (1826-1875) foi um astrônomo inglês, conhecido por suas observações do Sol. Sua contribuição mais famosa, ficou conhecida como "Evento Carrington" de 1859, a maior tempestade solar já registrada na história, que causou falhas em telégrafos no mundo todo. Sua descrição está disponível em: <https://academic.oup.com/mnras/issue/20/1>

raios X (RX) e extremo ultravioleta (EUV), desencadeiam respostas imediatas na ionosfera. A ionização súbita modifica a densidade eletrônica, altera a condutividade eletrodinâmica e reflete no comportamento das componentes horizontal (ΔH) e vertical (ΔZ) do campo geomagnético.

Embora um SF não possua energia suficiente para causar danos permanentes à Terra, seus efeitos indiretos podem comprometer a operação de satélites e, conseqüentemente, serviços considerados críticos. Um exemplo desse fenômeno é a tempestade geomagnética de 1989, associada a um intenso *flare* e a uma ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejection* - CME), que resultou no blecaute de Quebec, no Canadá, em que descargas geomagnéticas induzidas afetaram a rede de distribuição elétrica, provocando um colapso no fornecimento de energia elétrica que paralisou todos os serviços essenciais resultando em um apagão de 12 horas (Santarine; Domingos, 2014). Eventos como esse reforçam a necessidade de observações sistemáticas e de ferramentas capazes de detectar e caracterizar rapidamente suas conseqüências na infraestrutura tecnológica.

A hipótese da pesquisa estabelece que SFs intensos, especialmente aqueles pertencentes à classe X, produzem assinaturas geomagnéticas detectáveis nas componentes horizontal (ΔH) e vertical (ΔZ) do campo geomagnético terrestre e parâmetros ionosféricos derivados do TEC. Essas assinaturas manifestam-se de forma dependente da latitude, apresentando padrões distintos de sincronização temporal e amplitude. (Fagundes *et al*, 2020, 2024a, 2024b).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo geral investigar os distúrbios ionosféricos associados a dois *flares* solares ocorridos em fevereiro de 2024, período caracterizado por atividade solar variando de moderada a máxima. A análise foi conduzida com base em registros de magnetômetros e em dados de Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* - TEC) derivados de receptores do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), integrante do conjunto de sistemas Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS).

Os objetivos específicos consistem em:

1. Analisar as respostas ionosféricas associadas aos flares solares ocorridos em 9 e 22 de fevereiro de 2024, por meio da correlação entre os fluxos de radiação em raios X (RX) e ultravioleta extrema (EUV) e as variações das componentes horizontal (ΔH) e vertical (ΔZ) do campo geomagnético terrestre.

2. Investigar a resposta do TEC e de parâmetros derivados, como VTEC e ROT.
3. Avaliar a sincronização temporal e a amplitude dessas respostas em diferentes faixas latitudinais, analisando as variações latitudinais dos efeitos observados.
4. Examinar a variabilidade das respostas ionosféricas associadas aos flares, considerando fatores como intensidade do evento, hora local, estação do ano e latitude, o que reforça a necessidade de análises observacionais detalhadas.

O aumento recente da disponibilidade de dados experimentais, provenientes de redes de magnetômetros e sistemas GNSS, tem possibilitado investigações com maior resolução espacial e temporal, contribuindo para o aprimoramento da compreensão dos processos ionosféricos. Compreender a estrutura e a eletrodinâmica ionosférica é fundamental para aplicações práticas de previsão e mitigação de efeitos em sistemas de navegação e comunicação.

O estudo também abrange irregularidades ionosféricas de diferentes escalas, incluindo aquelas de grande escala que se desenvolvem na região equatorial e se estendem até baixas latitudes ([Kelley, 2009](#)).

Esta dissertação está organizada em sete seções. A Seção 2 apresenta os fundamentos teóricos necessários à compreensão dos efeitos dos *flares* solares sobre a ionosfera em escala global, abordando características do Sol e da Terra, a estrutura da atmosfera neutra, os processos de formação e dinâmica da ionosfera, bem como eventos solares, em especial as CMEs e os SFs, capazes de desencadear tempestades geomagnéticas e distúrbios ionosféricos súbitos (*Sudden Ionospheric Disturbances* – SIDs). A Seção 3 descreve os dados utilizados na pesquisa, incluindo as condições solares, interplanetárias e geofísicas do período analisado com o exemplo do Eletrojato Equatorial (*Equatorial Electrojet* - EEJ). A Seção 4 apresenta a instrumentação e as técnicas empregadas. A Seção 5 reúne as análises realizadas e discute os principais resultados obtidos. A Seção 6 é dedicada às conclusões, enquanto a Seção 7 apresenta recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma revisão dos fundamentos teóricos e conceituais relacionados ao objeto de estudo, com objetivo de estabelecer a base conceitual necessária para a interpretação dos resultados apresentados nas seções subsequentes.

2.1 O SOL

O Sol, uma esfera de plasma que possui aproximadamente 99,86% da massa total do sistema solar (Silva, 2003). Sua composição é predominantemente formada por hidrogênio (cerca de 74%) e hélio (aproximadamente 24%), com traços de outros elementos mais pesados, como oxigênio, carbono e ferro. O Sol pode ser dividido em camadas internas e camadas externas. As camadas internas, que compõem o seu interior, que incluem o núcleo, onde ocorre a fusão nuclear; a zona radiativa, responsável pelo transporte de energia por radiação; e a zona convectiva, onde a energia é transferida por convecção. As camadas externas, que englobam a parte visível e a atmosfera solar, são a fotosfera (camada visível do Sol), a cromosfera (camada da atmosfera solar e logo acima da fotosfera) e a corona, esta última sendo a camada mais externa e pode ser visível durante os eclipses solares (Tascione 2005; Oliveira Filho, 2017). A fusão nuclear que ocorre no núcleo do Sol, é um processo que transforma hidrogênio em hélio e libera uma enorme quantidade de energia, na forma de radiação (cerca de $3,86 \times 10^{26}$ watts/segundo) (Tascione, 2005).

O vento solar, um fluxo contínuo de partículas carregadas, predominantemente de íons e elétrons é emitido pela corona solar. Essas partículas se referem a um plasma altamente ionizado que escapa da gravidade solar devido à elevada temperatura coronal (da ordem de 10^6 K) e à consequente pressão térmica, propagando-se pelo meio interplanetário e interagindo com corpos celestes do Sistema Solar. Esse plasma possui uma velocidade média de 300 a 500 km/s e uma densidade de 5 a 10 partículas/cm³ (Tascione, 2005).

A radiação eletromagnética é a principal forma de energia emitida pelo Sol e se propaga pelo espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação é gerada a partir dos processos de fusão nuclear no núcleo solar, os quais convertem massa em energia, e é transportada para o exterior por meio das zonas radiativa e convectiva

até atingir a fotosfera, de onde é irradiada para o espaço. A radiação solar abrange praticamente todo o espectro eletromagnético, desde ondas de rádio até raios gama, embora a maior parte da energia esteja concentrada nas faixas, Ultravioleta (UV) ~7%, Luz visível ~43%, Infravermelho (IR) ~49%, mas outros comprimentos de onda na faixa de micro-ondas, RX e raios gama são emitidas. Essa radiação percorre aproximadamente 149.597.870 km até alcançar a Terra, distância correspondente a 1 unidade astronômica (UA), e leva cerca de 8 minutos e 20 segundos (500 s), viajando com a velocidade da luz ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$). É importante ressaltar que a radiação UV, extremo UV (EUV) e RX são as radiações eletromagnéticas responsáveis pela ionização da atmosfera, sobretudo durante eventos eruptivos ([Tascione, 2005](#); [Banks; Kockarts, 1973](#)).

As manchas solares são regiões temporariamente mais escuras observadas na fotosfera solar, associadas a intensas concentrações de campo magnético. Essas áreas possuem temperaturas menores em comparação ao ambiente ao redor (ordem de 4000 K), em contraste com cerca de 5800 K da fotosfera adjacente, o que explica sua menor emissão de radiação e as torna visivelmente mais escuras. A sua dimensão pode variar de algumas centenas até dezenas de milhares de quilômetros de diâmetro. Algumas manchas podem ter tamanhos comparáveis ou maior que ao da Terra. A sua duração é de alguns dias a várias semanas, dependendo da estabilidade do campo magnético envolvido. O campo magnético em manchas solares varia tipicamente entre 1.500 e 3.500 Gauss, podendo atingir valores próximos de 4.000 Gauss, em contraste com o campo magnético médio da fotosfera, da ordem de 1 Gauss ([Tascione, 2005](#); [Banks; Kockarts, 1973](#)).

A atividade solar é modulada por uma série de ciclos naturais que refletem a complexa dinâmica do campo magnético solar. O mais conhecido e amplamente estudado é o ciclo das manchas solares, com periodicidade média de 11 anos. Embora o ciclo de 11 anos seja o mais estudado, estudos indicam a existência de ciclos de maior duração e variações seculares (22, 80, 120 e 210 anos). Esse ciclo é caracterizado por variações regulares no número de manchas solares, e é definido por máximo e mínimo de atividade solar ([Nasa, 2016](#)). Durante o máximo solar, quando o número de manchas solares atinge seu pico, observa-se ocorrências de eventos climáticos espaciais severos, tais como, SFs e CMEs ([Rao et al., 2024](#)), que induzem no sistema terrestre SIDs e tempestades geomagnéticas, respectivamente. Há um aumento acentuado no número de CMEs e SFs, que são manifestações diretas

de energia magnética acumulada na atmosfera solar. Por outro lado, durante o mínimo de atividade solar, as CMEs e SFs diminuem drasticamente (Fagundes *et al.*, 2025). A energia liberada nesses eventos tem consequências diretas sobre o meio interplanetário e afeta intensamente a ionosfera. Tais mudanças comprometem o desempenho e a confiabilidade de sistemas de comunicação, navegação aérea e geolocalização baseados em GNSS (Nogueira *et al.*, 2015).

2.2 A TERRA

A Terra o terceiro planeta do Sistema Solar em distância ao Sol, com formato esferoide e um raio equatorial de 6.378,137 km e raio polar de 6.356,752 km (Branco, 2016). Até o momento, é o único planeta conhecido a abrigar vida, por conta de sua atmosfera, campo magnético e condições físico-químicas adequadas. O estudo da Terra envolve diversas disciplinas, desde a geologia e geofísica até a física espacial. Com uma história evolutiva complexa, a Terra apresenta características dinâmicas tanto internamente quanto em sua interação com o ambiente espacial. A idade da Terra é estimada em aproximadamente 4,5 bilhões de anos e apresenta a sua estrutura interna (parte sólida) pode ser dividida em Crosta, Manto, Núcleo externo, Núcleo interno (Tascione, 2005).

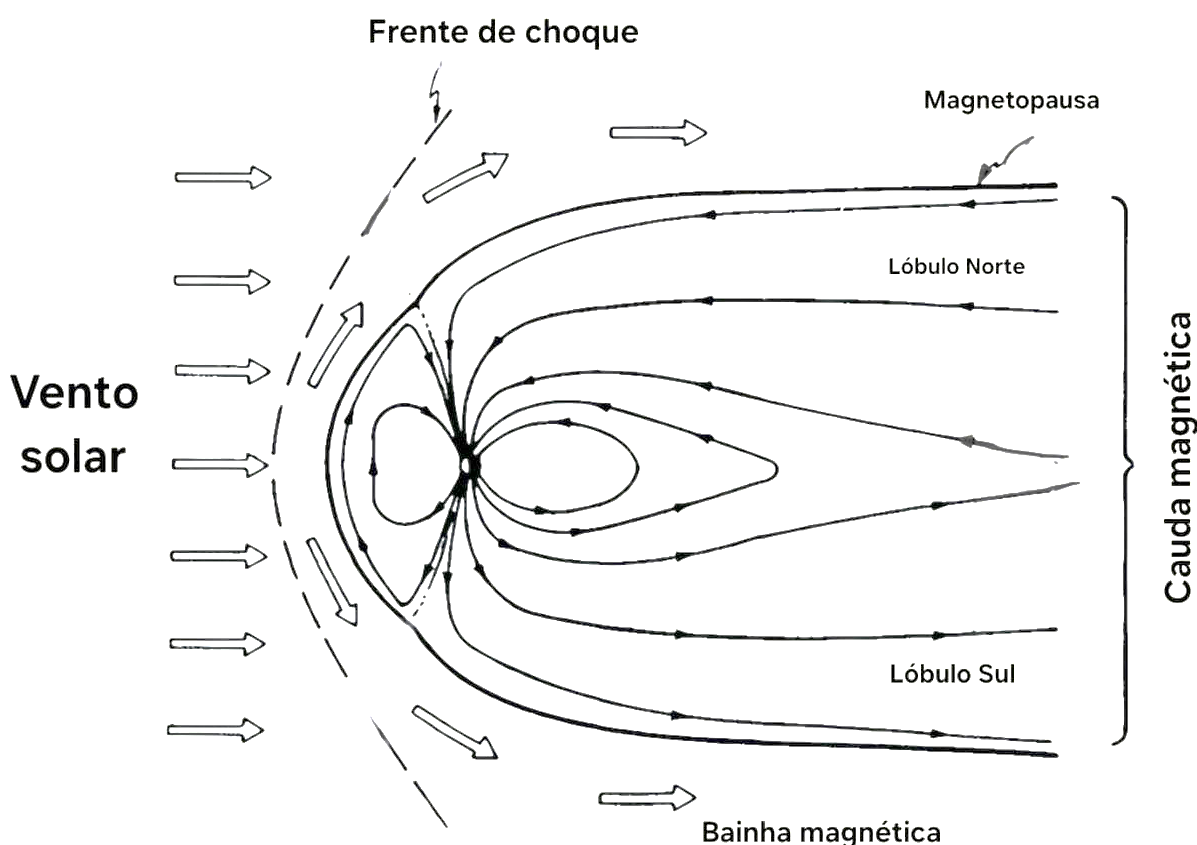
A Terra é envolvida por um campo magnético dipolar inclinado em aproximadamente 11° em relação ao seu eixo de rotação (Kelley, 2009). Esse campo, também conhecido como campo magnético terrestre (CMT), é gerado no interior do planeta, por processos dínamo que ocorre no núcleo externo líquido. A movimentação convectiva do fluido condutor nesse núcleo, produz correntes elétricas capazes de sustentar e intensificar o campo magnético. Esse campo estende-se por dezenas de milhares de quilômetros no espaço, formando a magnetosfera, que atua como uma barreira natural contra as partículas carregadas do vento solar.

A intensidade do CMT varia de aproximadamente 30 a 60 μT na superfície terrestre, sendo mais intenso nas regiões polares e mais fraco nas regiões equatoriais (Tascione, 2005). Esse campo é decomposto em duas componentes principais sendo, componente horizontal (H) e vertical (Z). A inclinação magnética (I), por sua vez, é definida pelo ângulo entre 90° nos polos magnéticos e 0° no equador magnético. Essas propriedades estruturais do campo são essenciais para a navegação e o

monitoramento geomagnético, e para a compreensão das interações entre o campo terrestre e o ambiente espacial.

Embora a maior parte do CMT tenha origem interna, cerca de 0,1% são atribuídos a correntes elétricas externas, localizadas principalmente na ionosfera e na magnetosfera (Tascione, 2005). Apesar de sua contribuição ser pequena, essas correntes externas são altamente eletrodinâmicas e desempenham um papel decisivo na variabilidade do campo geomagnético durante eventos solares e tempestades geomagnéticas. Por este motivo, o CMT exerce um papel fundamental na proteção do planeta contra partículas carregadas provenientes do Sol e do meio interestelar (Figura 1).

Figura 1 -Representação simplificada da interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre. Na figura destaca-se a frente de choque, magnetopausa, bainha magnética e lóbulos da cauda magnética.



Fonte: Adaptado Hargreaves (1992, pág. 152)

2.3 A ATMOSFERA NEUTRA

A atmosfera neutra terrestre corresponde à porção da atmosfera composta predominantemente por átomos e moléculas neutras. Estende-se desde a superfície

terrestre, na troposfera, até a termosfera, alcançando altitudes de aproximadamente 1000 a 2000 km de altitude, onde ocorre a transição gradual para o meio interplanetário. Essa região desempenha um papel fundamental em diversos processos físicos e dinâmicos, incluindo fenômenos meteorológicos, climáticos, aerodinâmicos e interações com a ionosfera.

A Tabela 1 apresenta a estratificação atmosférica em cinco camadas principais (troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera), baseando-se no perfil vertical da temperatura e em características dinâmicas e químicas características. As regiões de transição entre essas camadas são denominadas tropopausa, estratopausa e mesopausa, sendo caracterizadas por inversões ou inflexões no gradiente vertical de temperatura (Figura 2).

O perfil térmico da atmosfera é altamente variável e resulta da combinação de mecanismos de transferência de energia, incluindo radiação, condução, convecção e absorção da radiação solar incidente.

Aproximadamente 50% da massa total da atmosfera encontra-se abaixo de 5,5 km de altitude, concentrando os principais processos meteorológicos nas camadas mais inferior.

A composição química da atmosfera neutra também varia com a altitude. Até cerca de 100 km, predomina a região conhecida como homosfera, onde a mistura dos constituintes é relativamente uniforme devido à ação de processos turbulentos (Figura 2). Nessa faixa, a composição volumétrica aproximada é: Nitrogênio molecular (N_2) ~78%, Oxigênio molecular (O_2) ~21%, Argônio (Ar) ~0,93% e Dióxido de carbono (CO_2) ~0,04%. Acima de 100 km, inicia-se a heterosfera, onde os gases se estratificam de acordo com seus pesos moleculares, devido à predominância da difusão molecular. Nessa região superior, os constituintes mais leves, como Oxigênio atômico (O), Hélio (He) e Hidrogênio (H), tornam-se progressivamente mais abundantes (Figura 2).

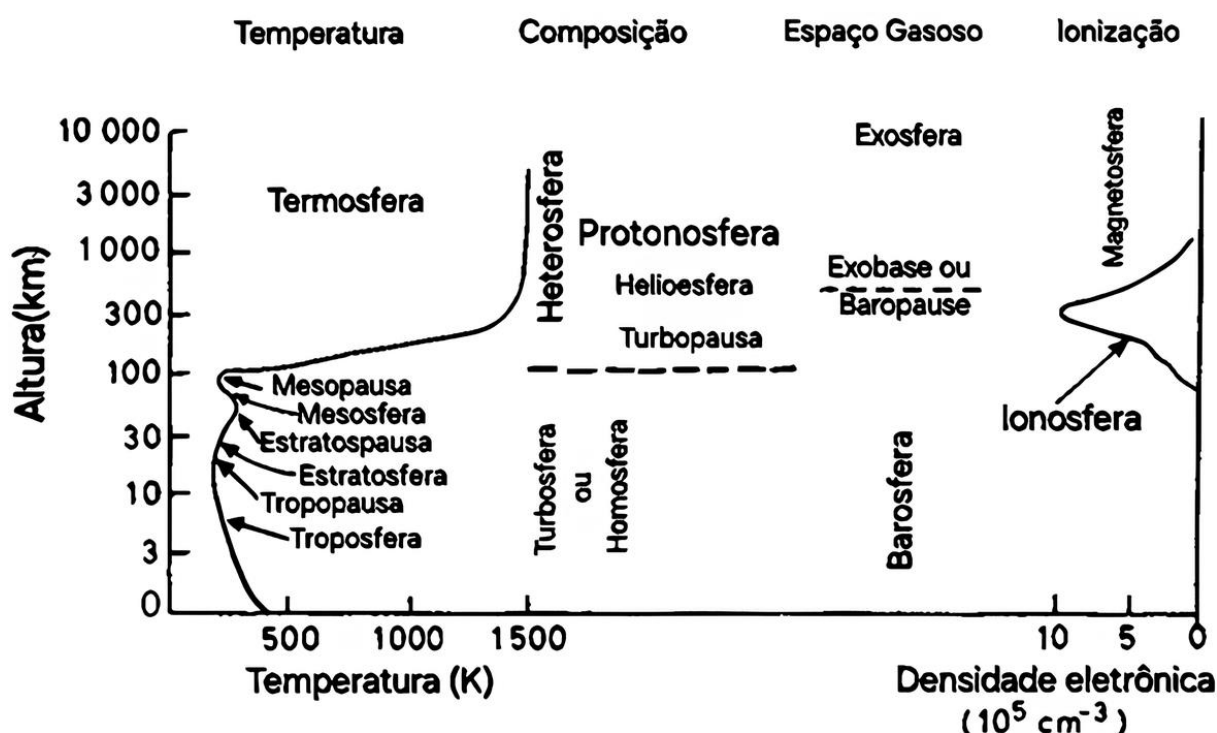
Tabela 1 - Estrutura Vertical e Perfil de Temperatura.

Camada	Altitude Típica (km)	Varição da Temperatura	Principais Características
Troposfera	0 ~10-12	Temperatura diminui com a altitude (~6,5 °C/km)	Camada mais baixa; local de maior parte do clima e do tempo; contém a maior parte do vapor d'água.
Estratosfera	10-12 ~ 50	Temperatura aumenta com a altitude	Contém a camada de ozônio que absorve radiação UV; ar mais estável; pouca turbulência.
Mesosfera	50 ~ 80-90	Temperatura diminui com a altitude	Camada fria, mínima temperatura ~-90 °C; onde ocorrem as estrelas cadentes (meteoros queimando)
Termosfera	>80 ~500/600	Temperatura aumenta com a altitude	Temperaturas muito altas; ionização do ar; auroras ocorrem aqui; espaço próximo.
Exosfera	> 500-600	Temperatura se mantém alta ou variável	Camada de transição para o espaço; gases muito rarefeitos; partículas podem escapar para o espaço.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de [Tascione \(2005\)](#), [Kelley \(2009\)](#), [Banks](#); [Kockarts \(1973\)](#)

A atmosfera neutra desempenha papel fundamental na absorção da radiação solar. A camada de ozônio absorve a radiação ultravioleta (UV-B e UV-C), protegendo a vida na superfície terrestre. Moléculas como O₂, N₂ e CO₂ absorvem radiação nas faixas infravermelha e EUV. Nas regiões mais elevadas, especialmente na mesosfera e termosfera absorve as radiações em comprimentos de ondas na faixa do UV, EUV e RX, resultando em íons e elétrons (plasma ionosférico).

Figura 2 - Classificação das camadas da atmosfera neutra de acordo com o perfil de temperatura, composição, escape gasoso em função da altura e perfil vertical de densidade eletrônica da ionosfera.



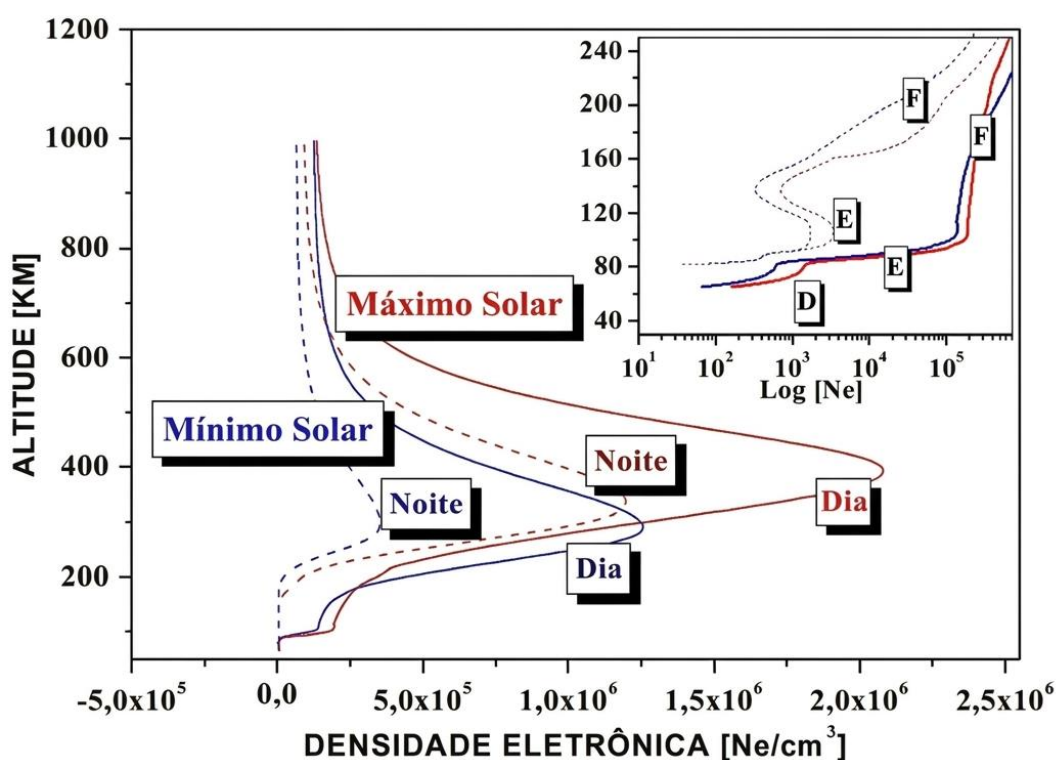
Fonte: Adaptado de [Hargreaves \(1992, p99\)](#)

2.4 A IONOSFERA

A ionosfera constitui a região ionizada da alta atmosfera terrestre ([Tascione, 2005](#)). Estendendo-se aproximadamente entre 60 km e 1000-2000 km de altitude, sendo que a sua altitude máxima varia em função do ciclo solar (Figura 3). Essa região é caracterizada pela presença de partículas carregadas, como elétrons livres e íons, resultantes da interação da radiação solar com os constituintes neutros da atmosfera, sobretudo durante o período diurno. Trata-se de um plasma fracamente ionizado, no qual, mesmo no pico de densidade eletrônica (camada F2), a razão entre partículas neutras e partículas ionizadas é da ordem de 10^3 partículas neutras/elétrons.

A ionosfera representa uma interface dinâmica e eletrodinâmica entre a atmosfera neutra subjacente e o meio espacial, desempenhando um papel crucial em diversos processos geofísicos e aplicações tecnológicas, incluindo a propagação de ondas de rádio de alta frequência, sistemas de navegação por satélite e comunicações globais dependentes da reflexão e refração ionosférica.

Figura 3 - Perfil da densidade eletrônica e suas camadas ionosféricas correspondentes, durante o dia (linha contínua) e noite (linha tracejada) em função do máximo (linha vermelha) e mínimo (linha azul) do ciclo solar.



Fonte: Fagundes (2024)

A ionização da atmosfera neutra deve-se às radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol, na faixa dos comprimentos de onda no UV, EUV e RX. Os fótons nessas faixas possuem energia suficiente para remover elétrons das moléculas e átomos neutros presentes na atmosfera superior, resultando na formação de íons e elétrons livres. Cada faixa de radiação é mais efetiva em determinadas altitudes, dependendo da densidade e da composição da atmosfera local. A eficiência da ionização depende não apenas da intensidade da radiação solar, que varia com o ciclo solar, mas também da composição atmosférica e da geometria solar, como o ângulo zenital.

A estrutura da ionosfera é tradicionalmente dividida em camadas ou regiões, identificadas como D, E, F1 e F2, com base na densidade de elétrons e na altitude em que se formam (Figura 3). Essas camadas são formadas pela interação da radiação solar na faixa do UV, EUV e RX e estão sujeitas a influências do campo magnético terrestre, dos campos elétricos e o acoplamento atmosfera neutra-ionizada.

A camada D, situada entre cerca de 60 km e 90 km de altitude, é formada principalmente por radiações de menor comprimento de onda, como os RX moles e

EUV, e apresenta uma elevada taxa de recombinação devido à maior densidade atmosférica. Já a camada E, localizada entre 90 km e 120 km, é formada pelas radiações UV, EUV, RX sendo caracterizada por uma ionização mais persistente durante o dia. Acima dela, encontra-se a camada F, que durante o dia pode ser subdividida em F1 e F2, é formada pelas radiações UV e EUV. A camada F2, entre 250 km e 400 km de altitude, é a mais ionizada da ionosfera e permanece ativa mesmo durante a noite, graças à menor taxa de recombinação em altitudes elevadas. Durante a noite, as camadas D e F1 praticamente desaparecem, e a F2 torna-se a principal região ionizada da ionosfera (Tabela 2).

Todas as camadas da ionosfera são influenciadas pela atividade solar. Entretanto, a camada F2 apresenta a resposta mais pronunciada às variações do ciclo solar (Kelley, 2009; Hargreaves, 1992), exibindo mudanças significativas na densidade eletrônica. Durante períodos de atividade solar máxima (High Solar Activity – HSA), a densidade eletrônica pode atingir valores da ordem de 10^{12} a 10^{13} elétrons cm^{-3} , enquanto valores significativamente menores são observados durante períodos de mínimo solar e no período noturno. (Figura 3).

A camada E e F são perturbadas durante distúrbios ionosféricos como tempestades geomagnéticas e SFs.

Entre os principais íons presentes na ionosfera destacam-se O_2^+ , N_2^+ e NO^+ nas camadas inferiores (D e E). Nas regiões mais altas, especialmente na camada F, predominam os íons O^+ , devido à menor densidade atmosférica e à maior permanência dos íons atômicos em altitudes elevadas. Em altitudes ainda maiores, próximas à exosfera, podem ser encontrados íons H^+ e He^+ , resultantes da difusão de elementos mais leves. (Tabela 2).

Compreender a estrutura e a eletrodinâmica da ionosfera é fundamental para diversas aplicações práticas, como a previsão e mitigação de efeitos em sistemas de navegação por satélite (como por exemplo, GPS), nas comunicações de longa distância e monitoramento do clima espacial. Além disso, o estudo dos mecanismos de formação das camadas ionosféricas contribui para o aprimoramento de modelos físicos e empíricos utilizados para descrever e prever o comportamento desse importante sistema da atmosfera superior terrestre. Este trabalho tem como objetivo contribuir para a compreensão dos processos físicos que regem a formação e a variação das camadas ionosféricas, com ênfase nos distúrbios ionosféricos durante SFs. Outro assunto da pesquisa são as irregularidades ionosféricas de grande, média

e pequenas escalas. Especialmente as de grande escala que ocorrem na ionosfera equatorial e que se estende até baixas latitudes (Kelley, 2009).

Tabela 2 - As camadas ionosféricas e suas principais características.

Camada	Altitude típica	Radiação ionizante predominante	Íons predominantes	Comportamento diurno/noturno	Observações principais
D	60 – 90 km	RX mole e EUV	NO^+ , O_2^+ e N_2^+	Presente durante o dia; desaparece à noite devido à rápida recombinação	Devido à alta densidade neutra, temos uma recombinação rápida dos íons
E	90 – 120 km	UV, EUV e RX	NO^+ e O_2^+	Presente durante o dia, é fraca durante à noite	Pode apresentar camada E-esporádica (Es)
F1	150 – 250 km (durante o dia)	UV e EUV	O^+ e O_2^+	Presente apenas durante o dia, funde-se com F2 ao anoitecer	Transição entre camadas inferiores e a F2
F2	250 – 500 km	EUV	O^+	Persiste dia e noite; densidade reduzida à noite	Camada mais ionizada e influente para comunicações por rádio e GPS

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados de Tascione (2005), Kelley (2009), Banks; Kockarts (1973)

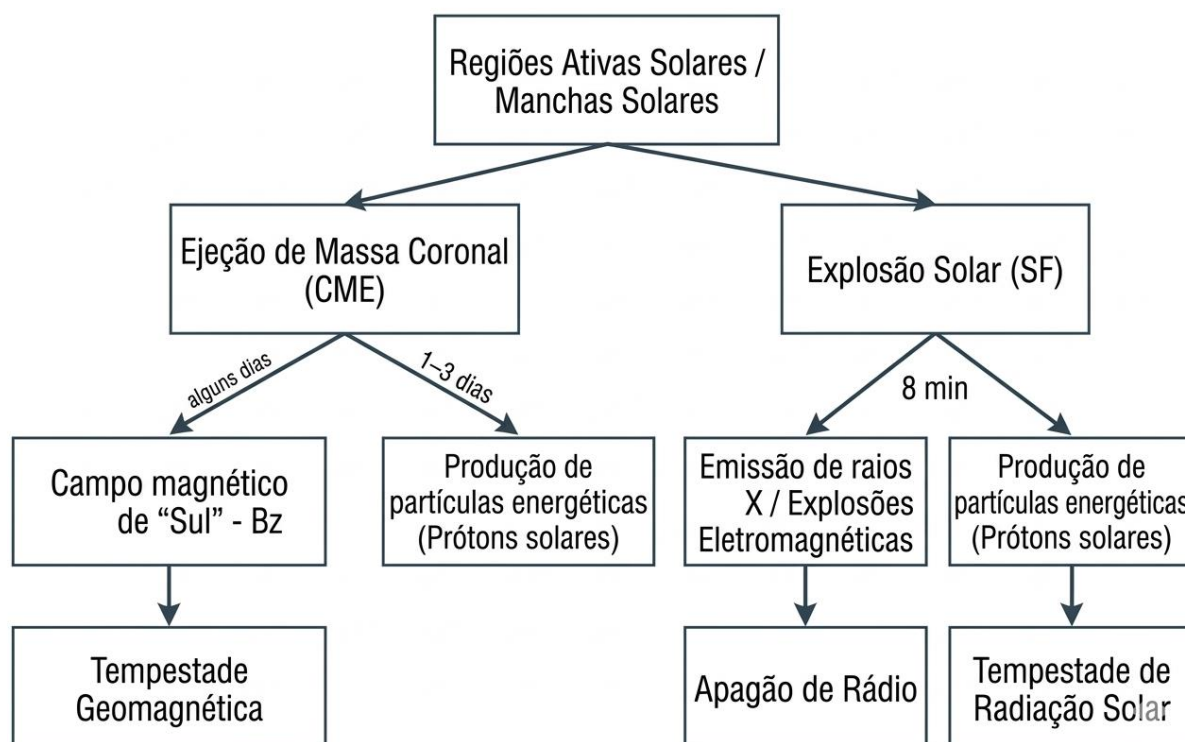
2.5 EVENTOS SOLARES E AS PERTURBAÇÕES NO SISTEMA TERRESTRE

Os dois principais fenômenos de origem solar responsáveis por perturbações no sistema terrestre são CME e os SFs (Figura 4). As CMEs correspondem à liberação de grandes quantidades de plasma, composto principalmente por prótons e elétrons e um campo magnético intrínseco. O plasma ejetado durante ejeções de massa coronal interplanetárias (ICME – *Interplanetary Coronal Mass Ejections*) pode levar de ~1 a ~4 dias para alcançar a Terra, variando principalmente com a velocidade

de propagação e com efeitos de desaceleração/interação no meio interplanetário; em eventos extremos esse tempo pode ser menor que 24 h.

Já os *flares* envolvem a emissão intensa de radiação eletromagnética (RX e EUV) e partículas relativísticas. A radiação proveniente desses eventos atinge a Terra cerca de 8 minutos após sua liberação, devido à sua propagação na velocidade da luz.

Figura 4 - Fluxograma dos dois principais fenômenos de origem solar na Terra, destacando os tempos de viagem e as respectivas consequências.



Fonte: Adaptado [Eastwood et al \(2017\)](#)

2.5.1 EJEÇÃO DE MASSA CORONAL (CME) E TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

As CMEs consistem em grandes ejeções de plasma magnetizado, quando observadas perto de 1 AU² (como ICMEs), a densidade de partículas varia amplamente, tipicamente de poucos a algumas dezenas de partículas por cm³, podendo atingir valores mais altos nas regiões de compressão. Esses eventos

² A densidades em 1 AU geralmente da ordem de 1-20 cm³, podendo exceder isso em regiões comprimidas como as bainhas.

ocorrem frequentemente após erupções solares e podem atingir velocidades significativamente superiores às do vento solar típico, variando entre 600 e 2000 km/s, em contraste com os 300 a 500 km/s do vento solar em condições normais.

Quando uma CME alcança a Terra e interage com a magnetosfera, comprime as linhas de campo magnético da Terra, aproximando a magnetopausa (limite entre a magnetosfera e o vento solar) e intensificando correntes elétricas no sistema magnetosférico. A compressão causada pelo aumento da pressão dinâmica do vento solar reduz o tamanho da magnetosfera no lado diurno, deslocando a magnetopausa e a frente de choque para mais próximo da Terra. A ocorrência e a intensidade da tempestade geomagnética associada dependem fortemente da orientação da componente vertical do campo magnético interplanetário (IMF). Em particular, quando essa componente está orientada para o sul (antiparalela ao campo magnético terrestre), favorece-se o processo de reconexão magnética na fronteira da magnetosfera, permitindo a entrada do plasma solar na magnetosfera da Terra (Mitra, 1974; Tascione, 2005).

Esse processo inicia a fase principal de uma tempestade geomagnética, caracterizada por um aumento significativo da corrente de anel (*ring current*) e pela intensificação das correntes eletrojatos nas regiões polares e aurorais. Posteriormente, a tempestade evolui para a fase de recuperação, durante a qual o sistema magnetosférico gradualmente retorna ao seu estado pré-distúrbio. Os distúrbios ionosféricos são estudados durante a fase principal e recuperação, dentre os parâmetros estudados são as perturbações na densidade eletrônica e conteúdo eletrônico total, no campo magnético externo e sistema de corrente ionosférico. Esses eventos podem causar severas perturbações em sistemas tecnológicos, como satélites, redes de energia elétrica e comunicações por rádio, além de afetar a propagação de sinais GNSS e comprometer a precisão de sistemas de navegação (Fagundes *et al.* 2023, 2025).

2.5.2 EXPLOSÕES SOLARES (SFs) E OS DISTÚRBIOS SÚBITOS IONOSFÉRICOS (SIDs)

O tema central deste trabalho são as erupções solares, também denominadas explosões solares. Neste estudo, adota-se a nomenclatura em inglês *solar flares* (ou

flares solares), bem como a sigla SF, por se tratar da forma mais amplamente utilizada na literatura científica para esse fenômeno.

Os SF, são explosões súbitas e intensas de radiação eletromagnética que ocorrem na atmosfera do Sol, geralmente associadas a regiões ativas próximas a manchas solares. Esses eventos resultam da liberação abrupta de energia acumulada nas linhas de campo magnético solar, por meio de processos de reconexão magnética na coroa solar. A energia liberada durante um SF pode atingir valores da ordem de 10^{27} a 10^{32} erg de alguns segundos a dezenas de minutos. Essa energia é emitida em um amplo espectro eletromagnético, que inclui ondas de rádio, micro-ondas, EUV, RX e raios gama (EMBRACE,2025).

A classificação dos *flares* é baseada na sua intensidade na faixa de RX (0,1 – 0,8 nm), expresso em W/m^2 conforme registrada por instrumentos a bordo de satélites, como os da série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*). A classificação dos flares A, B, C, M e X, sendo esta última a mais energética (Tabela 3). Trata-se de uma escala logarítmica, em que cada classe é 10 vezes mais intensa que a anterior e, cada classe é subdividida de 1 a 9, por exemplo, X1 a X9. *Flares* da classe X, por exemplo, pode liberar radiação suficiente para afetar profundamente o ambiente espacial próximo à Terra em escalas de tempo de minutos.

A radiação intensa proveniente de um *flare* pode ionizar de forma súbita as camadas ionosféricas D, E e F, provocando distúrbios conhecidos como SIDs. Esses distúrbios podem diminuir ou bloquear completamente as comunicações de rádio de alta frequência (*High Frequency* - HF) e comprometer a precisão de sistemas de navegação por satélite, como o GPS.

Além disso, os SFs ocorrem de forma isolada ou associadas a CMEs, o que intensifica os efeitos no ambiente espacial próximo da Terra. Por esse motivo, o estudo dos SFs é fundamental não apenas para a compreensão da física solar e heliosférica, mas também para o monitoramento e previsão de condições adversas no espaço geofísico, tema central da meteorologia espacial.

Tabela 3 - Classificação do *Solar Flare* de acordo com sua intensidade.

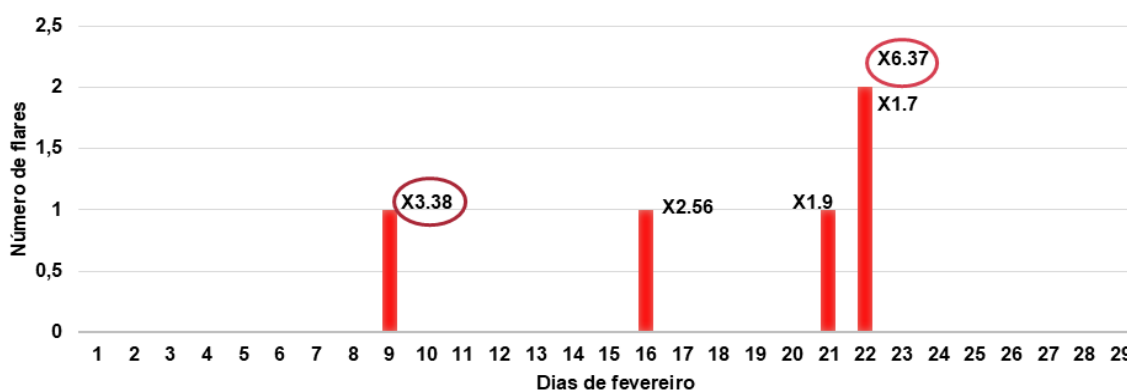
Categoria	Consequências	W/m²
X	São eventos grandes e intensos que podem afetar equipamentos eletrônicos, causando blecautes de rádios em todo o mundo e produzir tempestades geomagnéticas de longa duração.	$\geq 10^{-4}$
M	São eventos de média intensidade e podem causar blecautes nas regiões dos polos da Terra.	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
C	São eventos pequenas, não causam grandes efeitos no planeta Terra, porém caso tenham longa duração, podem produzir ejeções de massa coronal.	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$
B	São comuns e fracas e não costumam causar efeitos significativos na Terra. O fluxo de radiação quando não há erupção, está nesse faixa no máximo solar.	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
A	São comuns e fracas e não costumam causar efeitos significativos na Terra. O fluxo de radiação quando não há erupção, está nesse faixa no mínimo solar.	$\geq 10^{-7}$

Fonte: Adaptado [Spaceweatherlive](#) (2020)

3 DADOS

Este trabalho utiliza dados referentes ao mês de fevereiro de 2024, período no qual foram registrados os primeiros *flares* de categoria X do ano. Após um intervalo sem a ocorrência desse tipo de evento, voltou a ser observado com mais frequência, uma vez que não foram registrados durante setembro de 2017 e julho de 2021. O período de 2024, indica a fase inicial do máximo solar do ciclo 25, iniciado em dezembro de 2019 e com previsão de término em 2030. Ao longo desse mês ocorreram cinco SFs de categoria X, conforme mostra a Figura 5, sendo: X6.37 (no dia 22 às 22:34 UT), X3.38 (dia 09 às 13:14 UT), X2.56 (dia 16 às 06:53 UT), X1.9 (dia 21 às 23:07 UT) e X1.7 (dia 22 às 06:32 UT). Esses eventos aconteceram durante condições geomagnéticas calmas e atividade solar moderada-máxima (MAS-HSA). A análise concentra-se nos dois *flares* mais intensos (X6.37 e X3.38) com a escolha baseada na intensidade, e não na ordem cronológica, a fim de estudar os distúrbios ionosféricos causados por esses em uma escala global.

Figura 5 - Flares de categoria X no mês de fevereiro de 2024. Os dias estudados neste trabalho são os que estão circulos



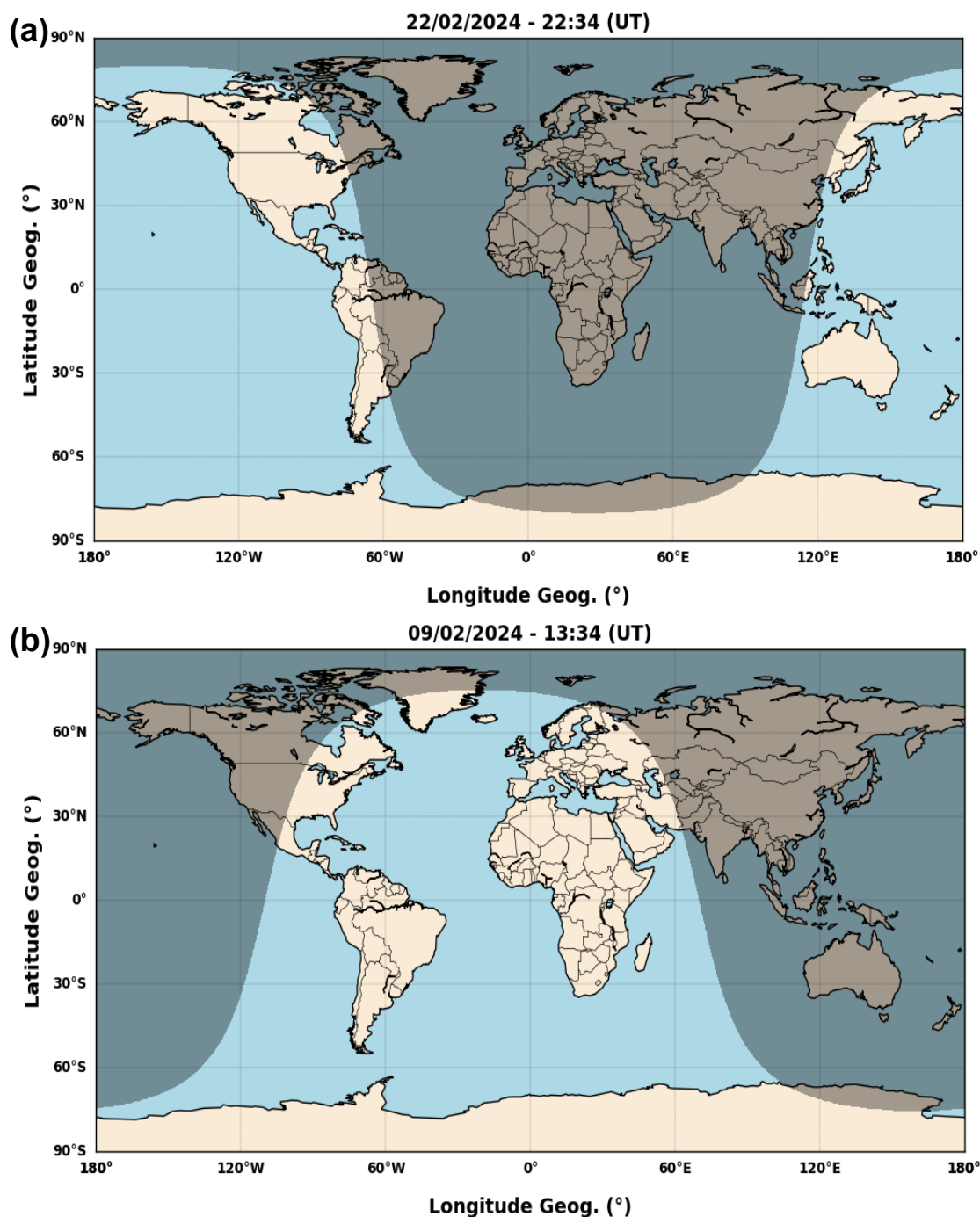
Fonte: A autora

3.1 DADOS SOLARES, INTERPLANETÁRIOS, GEOMAGNÉTICOS E IONOSFÉRICOS DOS EVENTOS DE FEVEREIRO DE 2024

As Figuras 5a e 5b mostram mapas indicado os setores iluminados e não iluminados do globo terrestre durante os SFs (X6.37 em 22/02/2024 e X3.38 em 09/02/2024), que serão investigados neste estudo.

No evento da classe X6.37(Figura 6a), estavam sob iluminação solar nas regiões das Américas, da Antártica, da Oceania e da Ásia (leste da Rússia e Japão). No segundo evento, de classe X3.38(Figura 6b), as áreas iluminadas incluíam a América do Sul, parte da América do Norte, a África, a Europa Ocidental e a Antártica.

Figura 6 - Mapas mostrando as áreas iluminadas (região clara) e não iluminadas (região escura) durante os eventos (a) X6.37 (22/02/2024) e (b) X3.38 (09/02/2024).



Fonte: A autora

Os eventos ocorreram sob condições geográficas diferentes de iluminação, o que pode ter influenciado de maneira distinta a resposta ionosférica.

A Tabela 4 apresenta a intensidade dos SFs e data de ocorrência, região solar ativa que deram origem aos *flares* e horários do início, máximo e fim de cada evento.

Tabela 4 - Intensidade, data, região ativa, início, máximo e fim dos SFs X6.37 e X3.38 que ocorreram em 22 e 09 de fevereiro de 2024, respectivamente.

SF - Data	Região Ativa	Início	Máximo	Fim
X6.37- 22/02/2024	3590	22:08	22:34	22:43
X3.38 - 09/02/2024	3575	12:53	13:14	13:32

Fonte: *Spaceweatherlive* (2024)

As correntes elétricas associadas à região do dínamo ionosférico podem modificar o campo geomagnético externo, refletindo-se nas variações observadas na superfície da Terra. Conforme discutido por [Luo et al. \(2023\)](#), um aumento na densidade eletrônica na região do dínamo implica intensificação da densidade de corrente elétrica, produzindo um efeito geomagnético associado. Esse efeito pode ser descrito a partir da lei de Ampère-Maxwell, $\nabla \times B = \mu_0 \Delta J$ da qual se obtém uma estimativa para a variação do campo magnético, $\nabla B \approx \mu_0 j_0 \delta_N \Delta h$, onde μ_0 é a constante magnética e Δh é a espessura da região do dínamo. j_0 é a densidade de corrente não perturbada, $\delta N = \frac{N}{N_0} - 1$ representa a variação relativa da densidade eletrônica. Em escala magnetosférica, os distúrbios geomagnéticos também estão associados à intensificação da corrente de anel (ou corrente anelar). Nesse contexto, o índice Dst foi desenvolvido para quantificar distúrbios geomagnéticos de grande escala, sendo amplamente utilizado como indicador da intensidade da corrente de anel magnetosférica globalmente simétrica.

Neste sentido, foi criado o índice Dst para avaliar os distúrbios geomagnéticos, nas estações de baixa latitude podem influenciar na intensidade do EEJ que é uma corrente globalmente simétrica a corrente do anel. Faz-se uma média horária da componente horizontal do campo geomagnético (H), utilizado 4 magnetômetros (Anexo 1) localizados em estações em baixas e médias latitudes e é disponibilizado

no site da Universidade de Kyoto³. Quanto mais negativo for o Índice Dst mais intenso será o distúrbio geomagnético. Segundo o índice Dst as tempestades geomagnéticas podem ser classificadas em muito intensa, intensa, moderada e fraca (Tabela 5).

Tabela 5 - Classificação de tempestade geomagnética com base no índice Dst

Intensidade	DST (nT)
Muito Intensa	<-250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: Adaptado Gonzalez et al. (1994)

O índice K é uma medida quantitativa da atividade geomagnética para um determinado local, utilizando a componente horizontal do geomagnético, e é calculado a cada 3 horas. Sua escala quase-logarítmica varia de 0 (condições calmas) a 9 (atividade severa). Segundo o site National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), o índice Kp⁴ (com “p” para planetário), é uma média global derivada de 13 observatórios (Anexo 2) distribuídos entre latitudes geomagnéticas de 44° a 60° (médias latitudes), permitindo uma estimativa da atividade geomagnética em escala global.

Além desses índices, outros índices e parâmetros são utilizados para a caracterização do ambiente espacial e das tempestades geomagnéticas. Por exemplo, o número de manchas solares⁵, que está relacionada com a atividade solar. Considera-se que valores mensais de manchas solares maiores que 150 caracterizam períodos de atividade solar máxima, entre 50 e 150 atividade moderada e menor que 50 baixa. Está bem estabelecido na literatura que durante o período de atividade solar máxima e moderada ocorre um número maior de SFs e CMEs (Tsurutani *et al.*, 1992). A velocidade do vento solar (V_p)⁶ e densidade de prótons (N_p)⁵ são parâmetros importantes para caracterizar o meio interplanetário. Durante períodos calmos, a velocidade do vento solar próximo à Terra é tipicamente da ordem de 300–500 km/s,

³ Universidade de Kyoto – Disponível em: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

⁴ Centro Alemão de Pesquisa em Geociências - Disponível em: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data>

⁵ Observatório Real da Bélgica – Disponível em: <https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>

⁶ NASA - Disponível em: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

com densidade de prótons em torno de 3–10 partículas/cm³ (podendo variar). Durante a passagem de uma ICME, a velocidade pode aumentar para ~400–1000 km/s (e, em casos extremos, mais), e a densidade pode apresentar valores de poucos a algumas dezenas de partículas/cm³, sendo frequentemente mais elevada na região de compressão à frente da ICME. (Gonzalez *et al.*, 1994).

A radiação RX⁷ e EUV⁸ são monitoradas de forma contínua pelos satélites GOES e SOHO, que fornece dados em tempo real sobre a intensidade dos RX e EUV, que são importantes para identificação, classificação e análise de SFs. O GOES utiliza dois canais para monitorar o RX (λ 0,05 - 0,4 nm e λ 0,1 - 0,8 nm) com resolução temporal por segundo. Além disso, realiza a medição da irradiância solar na faixa de EUV em diversos comprimentos de onda⁹, incluindo 25,6 nm, 28,4 nm, 30,4 nm, 117,5 nm, 121,6 nm, 133,5 nm e 140,5 nm, com resolução temporal de 1 minuto. No entanto, os dados de EUV apresentaram descontinuidades no dia 22 de fevereiro de 2024 e, por essa razão, não foram utilizados na análise. Por sua vez, o satélite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), um dos vários satélites que também observa o Sol em diferentes faixas espectrais, com destaque para o fluxo de EUV entre os intervalos de 26-34 nm e 0,1-50 nm, com resolução a cada 15 segundos. Os períodos geomagneticamente calmos e perturbados podem ser classificados utilizando os índices Dst (Disturbance Storm Time) e Kp (Planetary Kennziffer). Por sua vez, os parâmetros solares e interplanetários, como a velocidade do vento solar (Vp), a densidade de partículas (Np), o campo magnético interplanetário total (B), sua componente vertical (Bz), além das radiações em RX e EUV, são importantes para caracterizar o meio interplanetário e os possíveis distúrbios ionosféricos de origem solar.

⁷ NOAA - Disponível em: https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes18/l2/data/xrsf-l2fx1s_science/2024/02/

⁸ LASP - Disponível em: https://lasp.colorado.edu/eve/data_access/eve_data/lasp_soho_sem_data/long/15_sec_avg/2024/

⁹ O sensor EUVS (Extreme Ultraviolet Sensor), a bordo dos satélites GOES-R, mede a irradiância espectral solar nas faixas do extremo ultravioleta (EUV) e do ultravioleta distante (FUV), organizadas em três canais: EUVS-A (25–31 nm), EUVS-B (117–141 nm) e EUVS-C (~280 nm). – Disponível em: https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observing-satellites/goes/goes16/l1b/docs/GOES-R_EXIS_EUVS_L1b_Data_ReadMe.pdf

3.2 ELETROJATO EQUATORIAL

As oscilações diárias no campo magnético terrestre refletem a complexa interação entre o campo geomagnético e as correntes elétricas geradas na atmosfera superior e tem uma contribuição secundária das correntes induzidas. Essas correntes atmosféricas são impulsionadas principalmente pelos ventos de maré que sopram através da ionosfera condutiva ao longo das linhas do campo magnético, produzindo campos elétricos e correntes associadas, conforme descrito por [Forbes \(1981\)](#). No contexto equatorial, essa dinâmica dá origem a uma intensa corrente elétrica zonal, o EEJ.

O EEJ flui predominantemente no sentido leste durante o dia, ao longo do equador magnético, está centrada próximo de 100 km altitude, na região E da ionosfera ([Hargreaves, 1992](#)). Durante o período diurno, o EEJ atinge sua máxima intensidade devido à maior condutividade da região E. À noite, com a forte redução da condutividade ionosférica, o eletrojato enfraquece substancialmente; em algumas ocasiões, o sentido pode reverter (corrente para oeste), caracterizando o Contra-Eletrojato Equatorial (CEJ). Essa reversão está associada a mudanças no campo elétrico zonal e à dinâmica dos ventos termosféricos/marés atmosféricas que controlam o dínamo ionosférico.

A eletrodinâmica do EEJ se origina na chamada região do dínamo E, onde o movimento do ar neutro através das linhas do campo geomagnético gera uma força eletromotriz na ionosfera. Os campos elétricos induzidos por esse movimento não podem ser completamente cancelados pelos campos de polarização irrotacionais, o que resulta em uma corrente líquida, conhecida como corrente de Hall, que flui verticalmente e, devido à geometria equatorial e aos limites condutivos da camada E, dá origem a uma forte corrente zonal na direção leste. Esse fenômeno caracteriza o EEJ como uma intensificação localizada do sistema global de correntes Sq (solar quiet), representando uma anomalia de grande importância na circulação elétrica da ionosfera equatorial ([Forbes, 1981](#)).

As variações na intensidade do EEJ estão intimamente ligadas à dinâmica dos campos elétricos e magnéticos ionosféricos, que, são fortemente modulados pela atividade solar. A radiação RX/EUV associada aos SFs aumentam rapidamente a ionização na ionosfera iluminada, com efeitos marcantes na região D (absorção em HF) e, sobretudo, na região E, onde a elevação da densidade eletrônica intensifica as

condutividades de Pedersen e Hall. Esse aumento de condutividade reforça as correntes ionosféricas do tipo Sq no hemisfério diurno, produzindo variações impulsivas do campo magnético em solo, conhecidas como *crochets*, SID ou efeito do *solar flare* (SFE - *solar flare effect*). Em baixas latitudes, essas perturbações podem também se manifestar como um aumento rápido do EEJ, especialmente próximo ao meio-dia local, conforme descrito por [Abdu et al. \(2017\)](#)

O cálculo da intensidade do EEJ é geralmente obtido pela diferença entre a componente horizontal do campo magnético (ΔH) de duas estações, sendo uma localizada sobre ou próxima ao equador magnético e uma estação de referência, não equatorial, localizada fora da influência direta do EEJ, tipicamente entre 6 e 9° de latitude magnética de distância (dip latitude). Essa diferença é expressa conforme descrita pela Equação 1:

$$\Delta H(t) = \Delta H_E(t) - \Delta H_{NE}(t) \quad (1)$$

em que $H_E(t)$ corresponde à componente H observada na estação equatorial e $H_{NE}(t)$ representa a mesma componente medida na estação de referência. A diferença entre esses dois valores fornece a contribuição estimada do EEJ, $\Delta H(t)$, em cada instante, permitindo caracterizar sua variabilidade temporal e sua resposta a diferentes condições ionosféricas e fenômenos solares

Durante eventos de *flare*, aumentos súbitos e simultâneos no ΔH observados em latitudes equatoriais indicam intensificação do EEJ. Essa intensificação ocorre de forma proporcional e no mesmo sentido da corrente pré-existente refletindo o reforço temporário da condutividade ionosférica induzida pela radiação ionizante ([Abdu et al., 2017](#)).

A complexidade das respostas do EEJ a SFs aumenta quando os eventos ocorrem simultaneamente a penetrações de campos elétricos de origem magnetosférica, como o campo elétrico de penetração imediata (PPEF – Prompt Penetration Electric Field) e o campo elétrico do dínamo de perturbação (DDEF – Disturbance Dynamo Electric Field). Esses campos podem atuar em sentidos opostos e modificar substancialmente a resposta ionosférica de baixa latitude ([Abdu et al., 2017](#)).

Nas regiões equatoriais e de baixa latitude, os PPEFs produzem alterações rápidas no campo elétrico ionosférico, resultantes da penetração de campos elétricos magnetosféricos durante distúrbios geomagnéticos. Esses campos podem ocorrer em

dois regimes principais, conhecidos como undershielding e overshielding, associados ao ajuste do sistema de correntes magnetosféricas e ao processo de blindagem da plasmasfera (Kelley, 2009). Em condições de undershielding, os PPEFs são direcionados para leste no lado diurno e para oeste no lado noturno, reforçando o campo elétrico gerado pelo dínamo ionosférico em condições geomagnéticas calmas. Como consequência, ocorre um aumento da deriva vertical do plasma ($E \times B$), intensificando a elevação do plasma ionosférico e podendo fortalecer o EEJ. Por outro lado, durante episódios de overshielding, os PPEFs apresentam polaridade oposta à do campo elétrico de fundo gerado pelo dínamo ionosférico, resultando em um enfraquecimento do campo elétrico zonal e, conseqüentemente, na redução da intensidade do EEJ. Em escalas de tempo mais longas, o DDEF, gerado por ventos neutros associados a tempestades geomagnéticas, tende a produzir campos elétricos para oeste no lado diurno, contribuindo também para a diminuição da intensidade do eletrojato equatorial.

Em condições normais e calmas, o efeito de um *flare* sobre o sistema de correntes Sq manifesta-se como um aumento positivo na componente ΔH no lado equatorial do foco Sq, representando uma corrente para leste, e uma variação negativa nas latitudes mais altas, indicando corrente para oeste. Entretanto, no caso do EEJ, a resposta é mais complexa, envolvendo a superposição de campos elétricos induzidos e a resposta temporal do plasma ionosférico.

O impacto de um *flare* sobre o EEJ caracteriza-se, portanto, por um aumento abrupto da intensidade da corrente, seguido de um decaimento gradual, controlado pela taxa de redução do fluxo ionizante. Esse comportamento foi amplamente documentado por Abdu et al. (2017), que também ressaltam que a natureza da resposta do EEJ depende fortemente do histórico das perturbações magnéticas anteriores e da evolução temporal dos campos elétricos durante e após o evento. Quando múltiplas erupções solares ocorrem em sequência, separadas por intervalos curtos, os efeitos cumulativos dos campos de perturbação e das correntes de tempestade podem tornar a resposta do EEJ altamente não linear e variável.

4 INSTRUMENTAÇÃO E TÉCNICAS

Nessa seção serão apresentados os equipamentos e ferramentas que constituem a base de dados utilizados nesse trabalho: os magnetômetros, responsáveis pela medição das componentes do campo magnético (ΔH e ΔZ), e os receptores GNSS, que permitem determinar o TEC. Também é descrita a ferramenta computacional desenvolvida para organizar, processar e visualizar essas informações.

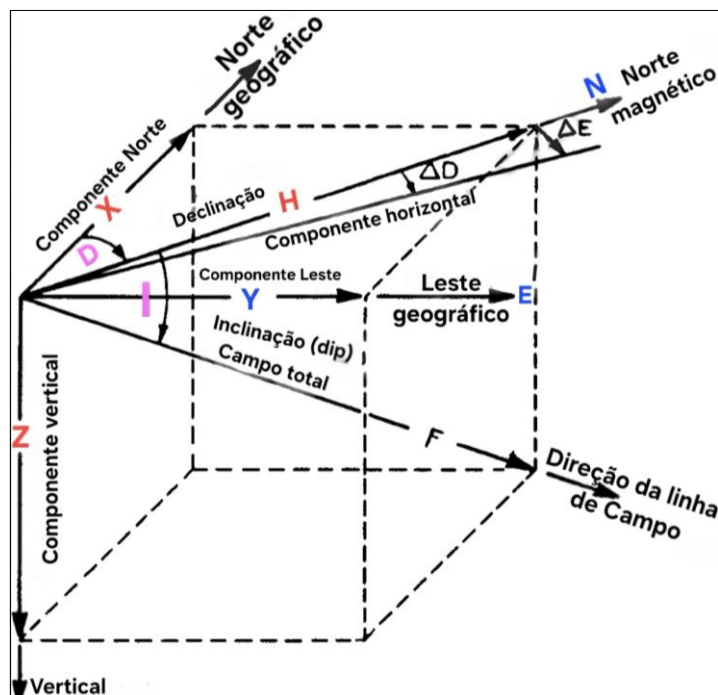
4.1 MAGNETÔMETRO

Os campos magnéticos estão presentes no nosso cotidiano e possuem aplicações, tanto em contextos científicos quanto tecnológicos. O monitoramento do campo magnético é realizado por instrumentos denominados magnetômetros, que são dispositivos destinados à medição de campos magnéticos, amplamente empregados em aplicações científicas, tecnológicas e industriais, como prospecção mineral, monitoramento da atitude de satélites, ensaios não destrutivos e estudos geofísicos. Existem outros equipamentos como gaussímetros e teslômetros que são utilizados em situações em que se pretende determinar a densidade de fluxo magnético, expressos em Gauss (G) ou Tesla (T), dependendo do tipo de sensor, da amplitude do campo medido e sistema de unidades adotado. Na prática, em estudos geomagnéticos, é comum utilizar também o nanotesla (nT), devido à menor intensidade do campo magnético terrestre.

No contexto do clima espacial, o Programa EMBRACE/INPE (Estudo e Monitoramento brasileiro do Clima Espacial / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) opera uma rede de magnetômetros do tipo *fluxgate* distribuídos pelo território nacional, instalados e orientados segundo três eixos ortogonais alinhados ao norte magnético. Esses sensores permitem registrar as componentes X, Y e Z do campo geomagnético (Figura 7), com precisão típica da ordem de 1 nT e resposta espectral que abrange desde aproximadamente 0,1 Hz até o regime DC (0 Hz). Além dessa rede, destaca-se o programa INTERMAGNET (*International Real-time Magnetic Observatory Network*), uma iniciativa global de observatórios geomagnéticos digitais. A rede integra estações ao redor de todo o mundo e disponibiliza dados contínuos, compatíveis e comparáveis internacionalmente, possibilitando análises de grande

escala espacial e temporal, das variações geomagnéticas. Diferentemente do EMBRACE, o INTERMAGNET utiliza o norte geográfico como referência para os eixos de medição (Figura 7).

Figura 7 - Decomposição do campo magnético em um sistema de coordenadas geográficas e cartesianas.



Fonte: Adaptado Campbell (1997 – p5)

A descrição do campo geomagnético pode ser representada de diferentes formas, dependendo do sistema de coordenadas adotado, conforme Figura 7. No sistema geográfico cartesiano, as componentes X, Y e Z representam, respectivamente, o norte geográfico, o leste geográfico e a direção vertical para baixo. Outra alternativa é representá-lo pelas componentes cilíndricas H, D e Z, em que H indica a intensidade horizontal na direção do norte magnético, D é o ângulo de declinação magnética (em graus) e Z corresponde à componente vertical descendente. Para uma descrição completa do campo magnético da Terra, utilizam-se as três componentes de intensidade ortogonais (X, Y e Z) juntamente com a intensidade total F, que representa o módulo do vetor campo magnético, e dois ângulos a declinação (D) e a inclinação magnética (I). A inclinação I é definida como o ângulo entre o vetor do campo magnético e o plano horizontal, sendo positiva no hemisfério norte, onde o campo aponta para baixo, e negativa no hemisfério sul, onde o campo aponta para cima. De modo equivalente, essa descrição pode ser expressa por duas componentes de intensidade e um ângulo (H, Z e D).

Além disso, é possível descrever o campo magnético utilizando o sistema de coordenadas magnético local, composto pelas componentes N, E e Z, onde N representa o norte magnético local, E o leste magnético local enquanto Z é idêntico à componente vertical utilizada no sistema geográfico. Essa representação é amplamente empregada em análises regionais e em estudos diretamente relacionados à resposta ionosférica e geomagnética de origem solar.

O estudo das perturbações nas componentes do campo geomagnético induzidos pelos *flares* envolve uma análise para separar as componentes internas e externa do campo geomagnético. Assume-se que a componente interna não varia muito ao longo dos anos e que a meia noite local (hora local - LT), dos dias calmos, a componente externa é praticamente nula. Portanto, subtraindo os valores instantâneos $H(t)$ e $Z(t)$ pelas respectivas médias dos dias calmos a meia noite ($\bar{H}_Q (meia\ noite)$ e $\bar{Z}_Q (meia\ noite)$) obtém-se a variação ΔH e ΔZ , que fornece a variação do campo geomagnético externo, dada pelas Equações 2 e 3. A resolução temporal do ΔH e ΔZ é de 1 minuto. Neste estudo, foram utilizados os 10 dias mais calmos do mês de fevereiro, conforme listados na Tabela 6, disponíveis na base de dados do World Data Center for Geomagnetism, Kyoto¹⁰.

$$\Delta H(t) = H(t) - \bar{H}_Q (meia\ noite) \quad (2)$$

$$\Delta Z(t) = Z(t) - \bar{Z}_Q (meia\ noite) \quad (3)$$

Esse procedimento permite eliminar as perturbações relacionadas a sistemas de correntes ionosféricas, como a corrente Sq (*solar quiet*) que fluem na ionosfera durante dias calmos, eliminando o campo principal da Terra e o ciclo diurno regular observado em condições geomagneticamente tranquilas (Nogueira *et al.*, 2015; DeNardini *et al.*, 2018; Fagundes *et al.*, 2024).

Tabela 6 - Lista dos 10 dias mais calmos para o mês de fevereiro de 2024.

DIAS CALMOS	
19/02/2024 - Q1	21/02/2024 - Q6
03/02/2024 - Q2	07/02/2024 - Q7
02/02/2024 - Q3	29/02/2024 - Q8
23/02/2024 - Q4	16/02/2024 - Q9
15/02/2024 - Q5	17/02/2024 - Q10

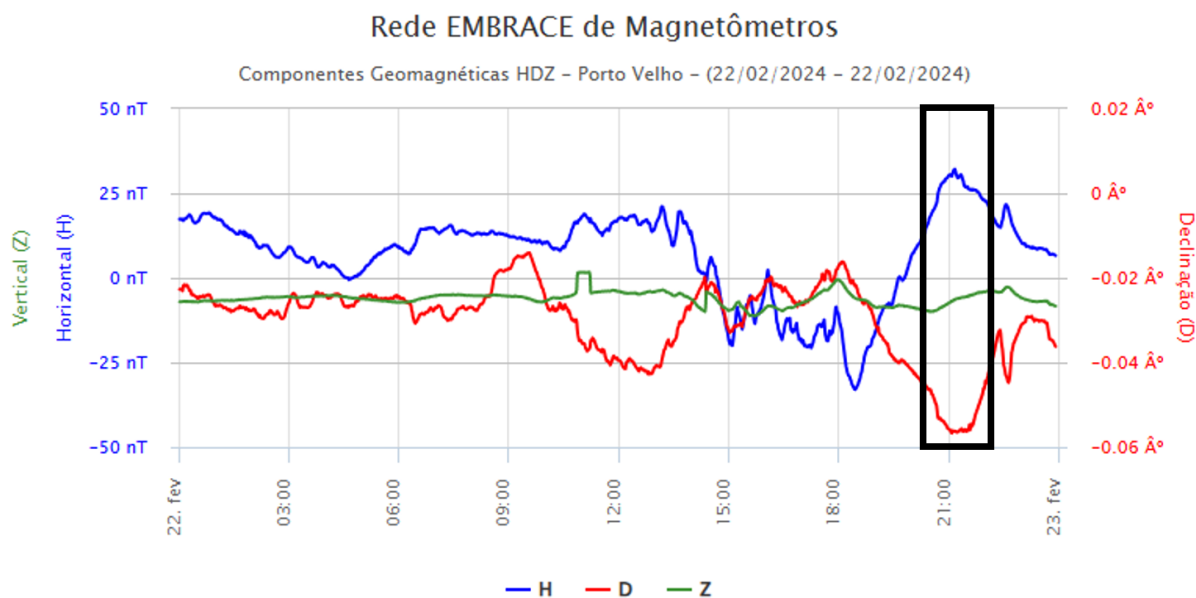
Fonte: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

¹⁰ Universidade de Kyoto – Disponível em: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>

A análise do ΔH e ΔZ foi realizada a partir de dados de magnetômetros distribuídos globalmente. Os dados de magnetômetros utilizados foram obtidos por meio das redes de INTERMAGNET e EMBRACE que oferecem cobertura global e regional de alta resolução. Informações sobre a estação, como nome, latitude, longitude, dip latitude e rede, estão contidas no Apêndice A. Outras informações, como dados faltantes, estão contidas no Apêndice B.

O aumento no fluxo do RX e EUV durante os SFs é frequentemente acompanhado por variações no campo geomagnético, cuja assinatura em magnetogramas (representações gráficas das variações do campo magnético) é conhecida como “*crochet*” ou SFE, conforme mostra a Figura 8. Esse fenômeno é interpretado como uma mudança súbita nos parâmetros do campo geomagnético, causada pela intensificação repentina no sistema de corrente ionosférica global causada pela condutividade ionosférica aumentada induzida pelos *flares* (Nogueira et al.,2015). Neste sentido, será investigado a relação temporal entre os fluxos de radiação RX e EUV e as perturbações geomagnéticas observadas por meio das variações de ΔH e ΔZ do campo geomagnético.

Figura 8 - Magnetograma da Rede Embrace na estação Porto Velho no dia 22/02/2024. O retângulo preto destaca as variações no campo magnético.



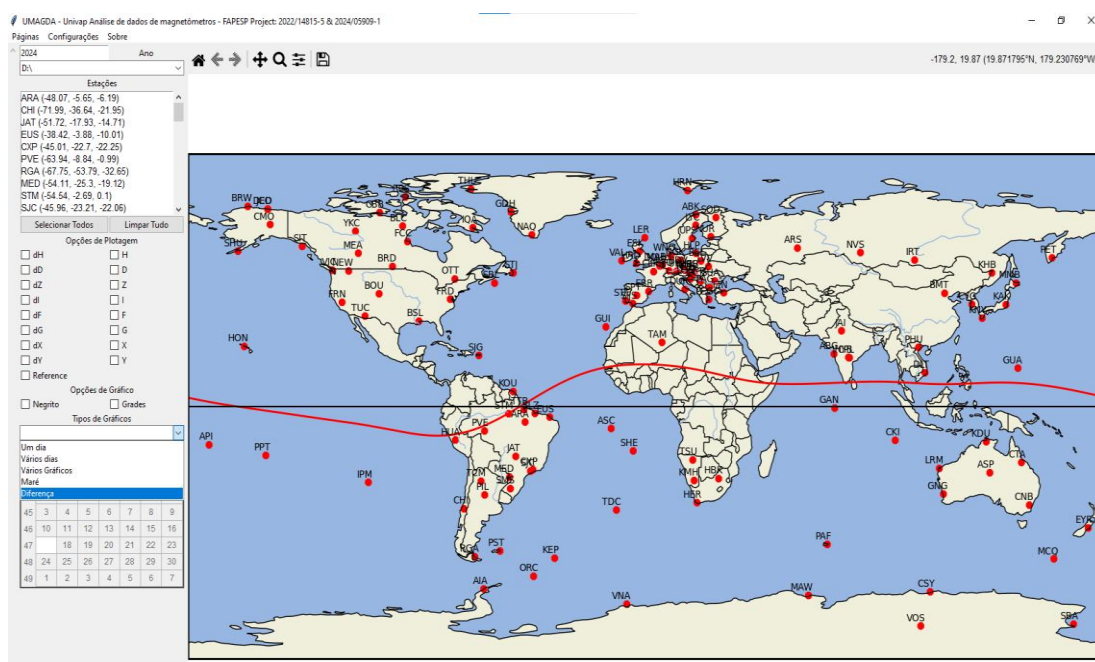
Fonte: Adaptado [Embrace](#) (2024)

4.1.1 UMAGDA – Univap Magnetometer Data Analysis

A partir da base de informações dados geomagnéticos de magnetômetros, desenvolveu-se na Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) a ferramenta UMAGDA (Univap Magnetometer Data Analysis), um software implementado em linguagem Python com interface gráfica interativa. Seu objetivo proporciona uma plataforma unificada para visualização, download e análise de dados provenientes das redes EMBRACE e INTERMAGNET. Essas redes, compostas por cerca de 170 estações distribuídas globalmente (Figura 9), disponibilizam dados com resolução temporal de um minuto em arquivos no formato .MIN.

O UMAGDA foi projetado para padronizar a aquisição e o processamento desses dados, permitindo gerar automaticamente gráficos das componentes X, Y e Z, bem como parâmetros derivados, como ΔH , ΔD e ΔZ , fundamentais para a análise de variações e para o estudo de fenômenos associados à atividade solar. A ferramenta também possibilita comparações entre períodos calmos e perturbados, viabilizando a investigação de marés magnéticas, assinaturas sazonais e variações ao longo do ciclo solar. Assim, o UMAGDA constitui um recurso robusto para o estudo da variabilidade diurna, sazonal e intermediária do campo geomagnético, contribuindo para a compreensão da resposta da ionosfera e da magnetosfera às diversas condições de atividade solar.

Figura 9 - Interface do UMAGDA



Fonte: A autora

4.2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE (GNSS)

Os GNSS, consistem em redes de constelações de satélites que transmitem continuamente sinais de posicionamento e tempo para toda a superfície terrestre. Entre os principais sistemas atualmente em operação encontram-se o GPS dos Estados Unidos da América, GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistem* - Sistema Orbital Global de Navegação por Satélite) da Rússia, Galileo da União Europeia e o BeiDou (ou BDS - *BeiDou Navigation Satellite System* - Sistema de Navegação por Satélite BeiDou) da China. A combinação dessas constelações amplia a disponibilidade de satélites, que melhora a geometria dos rastros e aumenta a precisão das soluções de navegação em aplicações civis e militares. Atualmente, os receptores GNSS estão integrados a dispositivos móveis, como smartphones, sistemas de navegação aérea e marítima, além de aplicações científicas e geofísicas. Além das aplicações tradicionais em posicionamento, os GNSS tornaram-se ferramentas essenciais para a investigação ionosférica. A recepção simultânea de múltiplas frequências e a grande quantidade de satélites visíveis em cada instante ampliam a amostragem espacial e temporal da ionosfera, permitindo detectar perturbações como cintilação, irregularidades de pequena e grande escala e variações rápidas na densidade eletrônica. A resiliência do sistema aumenta quando múltiplas constelações são utilizadas, reduzindo os impactos dos atrasos de propagação e da degradação do sinal causada por distúrbios ionosféricos.

Entre os parâmetros mais importantes derivados de observações GNSS está o TEC, que quantifica o número de elétrons ao longo do caminho satélite–receptor. Sua variação é diretamente influenciada por processos naturais, como a radiação solar em EUV e RX, e por eventos como SFs, que aumentam significativamente a ionização das camadas ionosféricas.

O GPS, primeiro sistema de navegação global, entrou em operação em 1993 e é composto por mais de 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais a aproximadamente 20.350 km de altitude (GPS.gov). Cada satélite completa uma órbita em cerca de 12 horas e transmite continuamente sinais de navegação contendo código, fase e tempo preciso, mantidos por relógios atômicos com estabilidade da ordem de nanossegundos. As frequências principais utilizadas são L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz), às quais se soma a portadora L5 (1176,45 MHz), disponibilizada para uso civil a partir de 2006.

A propagação desses sinais através da ionosfera é afetada pela presença de elétrons livres, que causam atrasos diferentes em cada frequência devido à natureza dispersiva do meio. Essa diferença permite estimar o atraso ionosférico e, conseqüentemente, o TEC. Receptores de dupla frequência, como os presentes nas redes RBMC e UNAVCO, medem continuamente códigos e fases das portadoras, possibilitando a determinação precisa do TEC ao longo do rastro satélite–receptor.

Um único receptor GNSS é capaz de observar simultaneamente entre 6 e 12 satélites, permitindo monitoramento contínuo e de alta resolução temporal do TEC (Seemala; Valladares, 2011).

4.2.1 CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS - TEC

O TEC é definido como a integral da densidade eletrônica ao longo do caminho de propagação entre o satélite e o receptor conforme descrito pela Equação 4.

$$TEC = \int_s^r Ne ds \quad (4)$$

onde Ne representa a densidade dos elétrons e ds é um elemento de comprimento entre o satélite (s) e o receptor (r). É expresso em TECu (Total Electron Content Units), onde 1 TECU equivale a 10^{16} elétrons/m².

As ondas de rádio são diretamente influenciadas pelos elétrons livres ao longo da trajetória. Quanto maior o número de elétrons, maior o atraso sofrido pelo sinal. As variações do TEC refletem a fotoionização induzida pela radiação solar (EUV e RX) e os processos de transporte, difusão e recombinação que regem a dinâmica das regiões E e F da ionosfera.

De acordo com Kelley (2009), a variação do TEC em regiões equatoriais e de baixas latitudes não é determinada apenas pela geometria solar, latitude magnética e hora local, mas é fortemente influenciada por processos eletrodinâmicos que controlam a redistribuição do plasma ionosférico. Destaca-se, o EEJ. O EEJ está intrinsecamente ligado à Anomalia de Ionização Equatorial (EIA – *Equatorial Ionization Anomaly*), que se manifesta como dois máximos de densidade eletrônica entre aproximadamente $\sim 15^\circ$ e 20° de latitude magnética ao norte e ao sul, formados pelo efeito fonte, no qual o campo elétrico zonal para leste, gerado pelo dínamo equatorial e modulado pelos ventos neutros, promove a elevação do plasma a altitudes mais elevadas e sua posterior difusão ao longo das linhas de campo magnético, onde as taxas de recombinação são menores.

A determinação do TEC pelo GNSS baseia-se na diferença de atraso entre as frequências L1 e L2, que se relaciona à densidade eletrônica ao longo do caminho. O atraso ionosférico é dado por:

$$\Delta t = \frac{40,3 \text{ TEC}}{f^2} \quad (5)$$

onde TEC representa o conteúdo eletrônico total ao longo do caminho do sinal (em m^{-2}), f é a frequência do sinal GNSS (Hz) e 40,3 é uma constante associada às propriedades eletromagnéticas do plasma ionosférico.

A fase e o código sofrem atrasos opostos, conforme [Hofmann-Wellenhof et al. \(2001\)](#):

$$I_{fR}^S = -\frac{40,3 \text{ TEC}}{f_1^2}, \quad (6)$$

e

$$I_{gR}^S = \frac{40,3 \text{ TEC}}{f_1^2} \quad (7)$$

Para duas frequências (f_1 e f_2), a diferença de fase permite isolar o TEC

$$\text{TEC} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} (\phi_1 - \phi_2) \quad (8)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são as fases das portadoras, e f_1 e f_2 são as frequências que foram transmitidas pelo satélite GPS.

O valor inicialmente obtido corresponde ao Slant TEC (STEC), medido ao longo da trajetória oblíqua entre o satélite e receptor (Figura 10). Para estudos regionais ou globais, esse valor deve ser convertido para o TEC vertical (VTEC). Para calcular o conteúdo total de elétrons na direção vertical utiliza-se a relação baseada no modelo de camada fina da ionosfera (thin layer model), conforme apresentado por [Hofmann-Wellenhof et al. \(2001\)](#):

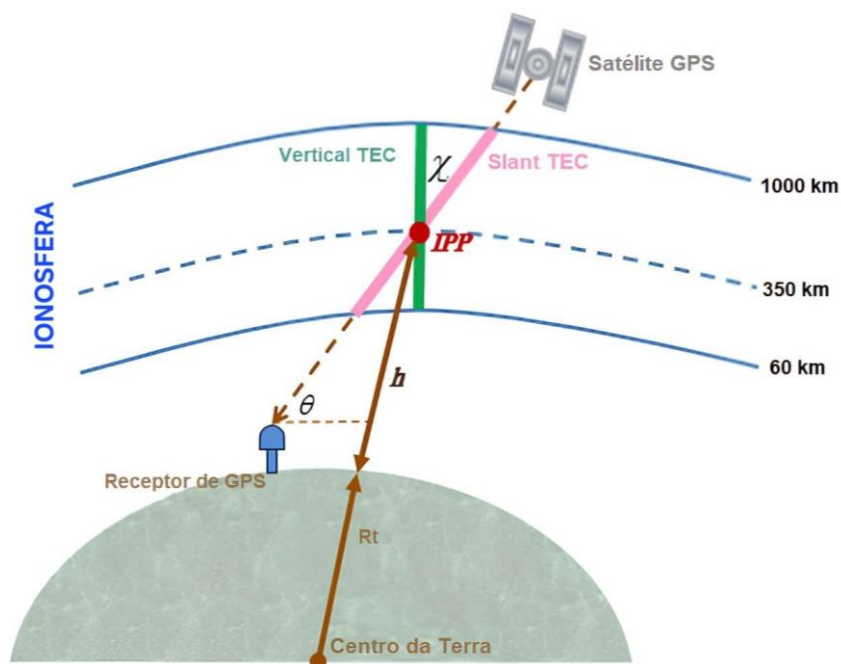
$$\text{VTEC} = \cos(z') \text{ STEC} \quad (9)$$

O cosseno pode ser substituído por: $\left(1 - \frac{R_T^2 \cos^2(E)}{(R_T+h)^2}\right)^{-1/2}$, o que resulta na Equação 10:

$$\text{VTEC} = \text{STEC} \left(1 - \frac{R_T^2 \cos^2(E)}{(R_T+h)^2}\right)^{-1/2} \quad (10)$$

onde R_T é o raio médio da Terra (~ 6371 km), E é o ângulo de elevação do satélite GPS e h é a altura efetiva da camada ionosférica (~ 350 km).

Figura 10 - Trajetória geométrica do sinal GPS de um satélite até um receptor terrestre através da ionosfera.



Fonte: Adaptado [Silwal et al \(2021\)](#)

Além da análise do TEC, o cálculo da Taxa de Variação do TEC (ROT – Rate of TEC), calcula a taxa temporal de atraso ionosférico. Este parâmetro indica as flutuações de fase causadas por irregularidades ionosféricas. É calculado como o quociente entre o atraso ionosférico e o intervalo de tempo, e é expresso em TECU/minuto, cuja é dada pela Equação 11:

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (11)$$

expresso em TECU/min. Esse parâmetro é sensível a irregularidades de pequena escala e cintilação ionosférica.

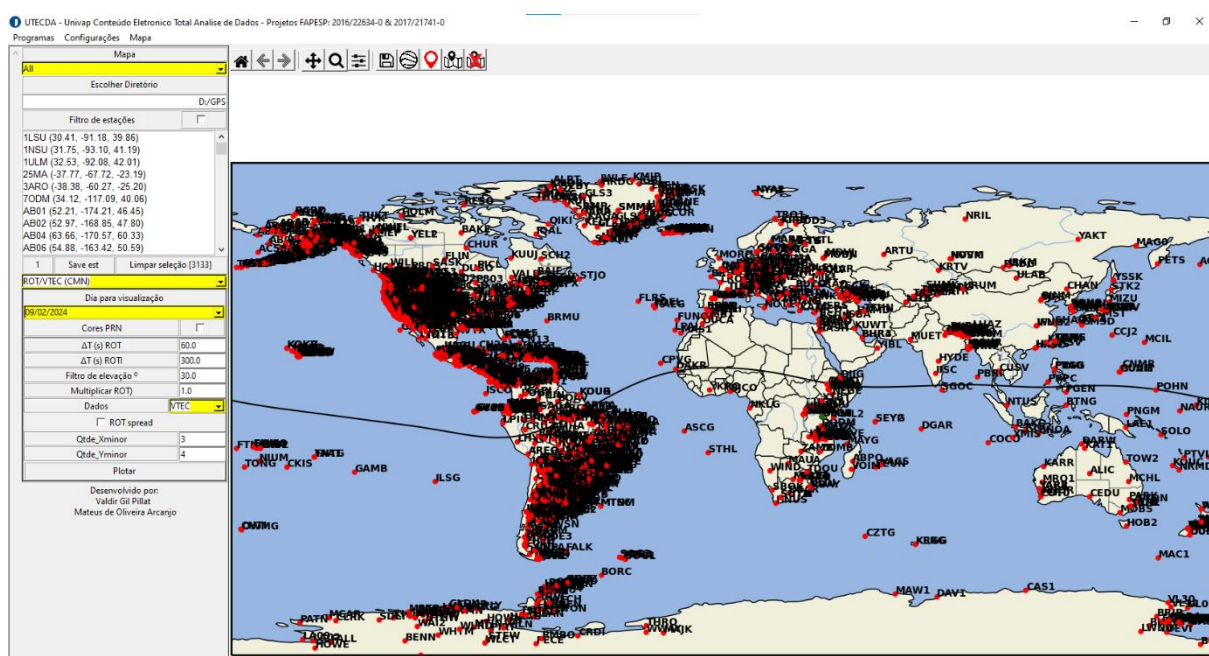
4.2.2 UTECDA – Univap Total Electronic Content Data Analysis

A ferramenta UTECDA (Univap Total Electronic Content Data Analysis) também desenvolvida pela Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) (Figura 11) foi criada para automatizar e otimizar a análise de dados ionosféricos obtidos por receptores GPS de dupla frequência, utilizados na determinação do TEC. O software utiliza

observações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) que são obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da UNAVCO (Consórcio da Universidade NAVSTAR - *University NAVSTAR Consortium*), ambas capazes de registrar códigos e fases das portadoras com resolução de 15 segundos e disponibilizar dados em formato RINEX.

O UTECDA processa os dados a partir do GPS-TEC, que permite a estimativa do TEC com resolução temporal de 1 minuto, resultando em aproximadamente 1440 medições diárias por estação (Arcanjo; Pillat, 2018). A ferramenta permite organizar, visualizar, comparar e mapear a variabilidade espaço-temporal do TEC durante períodos calmos e perturbados.

Figura 11 - Interface UTECDA.



Fonte: A autora

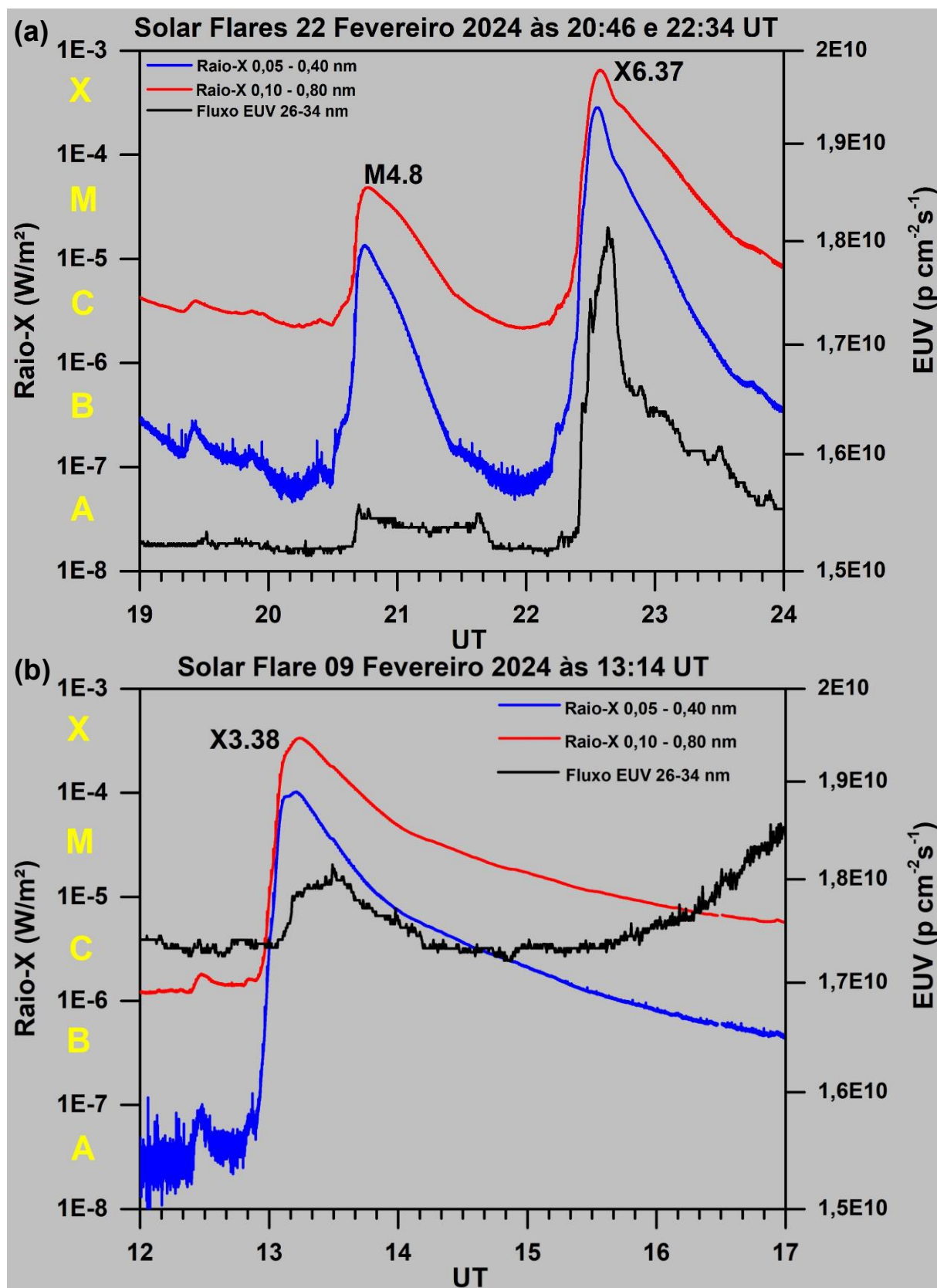
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise integrada das respostas geomagnéticas e ionosféricas associadas aos SFs ocorridos em 22 de fevereiro de 2024 com máximo às 22:34 UT (classe X6.37) e no dia 9 de fevereiro de 2024 às 13:14 UT (classe X3.38). O objetivo é caracterizar os padrões temporais, espaciais e latitudinais das perturbações permitindo a identificação e classificação dos distúrbios ionosféricos induzidos por radiação solar intensa.

As assinaturas radiativas dos eventos foram observadas nas variações dos fluxos de radiação RX (Figura 12), nos comprimentos de onda de 0,05-0,4 nm (linha azul) e de 0,1-0,8 nm (linha vermelha) e do fluxo de EUV, nos intervalos de 26-34 nm (linha preta). A Figura 12a são apresentados, os dados correspondentes aos SFs de 22 de fevereiro de 2024, enquanto na Figura 12b o SF do dia 09 de fevereiro de 2024. Em ambos os casos se observa um aumento abrupto nos fluxos de radiação durante a ocorrência dos *flares*, evidenciando uma correspondência temporal entre o incremento da radiação solar e os distúrbios ionosféricos analisados neste estudo.

Quando ocorre uma SF, há um aumento abrupto na emissão de radiação, e há um incremento significativo na emissão de radiação nas faixas RX e EUV, conforme descrito por [Mitra \(1974\)](#). Nos dois eventos analisados (Figura 12), os máximos entre as radiações RX ocorrem quase que simultâneos ao SF no dia 22 e no dia 9, com cerca de 1 minuto antes. O EUV atrasou menos de 4 minutos no dia 22, enquanto no dia 9 teve um atraso de 15 minutos, após o SF, indicando diferenças na resposta ionosférica entre os dois eventos.

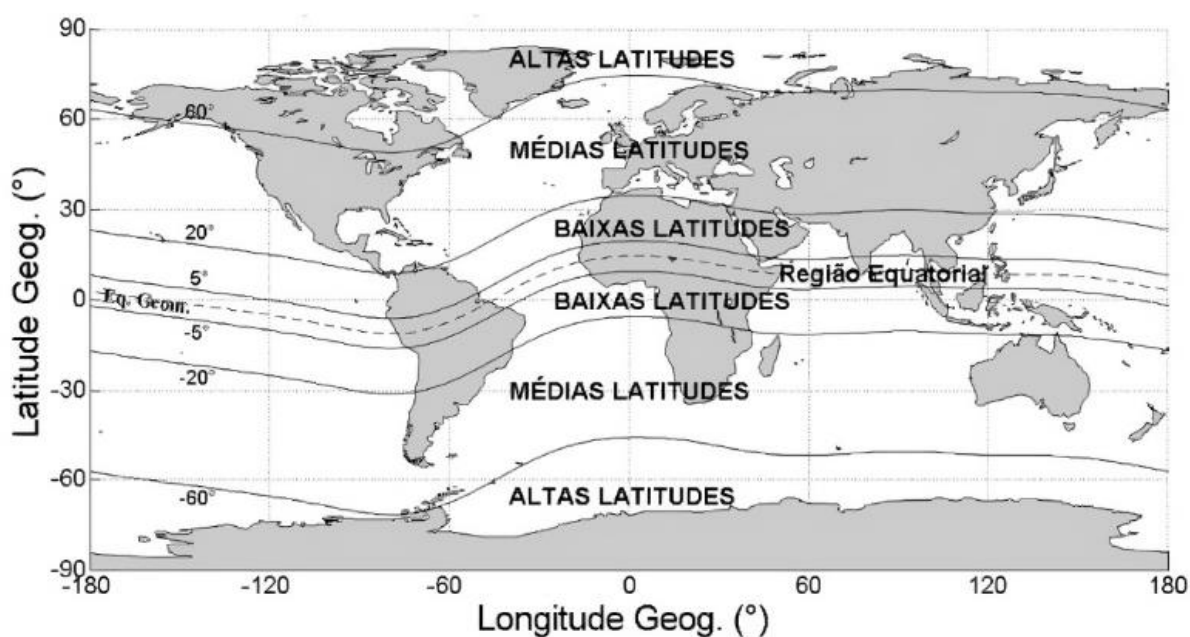
Figura 12 - Variação das radiações Raio X e Extremo Ultravioleta (EUV) com foco próximo a hora dos eventos nos flares estudados. (a) Dia 22 de fevereiro de 2024 com flares de categoria M às 20:46UT e X6.37. (b) Dia 09 de fevereiro de 2024 com flare X3.8.



Fonte: A autora

As respostas geomagnéticas associadas a esses eventos foram investigadas a partir de estações de magnetômetros/GNSS distribuídos em diferentes faixas latitudinais: altas latitudes (acima de 60°), médias latitudes (de 20° a 60°), baixas latitudes (aproximadamente 5° e 20°) e região equatorial (0° e 5°), conforme os setores geográficos apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Regiões latitudinais da Ionosfera.



Fonte: [PROL \(2015\)](#)

Inicialmente, serão analisados os principais índices geofísicos solares, interplanetários e geomagnéticos, com o objetivo de contextualizar a dinâmica Sol-Terra durante os períodos de atividade solar moderada a intensa associados aos *flares* estudados. Em seguida, são discutidas as respostas observadas nas estações de magnetômetros, com foco nas características morfológicas das variações das componentes do campo magnético terrestre ΔH e ΔZ , considerando sua amplitude, duração e comportamento temporal. O interesse central reside na correlação temporal entre as fases dos SFs (crescimento, máximo e decaimento) e as respostas observadas nas componentes do campo magnético terrestre, conforme separadas por regiões latitudinais, como apresentado na Figura 13.

Na sequência, é realizada a análise do EEJ, destacando suas intensificações ou enfraquecimentos como resposta direta às alterações na condutividade ionosférica induzidas pelos aumentos súbitos de radiação solar.

Por fim, apresentam-se as variações do VTEC e do ROT, que permitem relacionar quantitativamente as perturbações ionosféricas aos mecanismos de ionização desencadeados pela radiação de raios X e EUV emitida durante os *flares*.

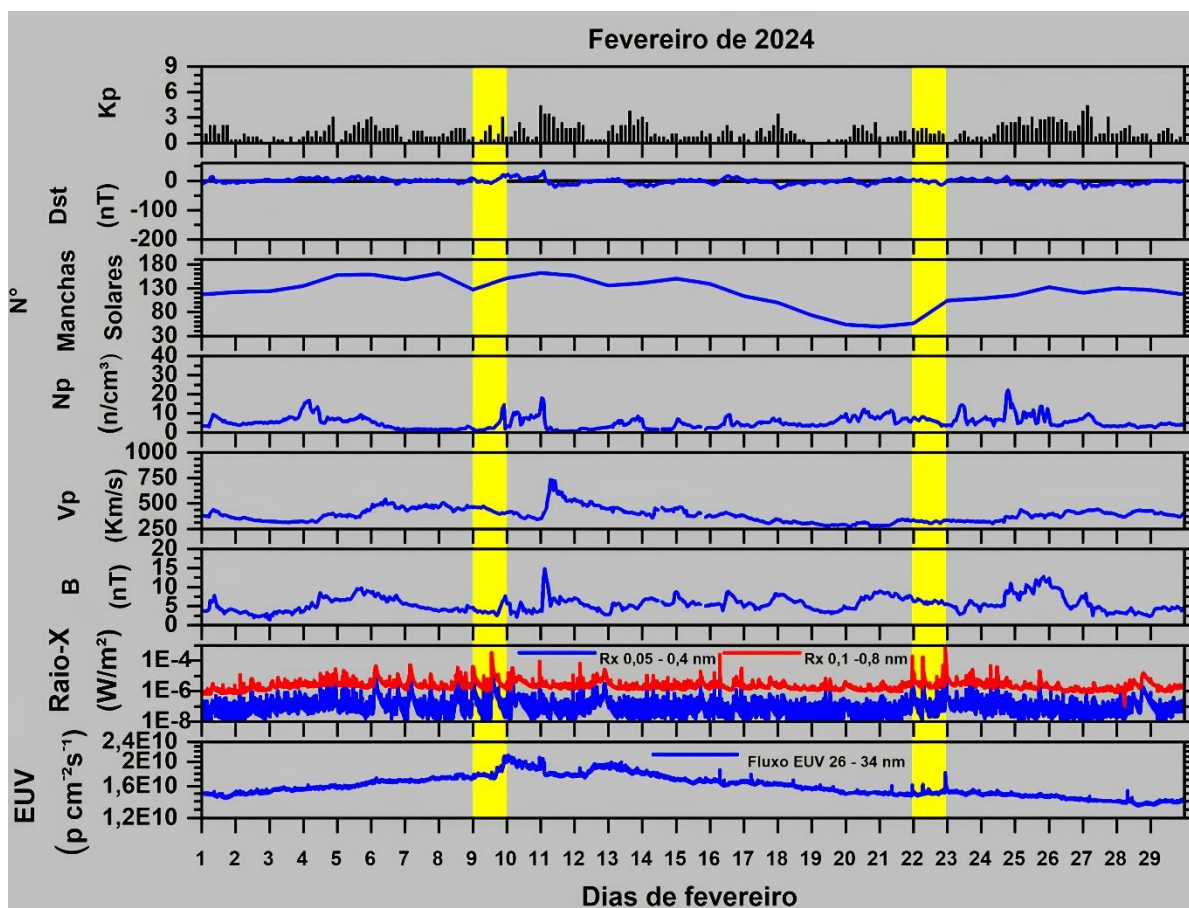
5.1 ANÁLISE DA GEOEFETIVIDADE NO PÉRIOSO DE INTERESSE

Durante o mês de fevereiro de 2024, as condições geomagnéticas apresentaram parâmetros e índices típicos de um período calmo. O índice Kp médio foi de 1+, indicando uma atividade geomagnética baixa longo do período estudado. O maior valor do Kp foi registrado no dia 11 de fevereiro, às 00:00 UT e no dia 27 de fevereiro, às 03:00 UT, ambos apresentam Kp 4+, sendo os períodos de maior perturbação no campo geomagnético. Em relação ao índice Dst a média foi de aproximadamente -2 nT, indicando uma condição geomagneticamente calma. O valor mais negativo do Dst foi obtido no dia 25 de fevereiro, entre 09:00 e 10:00 UT, atingindo -27 nT, caracterizando por período calmo. A média de manchas solares foi de 123, o que indica uma atividade solar entre moderada e próxima do máximo, considerando que o máximo do ciclo solar 25 é relativamente baixo em comparação com ciclos anteriores. Outros parâmetros interplanetários obtiveram os valores médio como, campo magnético total (B), que foi de 5,52 nT, e a componente Bz no sistema de coordenadas GSE (Eclíptica Solar Geocêntrica - Geocentric Solar Ecliptic), que apresentou um valor médio de 2,12 nT. A Np média foi de 5,23 partículas/cm³ e a Vp de 387,76 km/s, ou seja, período calmo.

Nos espectros de radiação, os fluxos de RX nas bandas de λ 0,05 - 0,4 nm apresentaram um valor médio de $3,67 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$, enquanto a banda λ 0,1 - 0,8 nm foi de $3,63 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$. Além disso, a emissão de radiação EUV foi registrada uma média de $1,61 \cdot 10^{10}$ prótons/cm²/s. Utilizou-se os dados da radiação EUV do satélite SOHO, visto que os dados do GOES apresentavam falhas.

Uma análise conjunta dos índices Dst e Kp, juntamente com os parâmetros interplanetários (velocidade do vento solar (Vp), densidade de partículas (Np), número de manchas solares, componente do campo magnético interplanetário, radiação em RX e EUV), permitiu caracterizar a atividade geomagnética e as condições do clima espacial durante os *flares solares* ocorridos em fevereiro de 2024 (Figura 14).

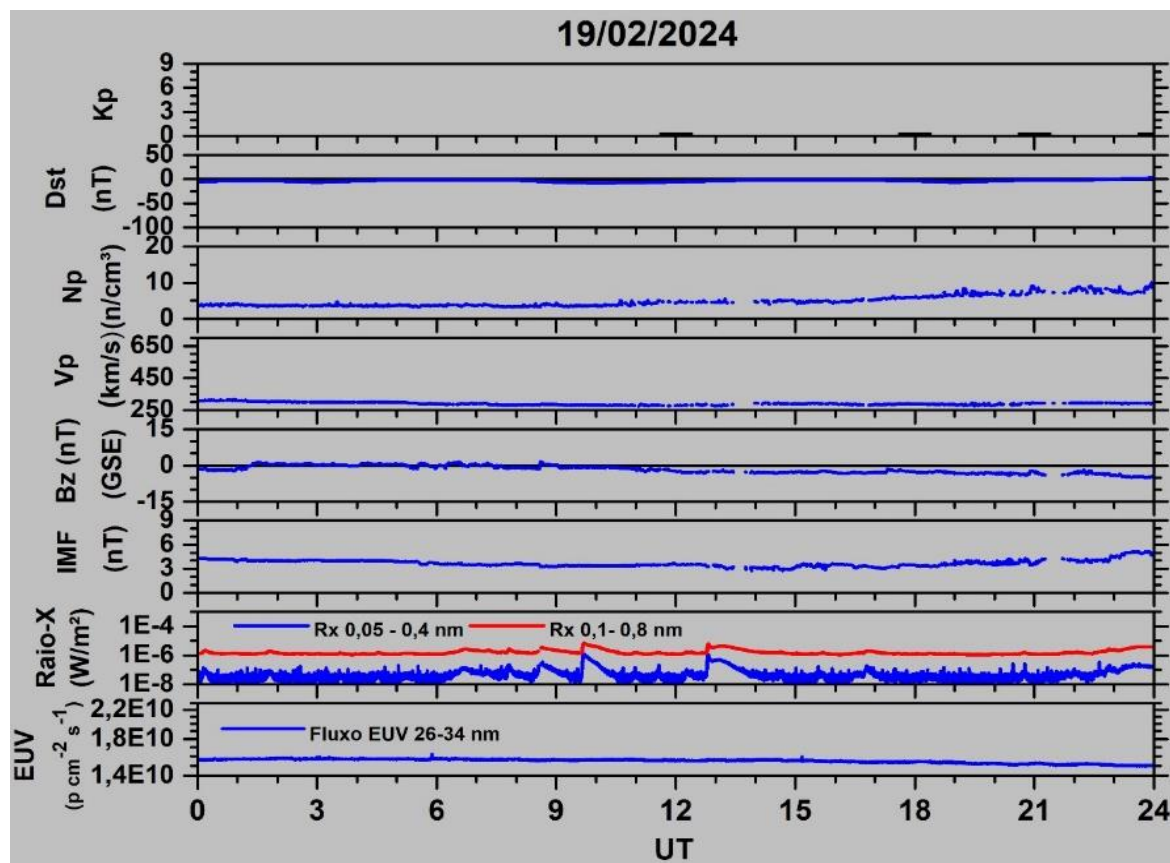
Figura 14 - Índices geomagnéticos Kp, Dst, número de manchas solares, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz (IMF), Raio-X e extremo ultravioleta (EUV): para o mês de fevereiro de 2024. A barra em amarelo representa os dois dias dos eventos estudados.



Fonte: A autora

Nas Figuras 15, 16a e 16b apresenta-se os índices geomagnéticos, parâmetros interplanetários e solares para os dias 19, 22 e 09 de fevereiro de 2024, respectivamente. Diferentemente da Figura 14, que exibia o campo magnético total foram acrescentados os índices IMF (Interplanetary Magnetic Field) e Bz nas Figuras 15, 16a e 16b. O IMF indica o campo magnético total transportado pelo vento solar, enquanto o Bz no sistema GSE, indica orientação vertical do IMF, e determina a possibilidade de reconexão magnética entre o campo magnético interplanetário e o campo magnético terrestre.

Figura 15 -Variação dos índices geomagnéticos Kp, Dst, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz (GSE), Campo Magnético interplanetário (IMF), Raio-X e extremo ultravioleta (EUV) para o dia 19 de fevereiro de 2024.

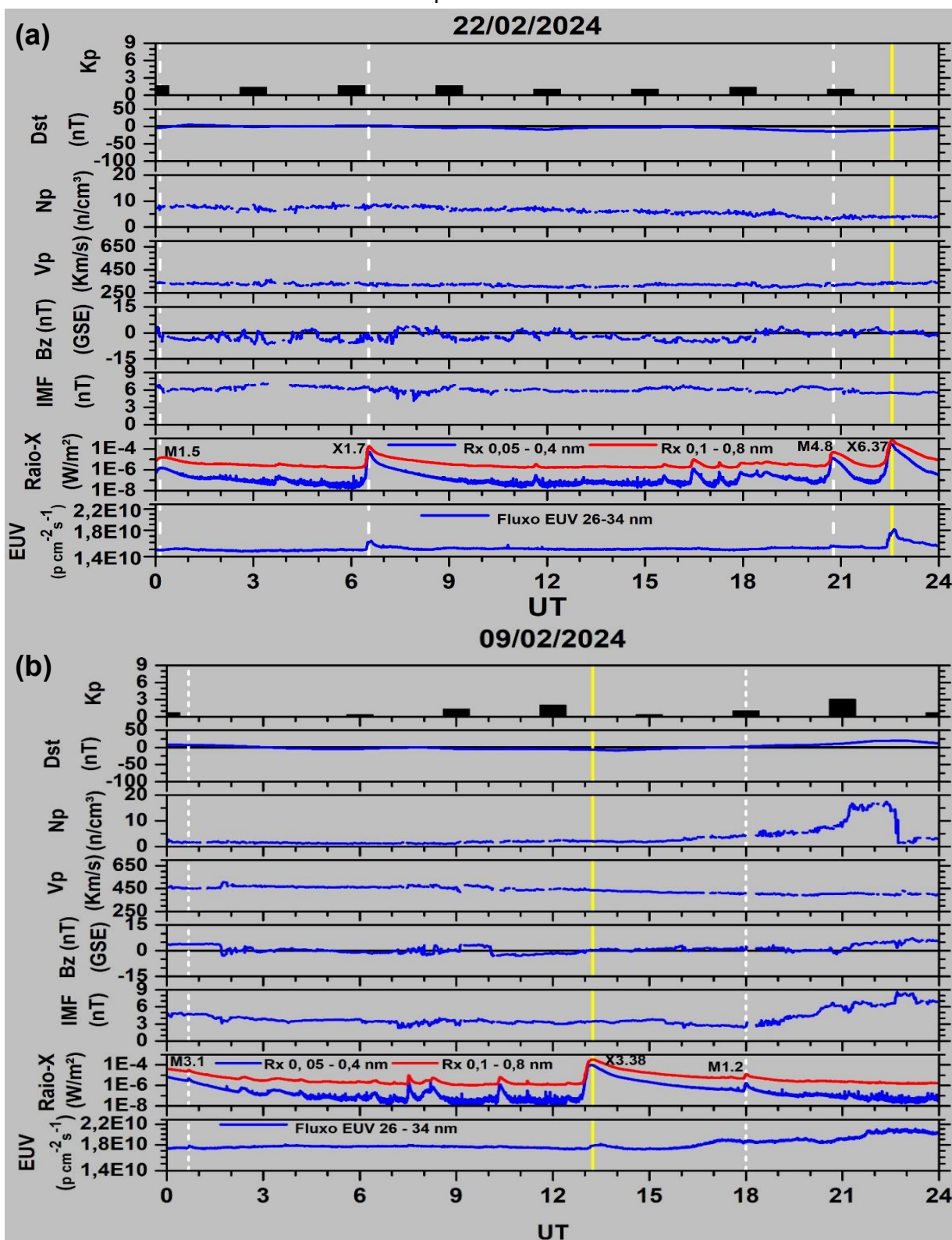


Fonte: A autora

A Figura 15, mostra os índices e parâmetros para 19 de fevereiro, dia mais calmo geomagneticamente do mês de fevereiro de 2024, foi utilizado como referência de um dia calmo geomagneticamente. Note que os praticamente todos os índices estão praticamente constantes, no entanto, o RX apresenta vários picos, todos eles relacionados com SFs de categoria C (SFs fracos).

Na Figura 16a e 16b mostra-se os índices e parâmetros para, no dia 22 e 9 de fevereiro quando ocorreu os SFs mais intensos (categoria X e M) e muito outros menos intensos (categoria C). Estes SFs são evidenciados pela variação acentuada do RX e EUV, conforme mostra nas Figura 16a e 16b, onde é possível ver um pico mais aparente nesses índices.

Figura 16 -Variação dos índices geomagnéticos Kp, Dst, densidade de prótons (Np), velocidade do vento solar (Vp), componente do campo magnético interplanetário Bz, Campo Magnético interplanetário (IMF), Raio-X e EUV. (a) representa o dia 22 de fevereiro de 2024 e (b) representa o dia 9 de fevereiro de 2024. A linha vertical amarela destaca os *flares* estudados de classe X analisadas neste estudo. As linhas verticais brancas indicam os demais *flares* que ocorreram nesses dias.



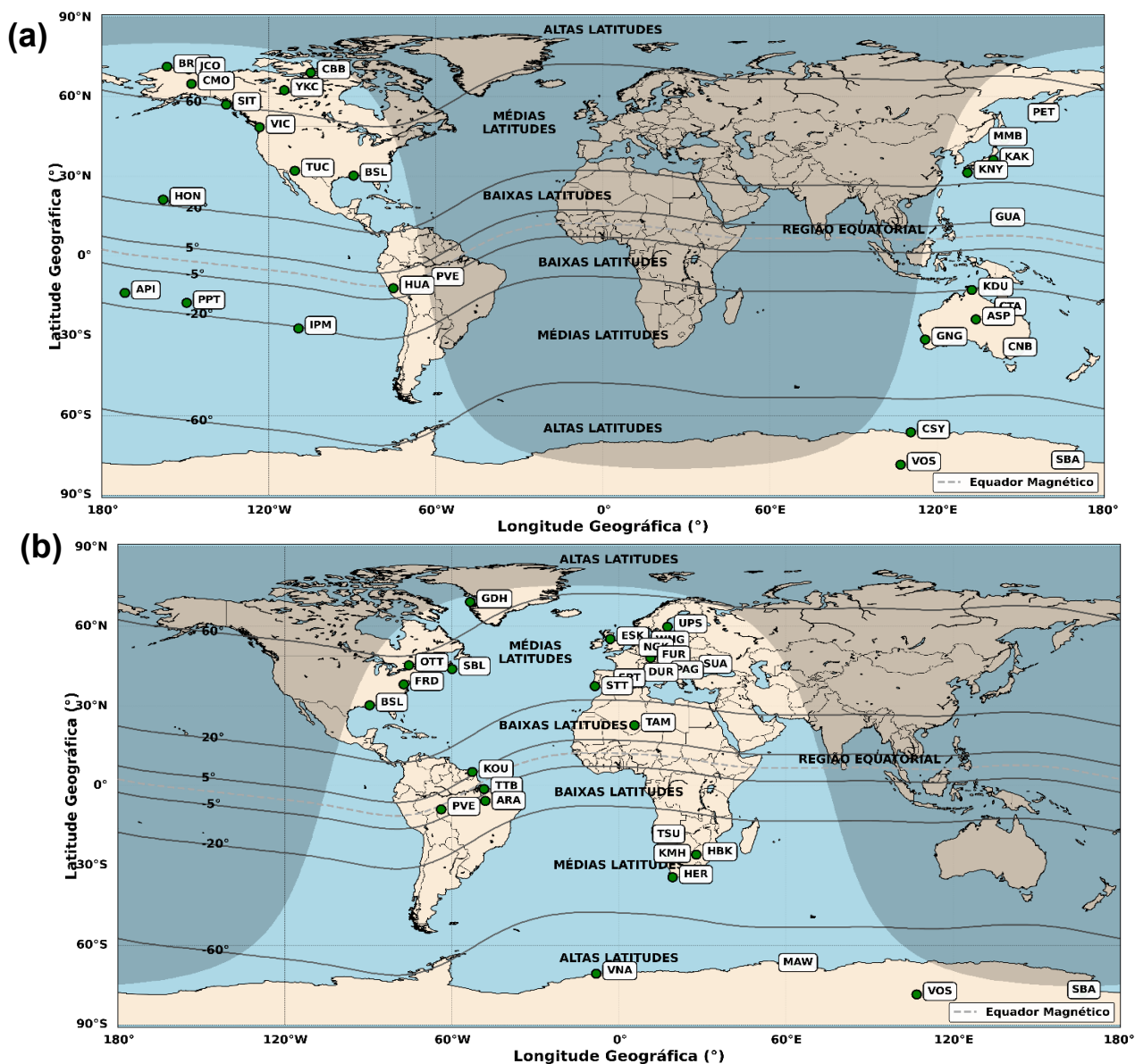
Fonte: A autora

5.2 MAGNETÔMETROS

Para facilitar a interpretação das respostas observadas nas estações de magnetômetros, as análises serão organizadas por evento, regiões e por componente do campo magnético. Assim, a Seção 5.2.1 apresentará os resultados referentes ao evento do dia 22, enquanto a Seção 5.2.2 tratará do evento do dia 09.

Os magnetômetros utilizado em ambos os dias estão descritos na Figura 17, sendo a Figura 17a referente ao dia 22 e Figura 17b ao dia 09. Das 133 estações disponíveis, 25 foram usadas no dia 22 de fevereiro e 28 no dia 9 de fevereiro.

Figura 17 - Estações de magnetômetros em verde usadas, as linhas cinzas são as regiões latitudinais e a cinza pontilhada representa equador magnético. (a) são referentes aos dias 22 de fevereiro e (b) ao dia 9 de fevereiro.



Fonte: A autora

5.2.1 SOLAR FLARE X.6.37 EM 22 DE FEVEREIRO 2024

No dia 22 de fevereiro ocorreu um *flare*, entre 22:00 e 24:00 UT, de categoria X6.37, considerado um dos mais intensos do ano. O SF de X6.37 teve seu máximo às 22:34 UT e teve uma duração de aproximadamente 35 min.

5.2.1.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔH E RAIO-X E EUV

Nos gráficos nessa seção, ambos terão enfoque nas horas próximas ao evento estudado.

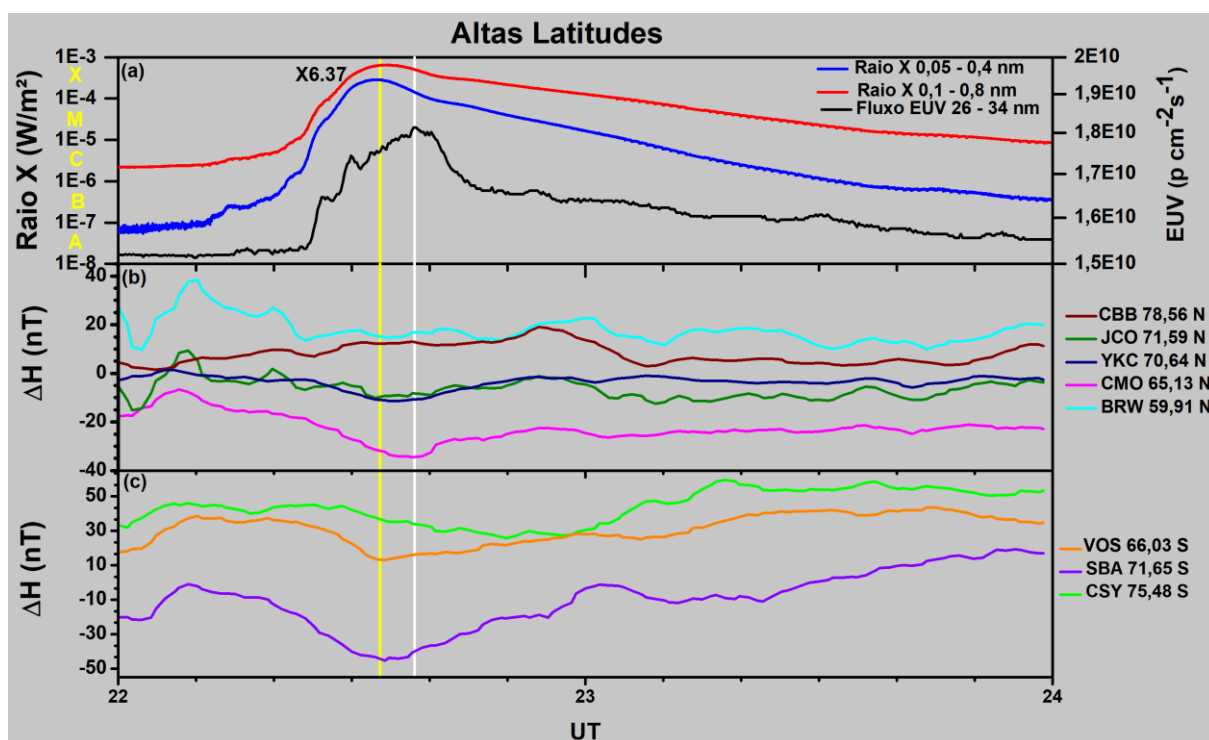
As radiações RX e EUV são mostradas nos gráficos junto com a variação do ΔH , sendo sempre exibidas no painel superior, identificado pela letra (a). O RX máximo é indicado sendo uma linha amarela contínua e aconteceu às 22:34 UT. O máximo do EUV foi destacado como sendo a linha branca, às 22:38 UT, ou seja, quatro minutos após o máximo do SF. Esse atraso entre os picos de emissão RX e EUV é um comportamento esperado durante SFs e está relacionado à evolução térmica do plasma nos loops coronais. Durante o aquecimento impulsivo do flare, o plasma atinge inicialmente temperaturas muito elevadas, produzindo emissões intensas na faixa de RX. À medida que o plasma se resfria gradualmente, a emissão passa a ocorrer em comprimentos de onda maiores, como na faixa EUV, resultando em um atraso temporal entre os picos de radiação. Esse intervalo pode variar de 1 a 15 minutos, dependendo da classe e intensidade do flare, refletindo a evolução térmica do plasma durante o evento.

Para a análise de estações de altas latitudes foram organizados dois grupos, conforme descrito na Figura 18, divididos em duas regiões, sendo (b) Polo Norte e (c) Polo Sul. De modo geral, todas as estações analisadas nessa região apresentaram comportamento similares, porém sem sincronização relacionado o *flare*, o que pode sugerir diferenças nos mecanismos e tempos de propagação das perturbações nesta região, influenciadas tanto pela geometria da incidência solar quanto pelas características locais do acoplamento ionosfera-magnetosfera. Nessas regiões, os raios solares incidem de forma mais oblíqua, o que reduz a densidade de energia recebida por unidade de área, contribuindo para uma ionização menos intensa. Ainda assim, os campos magnéticos em altas latitudes são frequentemente mais perturbados, sobretudo devido à presença dos ovais aurorais, cinturões ativos ao

redor dos polos magnéticos que concentram a precipitação de partículas energéticas e intensas correntes elétricas e conseqüentemente, dificultar a distinção das assinaturas diretas da radiação do *flare*.

Na Figura 18b, por exemplo, a estação CMO apresentou uma redução no ΔH de aproximadamente -20 nT a partir das 22:20UT até 22:38 UT, enquanto na Figura 18c, a estação SBA sofreu uma perturbação em torno de -30 nT no mesmo horário que aconteceu na CMO. Ambas as estações apresentam morfologia que sugerem correlação com o impacto do SF.

Figura 18 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em altas latitudes para o dia 22 fevereiro, sendo (b) Polo Norte e (c) Polo Sul. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.



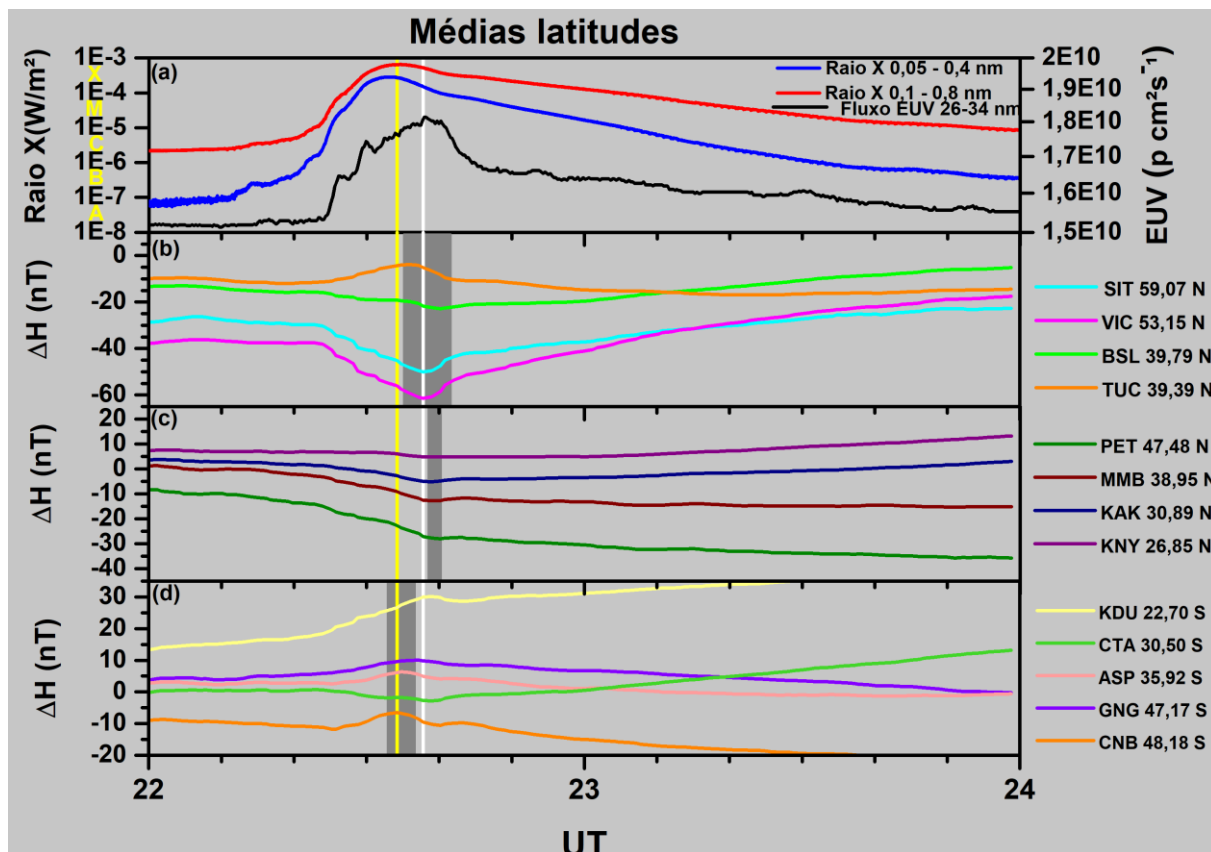
Fonte: A autora

As respostas geomagnéticas em regiões de médias latitudes, foram analisadas considerando três setores ilustrados na Figura 19, sendo (b) América do Norte, (c) Ásia e (d) Oceania. As variações das componentes horizontais nessas regiões, revelaram SFE mais perceptíveis, como pode ser visto pelo retângulo cinza destacado, onde os efeitos nessa região foram notáveis após os máximos das radiações RX e EUV, entre 22:35 e 22:40 UT. Nas estações da América do Norte (Figura 19b), as perturbações se mostram sincronizadas, porém com dois padrões distintos, sendo alguns com máximos negativos e outros positivos, sendo que TUC

criaram a partir das 22:17 UT, SIT e TUC, decaíram a partir das 22:24 UT, com máximo às 22:38 UT. No setor asiático (Figura 19c), os magnetogramas apresentaram variações com uma morfologia característica, sendo uma resposta como se tivessem deslocados no tempo, indicando um possível efeito do ângulo de incidência solar. Ambas as estações apresentaram um *crochet* simultâneo entre elas, a partir das 22:00 UT, com exceção de KNY, as demais apresentaram o máximo entre as 22:38 e 22:40 UT, ou seja, entre as radiações máximas. Observou-se também que quanto maior a latitude magnética nessa região mais evidente era a resposta observada ao efeito SFE. Já as estações localizadas na Oceania (Figura 19 d), o comportamento foi uma junção das outras regiões analisadas e apresentaram um crescimento a partir das 22:24 UT, com pico 22:35 e 22:36 UT.

Esse padrão encontrado nessa região, pode ser interpretado pelo efeito da maré diurna ionosférica. Em sua fase ascendente da maré, a corrente ionosférica é reforçada pelo aumento de plasma oriundo da ionização provocada pelo *flare*, elevando os valores de ΔH . Na fase descendente, o mesmo processo pode acentuar a queda dos valores, tornando-os negativos. Assim, o sinal final dependerá tanto da fase da maré quanto da orientação do campo elétrico gerado. Como apontado por [Fagundes et al. \(2024b\)](#), embora a posição longitudinal influencie a duração da exposição solar, o fator determinante para a intensidade da radiação incidente é o ângulo de incidência solar, que é função direta da latitude geográfica e magnética.

Figura 19 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em médias latitudes para o dia 22 fevereiro separadas em três regiões, (b) América do Norte, (c) Ásia e (d) Oceania. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas repentina no valor de ΔH .

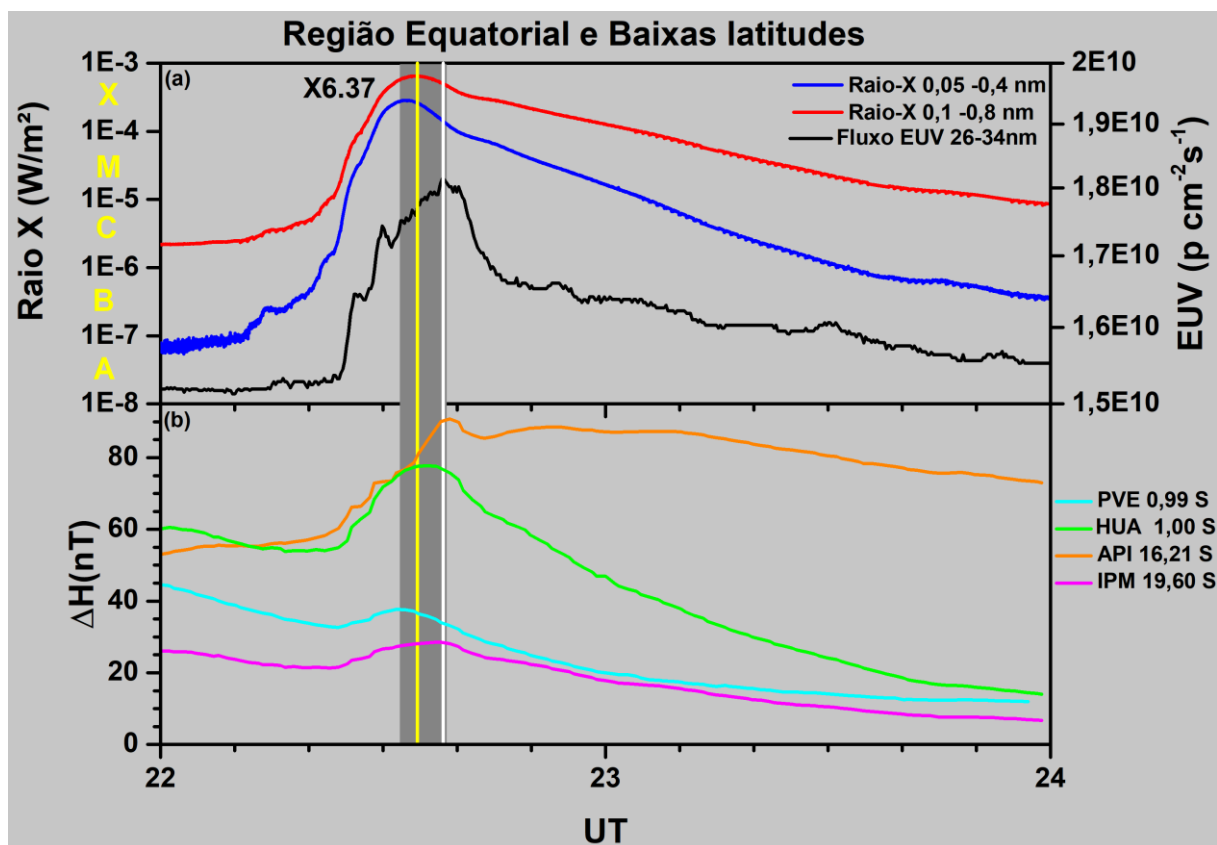


Fonte: A autora

Por fim, foram analisadas as respostas nas estações da região equatorial e de baixas latitude (Figura 20), localizadas em sua maioria, na América do Sul e no Oceano Pacífico.

Nessas regiões houve a melhor sincronização temporal e observou-se também a assinatura clássica SFE. Esse comportamento pode ser atribuído à influência combinada de correntes Sq, correntes de anel e do EEJ. Entre todas as estações PVE apresentou uma resposta ligeiramente antecipada, com variação máxima entre 22:32 e 22:34 UT. API, IPM, ambas no Oceano Pacífico, destacaram as duas primeiras com forma semelhantes e máximo às 22:38 UT.

Figura 20 – (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetros na região equatorial e em baixas latitudes para o dia 22 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas repentinas no valor de ΔH .



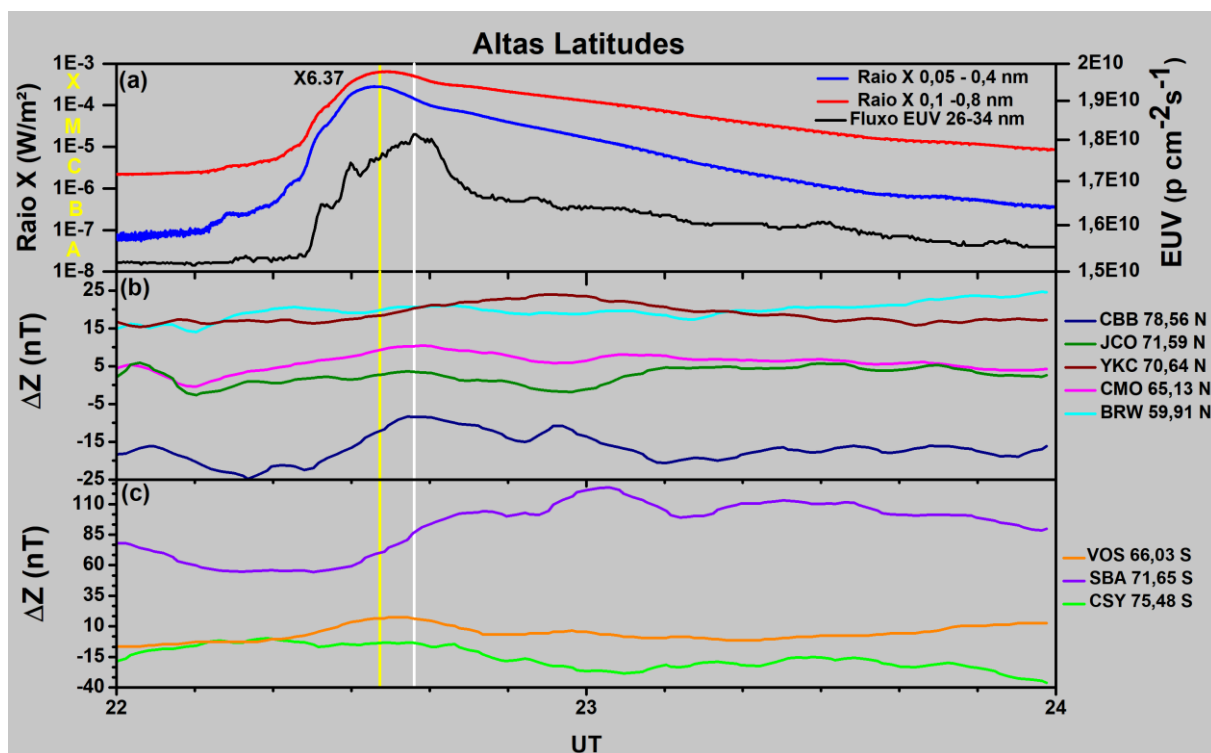
Fonte: A autora

5.2.2.2 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔZ E RAIOS-X E EUV

Assim como foi feita na variação da componente horizontal (ΔH) seção 5.2.2.1, será analisada a seguir a variação no campo magnético vertical (ΔZ) ao SF do dia 22 de fevereiro, nas diferentes regiões, com foco entre às 22:00 e 24:00 UT.

As estações de alta latitude foram separadas em duas regiões, Polo Norte e Polo Sul, e apresentado na Figura 21. Nas regiões de alta latitude, o campo magnético apresentou o mesmo comportamento variável, similar ao encontrado na componente ΔH . De modo geral, não se observou uma sincronização clara entre os sinais registrados nesses setores, o que reforça a complexidade da resposta magnética em regiões aurorais. Na Figura 21c, a estação VOS se destacou, pois a partir das 22:18 UT apresentou um crescimento até atingir um máximo às 22:36 UT, seguindo por um retorno gradual ao comportamento anterior ao *flare*.

Figura 21 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em altas latitudes para o dia 22 fevereiro separadas em duas regiões, sendo o lado (b) Polo Norte e (c) Polo sul. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.



Fonte: A autora

Nas regiões afetadas de média latitudes (Figura 22), diferente das respostas encontradas na componente ΔH , ambos os setores analisados encontraram uma falta de sincronização. Tal variação antissimétrica pode indicar a ação de correntes verticais localizadas ou interações complexas com a maré ionosférica local. Na Figura 22b, destaca-se a estação VIC com máximo às 22:36 UT. Na Figura 22c, destaca-se o mesmo deslocamento no tempo encontrado no ΔH , porém se a sincronização aparente. A estação KNY (Figura 22c), destacou-se com o máximo mais visível às 22:38 UT. Já na Figura 22d, as estações KDU e CNB apresentaram um máximo aparente, sendo que a primeira negativo as 22:38 UT e a segunda positivo no mesmo horário.

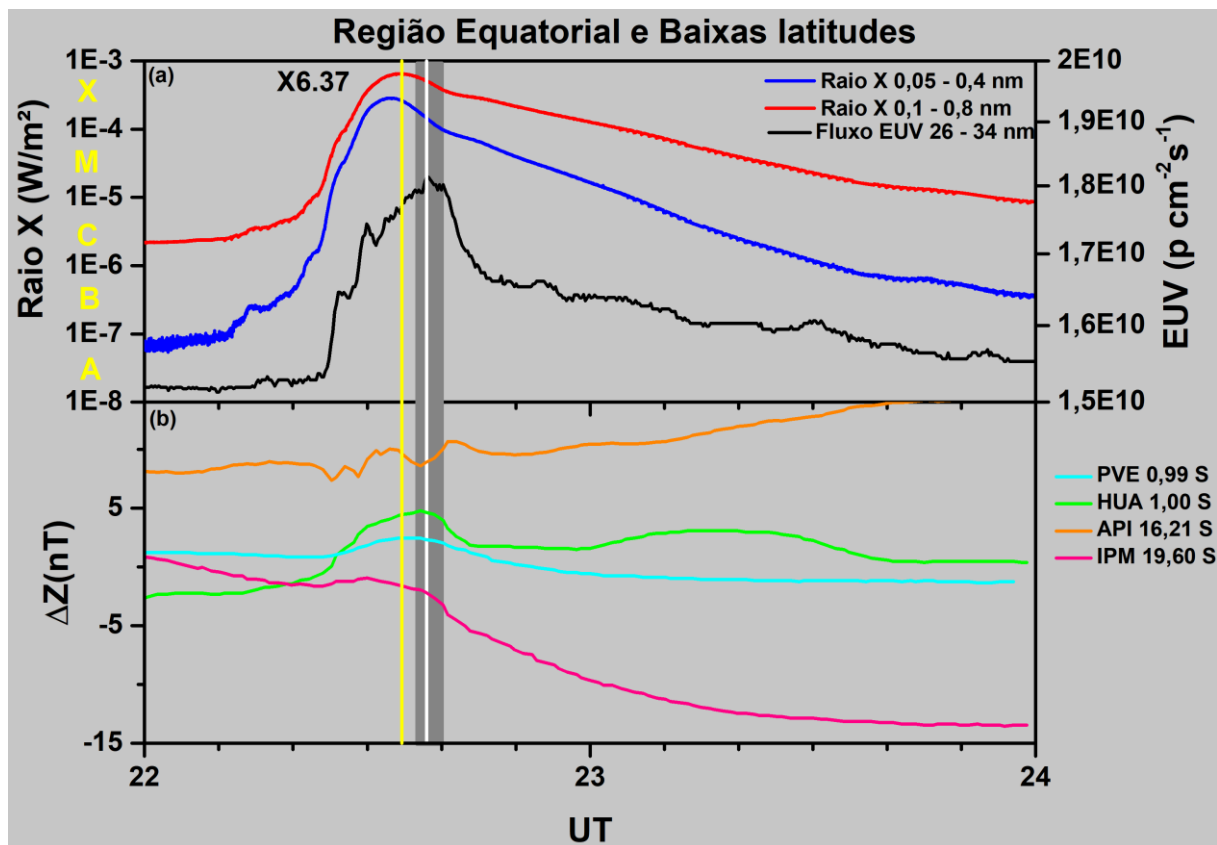
Figura 22 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros em médias latitudes para dia 22 de fevereiro separadas em três regiões: (b) América do Norte, (c) Ásia e (d) Oceania. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas repentinos no valor de ΔZ .



Fonte: A autora

Nas estações da região equatorial e baixas latitudes, as perturbações se mostraram sincronizadas nas diferentes componentes, com os melhores efeitos da radiação do SF, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros da região equatorial e de baixas latitudes para dia 22 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ .



Fonte: A autora

A análise da componente vertical ΔZ revelou um comportamento mais complexo quando comparado ao observado em ΔH . As amplitudes observadas em ΔZ foram significativamente menores do que em ΔH . Esse resultado indica que, embora ΔZ responda ao *flare*, sua sensibilidade é reduzida em comparação à componente horizontal.

5.2.2 SOLAR FLARE X3.38 EM 09 DE FEVEREIRO 2024

O evento do dia 09 de fevereiro de 2024 categoria X3.38, também classificado como um dos mais intensos do ano. O SF teve máximo às 13:14 UT, com uma duração aproximada de 39 minutos. Embora sua intensidade tenha sido menor ao evento X6.37 do dia 22 de fevereiro, o X3.38 apresentou duração semelhante e gerou perturbações significativas nas componentes do campo geomagnético. A resposta geomagnética seguiu padrões semelhantes aos observados no evento X6.37, porém

com amplitudes menores e menor coerência espacial, refletindo a menor intensidade radiativa do evento.

A radiação RX atingiu seu máximo às 13:13 UT (Figura 24a), sendo representada nos gráficos dessa seção no painel superior identificado pela letra (a), por uma linha vertical amarela contínua e a radiação EUV, que por sua vez, apresentou máximo às 13:29 UT, marcado por uma linha vertical branca. Como ambas são formas de radiação eletromagnética, a resposta ionosférica pode ocorrer com algum atraso, em função dos processos de acoplamento entre a ionização induzida e a dinâmica das correntes como EEJ. Assim, a extensão das perturbações associadas ao *flare* pode se prolongar até cerca de 13:40 UT, o que explicaria o retardo observado entre os picos de RX e EUV e os máximos de variação nas componentes ΔH e ΔZ .

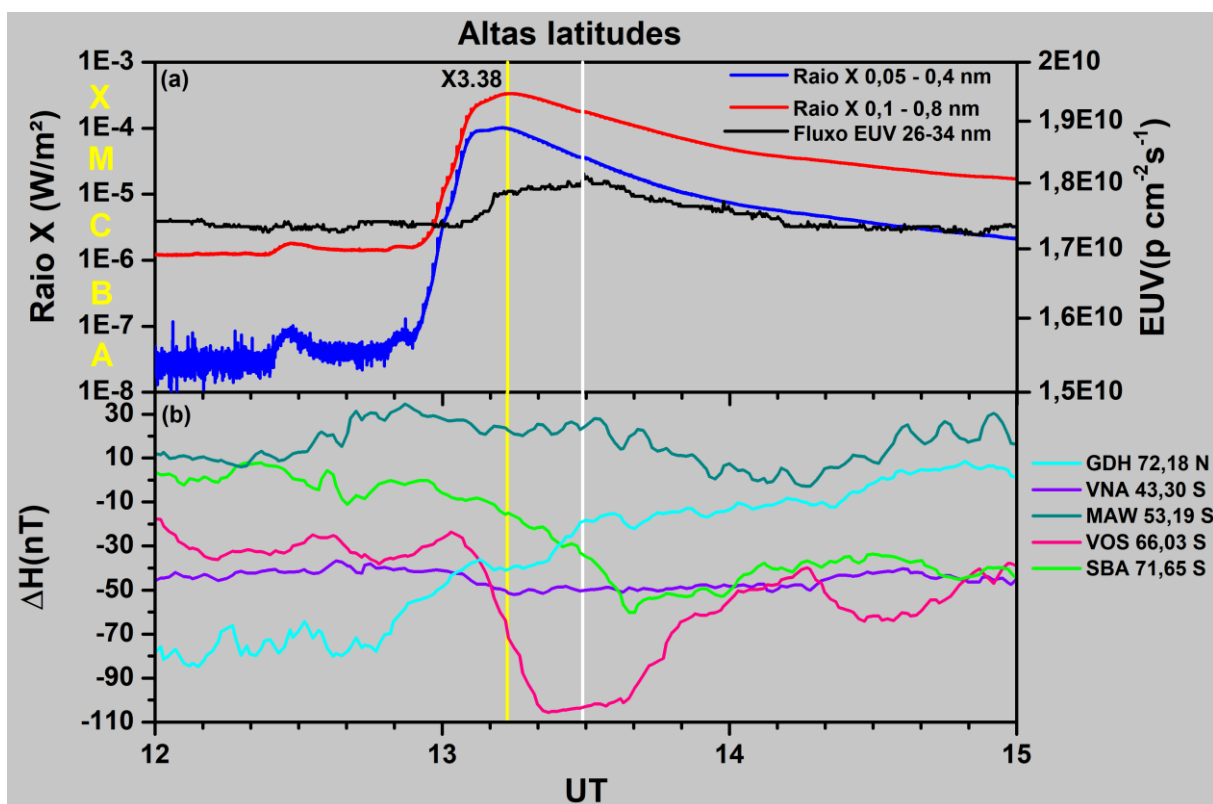
5.2.2.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔH E RAIOS-X E EUV

Assim como foi feito no dia 22 de fevereiro (seção 5.2.2) acima, foram analisados por regiões latitudinais alta, média, baixas e regiões equatorial, nos gráficos com enfoque nas horas próximas do SF, entre 12:00 e 15:00 UT.

No evento do dia 9 de fevereiro, a análise em altas latitudes foi limitada pela distribuição da luz solar (parte iluminada pelo SF), já que grande parte das estações localizadas no Polo Sul e na América do Norte encontrava-se na região escura durante o *flare* (Figura 6). Dessa forma, a maioria das estações escolhidas foram as localizadas no Polo Sul, e optou-se por incluir GDH (localizada na América do Norte), uma estação do hemisfério Norte iluminado, para comparação e verificação de comportamento, veja na Figura 24.

Assim como foi visto na análise do dia 22 de fevereiro, as estações em alta latitude não apresentam uma sincronização entre si. No dia 9 de fevereiro, nenhuma das estações analisadas apresentaram um pico claro e definido associado ao SF (Figura 24b e 24c). Porém a estação VOS apresentou uma depleção mais acentuada por volta das 13:00 UT de aproximadamente -80 nT.

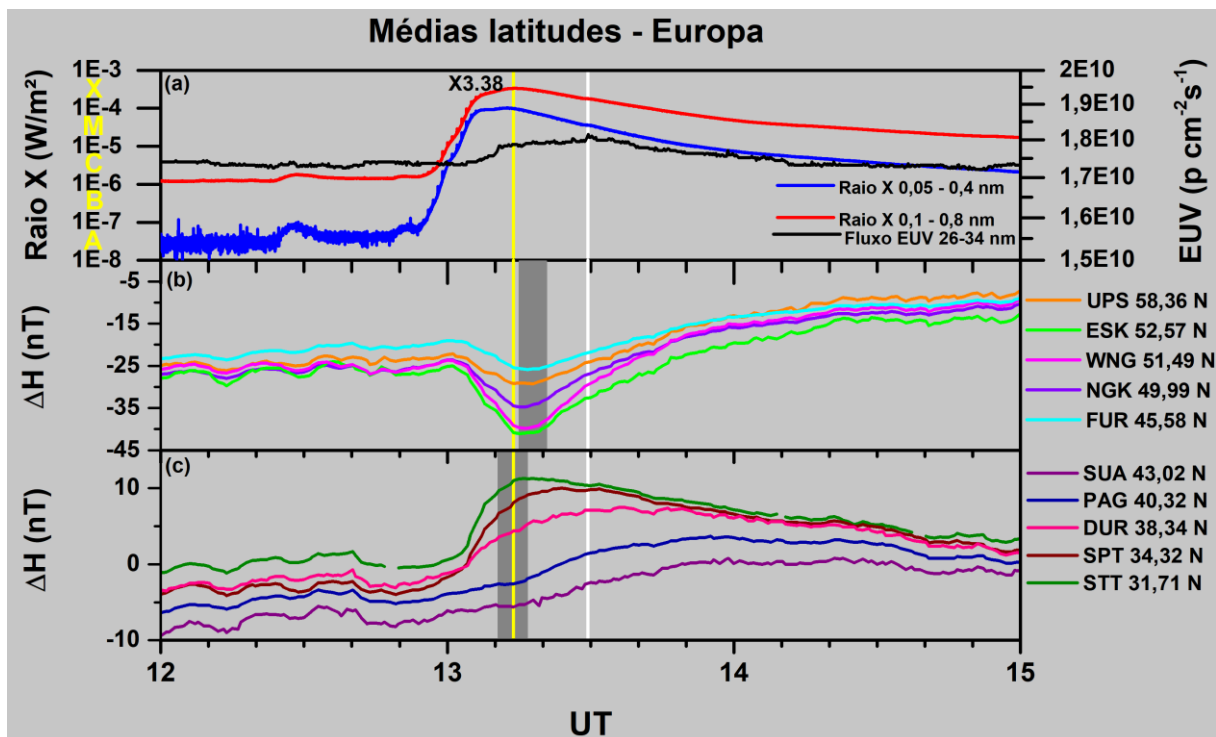
Figura 24 - (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetros de alta latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.



Fonte: A autora

As estações de magnetômetro em média latitude foram separadas em três diferentes setores, Europa, América do Norte e África, todas apresentaram sincronização e comportamento de SFE (Figura 25 e Figura 26). Nas figuras (b) e (c) da Figura 25, os setores europeus foram separados em duas regiões distintas, que apresentaram padrões de resposta diferentes. As estações localizadas mais a Oeste e Norte (Figura 25b) apresentaram um vale na componente ΔH às 13:16 UT. Por outro lado, estações mais ao Sul e Leste (Figura 25c), exibiram um aumento na componente, nota-se também que conforme maior o dip latitude, a variação começa a sofrer ruídos, sendo difícil encontrar o pico.

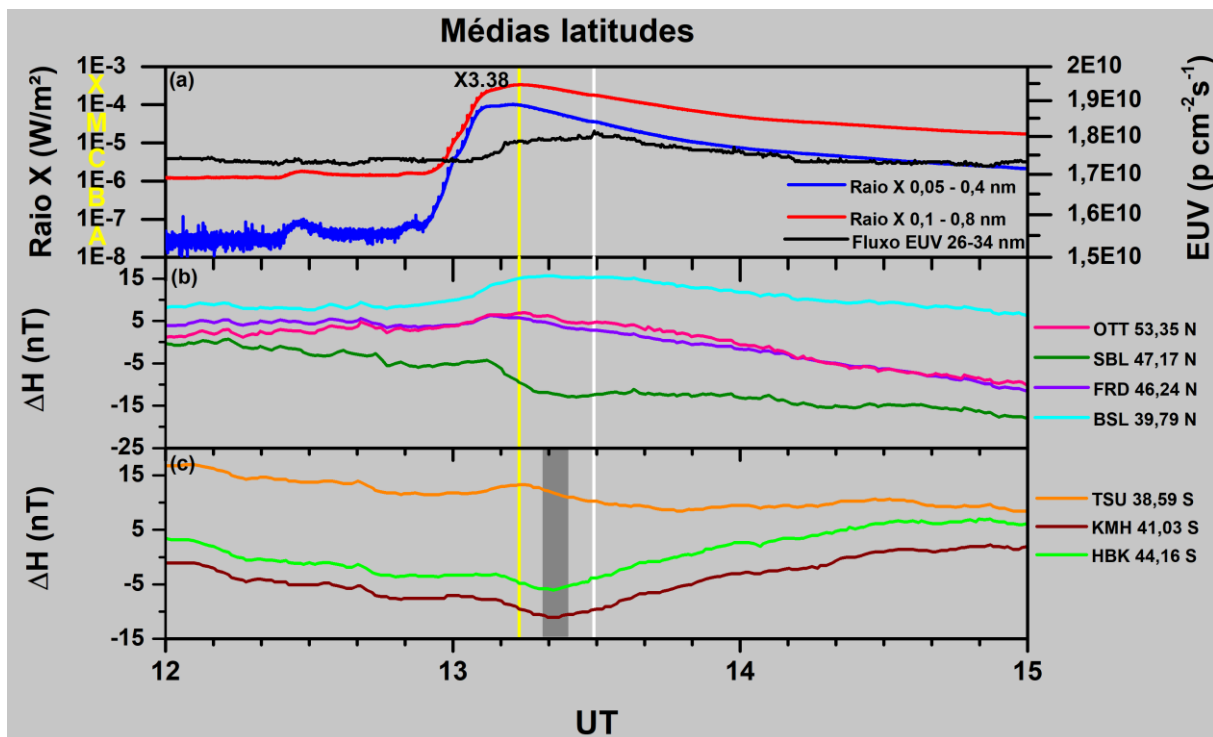
Figura 25 – (a) Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro na Europa, sendo (b) Oeste e Norte e (c) Sul e Leste. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH .



Fonte: A autora

Assim como acontece parte da Europa Sul e Leste (Figura 25c), nas regiões da América do Norte (Figura 26b), o comportamento é semelhante. Neste último caso houve um comportamento com mais dispersão entre as estações, porém foi possível identificar uma resposta devido ao SF. No setor africano (Figura 26c), a análise foi realizada nas quatro únicas estações disponíveis e houve uma similaridade no comportamento semelhante, com vales em três estações HBK, HER e KHBK com pico às 13:16 UT.

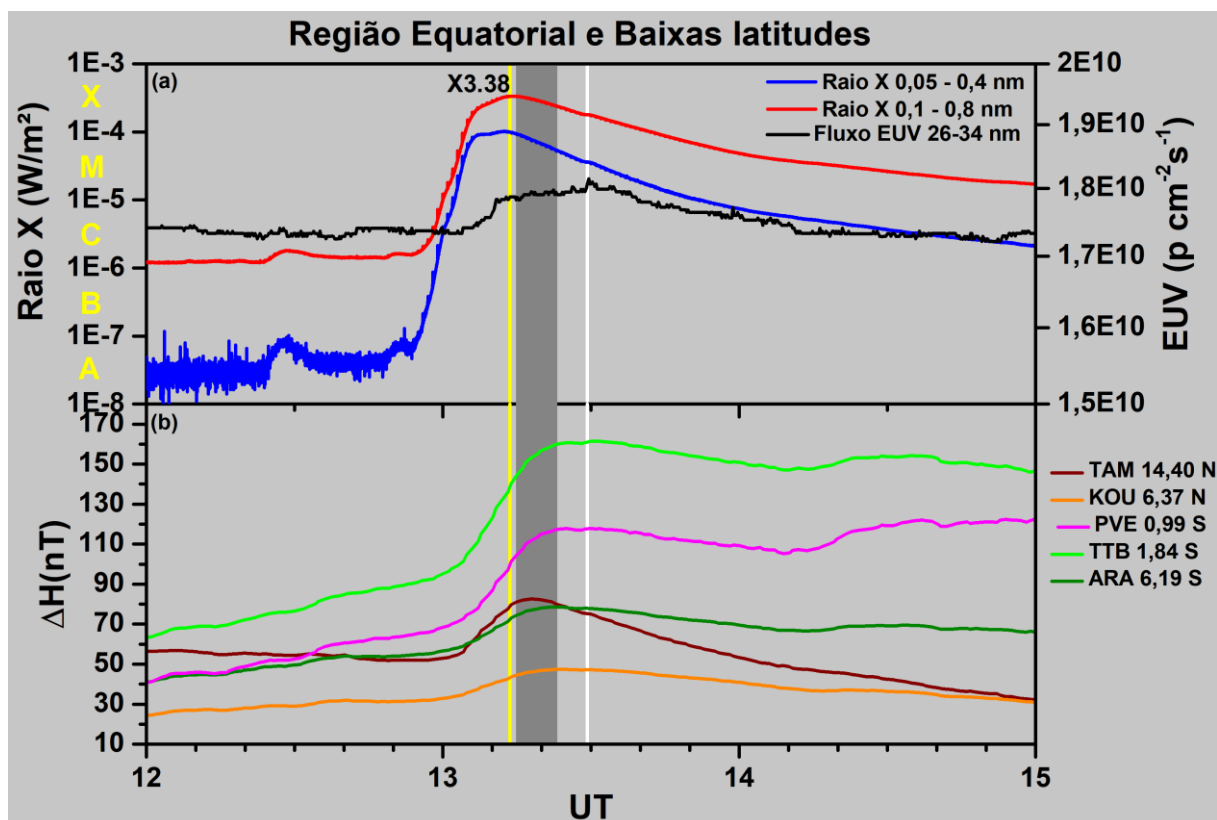
Figura 26 - (a)Variação do Raio-X e Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro nas regiões da América do Norte (b) e África (c). A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH .



Fonte: A autora

A região equatorial e de baixas latitudes, pode trazer a análise das estações de magnetômetros localizadas principalmente na América do Sul e uma estação da África, TAM (Figura 27). Assim como no dia 22 de fevereiro, as respostas geomagnéticas são melhores nessas regiões. Ambas as estações escolhidas apresentaram máximos após o SF, com diferença de 5 minutos, sendo que TAM aconteceu às 13:17 UT e TTB, PVE, KOU, ARA às 13:23 UT.

Figura 27 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de magnetômetro na região equatorial e baixas latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔH .

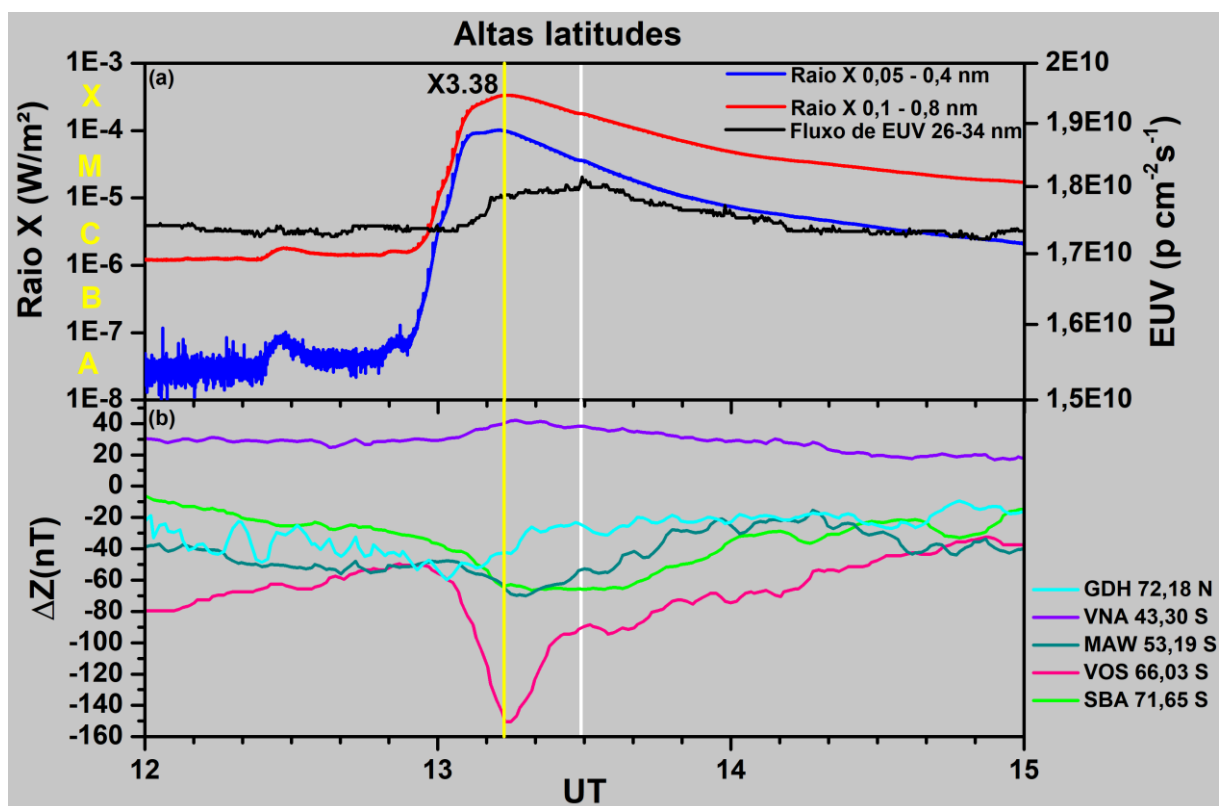


5.2.2.1 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DA VARIAÇÃO DO ΔZ E RAIOS-X E EUV

A seguir vão ser mostradas as análises para cada região para a componente vertical ΔZ .

Na região de alta latitude (Figura 28), as respostas observadas na componente vertical ΔZ , não houve sincronização. Assim como foi feito na componente ΔH , GDH foi usada como análise por conta da sua posição. Novamente a estação VOS, se destacou, registrando um pico aparente de aproximadamente -80 nT a partir das 13:00 UT com pico 13:14 UT.

Figura 28 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e (b) estações de alta latitudes para o dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV.

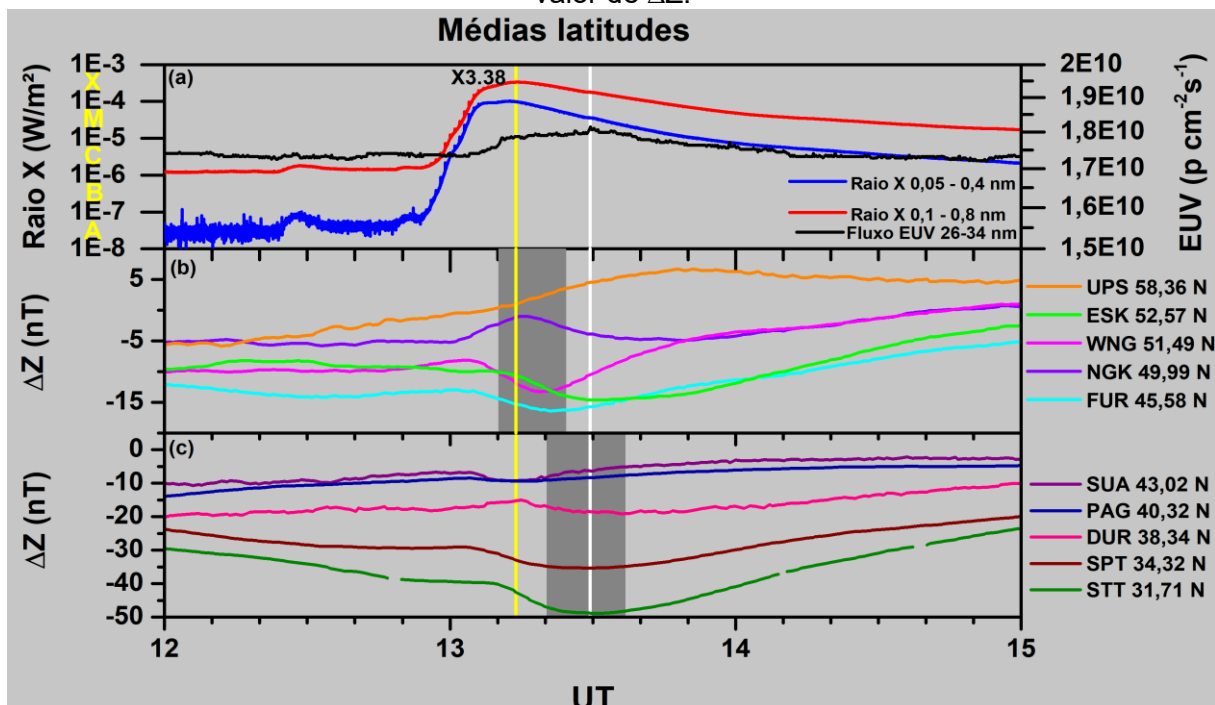


Fonte: A autora

As estações de magnetômetros em média latitude, continuaram agrupadas em três regiões, veja nas Figuras 29 e 30.

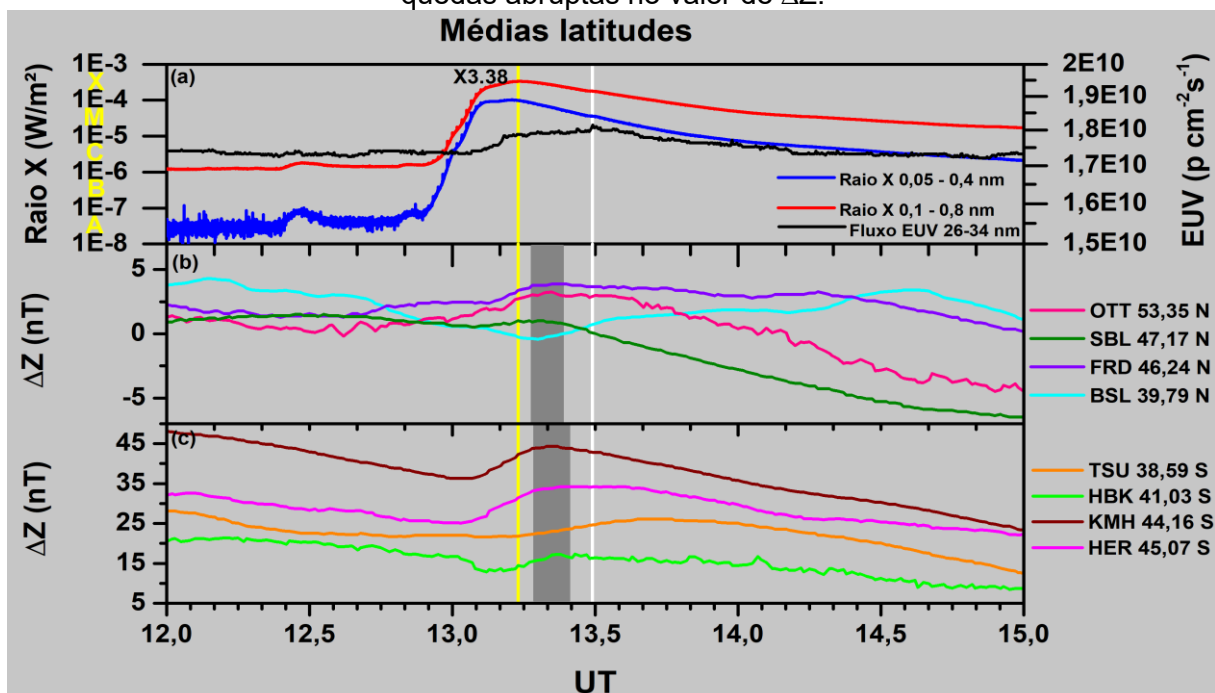
As estações localizadas na Europa, se mantiveram agrupadas pela região Norte, Oeste e Sul, Leste do continente. No entanto, a análise da componente ΔZ , não houve a sincronização antes vista anteriormente neste setor, onde Norte e Oeste apresentaram depleções e Sul e Leste máximos (Figura 29). Nesta nova análise as respostas foram mais diversas. Na Figura 29 b, os efeitos do SF, pode ser notado na forma de vales e máximos. As estações UPS e NGK (Figura 29b), apresentaram comportamento contrário ao da componente ΔH . Na Figura 29c, das cinco estações escolhidas, apenas quatro apresentaram respostas que podem ser correspondidas pelo SFE, sendo STT, SPT, SUA e DUR, essa última um máximo exatamente na hora que a radiação RX foi máxima. PAG, apresentou uma resposta constante, o que pode ter gerado alguma falha no equipamento.

Figura 29 – (a)Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para dia 09 de fevereiro na Europa, sendo (b) Oeste e Norte e (c) Sul e Leste. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ .



Fonte: A autora

Figura 30 – (a) Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV). Estações de magnetômetros de médias latitudes para o dia 09 de fevereiro separadas nas regiões da América do Norte (b) e África (c). A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. Os retângulos em cinza evidenciam aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ .

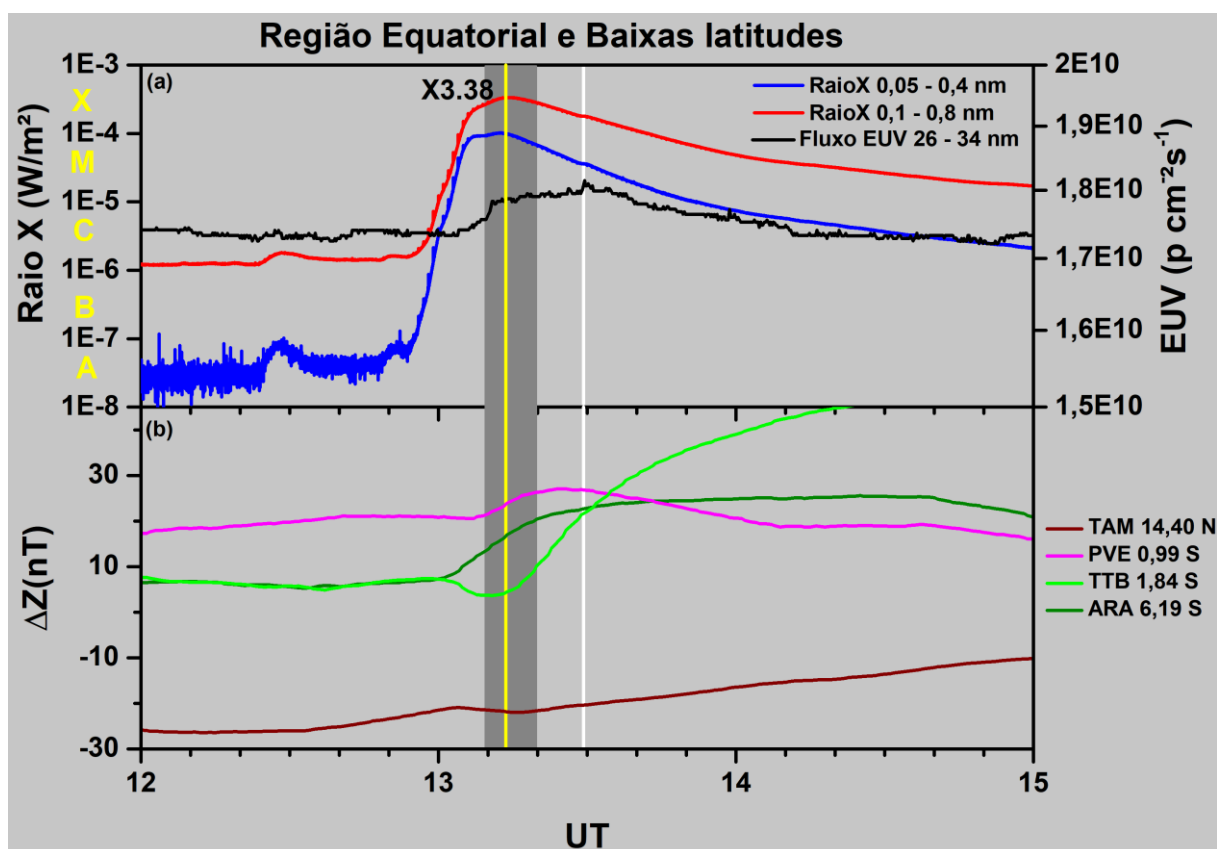


Fonte: A autora

Na região da América do Norte (Figura 30b), também se nota os efeitos causados pelo SF. Na Figura 30c, que contempla o setor africano, observou-se uma sincronização entre os sinais das estações analisadas, com máximos e vales sutis ocorrendo próximos ao horário do pico do *flare*, o que reforça a influência da radiação solar na modulação da componente ΔZ .

Nas estações localizadas nas regiões equatoriais e de baixas latitudes, houve uma sincronidade típica nessas regiões, porém as repostas se mostram de forma mais sutis nessa componente geomagnética (Figura 31). A maioria das estações apresentaram sincronidade e máximos aparentes com exceção de TTB, que tem aumento após o máximo do pico do *flare*.

Figura 31 - Variação do Raio-X, Extremo Ultravioleta (EUV) e estações de magnetômetros da região equatorial e de baixas latitudes para dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela representa o máximo da RX e a linha vertical branca o máximo do EUV. O retângulo em cinza evidencia aumentos e/ou quedas abruptas no valor de ΔZ .



Fonte: A autora

Em síntese, a resposta em ΔZ ao *flare* X3.38 mostrou-se mais sensível, mais dispersa.

A componente ΔH se mostrou mais eficiente na resposta geomagnética associada aos *flares*, enquanto a componente ΔZ apresenta respostas mais fracas

com ruídos. Esse comportamento evidencia que a intensificação das correntes ionosféricas horizontais constitui o principal mecanismo responsável pelas perturbações geomagnéticas observadas. Nas estações mais próximas da transição de iluminação (borda), as assinaturas não eram tão boas em relação às áreas que estavam mais no meio da iluminação.

Nas regiões de baixa e média latitude, observou-se a sincronização temporal entre vales e picos nas componentes ΔH e ΔZ em diversas estações, ainda que com amplitudes distintas, evidenciando o impacto global do flare sobre o sistema ionosférico. Adicionalmente, em latitudes equatoriais e baixas, identificou-se um atraso temporal entre o pico da emissão de raios X e os valores extremos nas componentes geomagnéticas, especialmente em ΔZ .

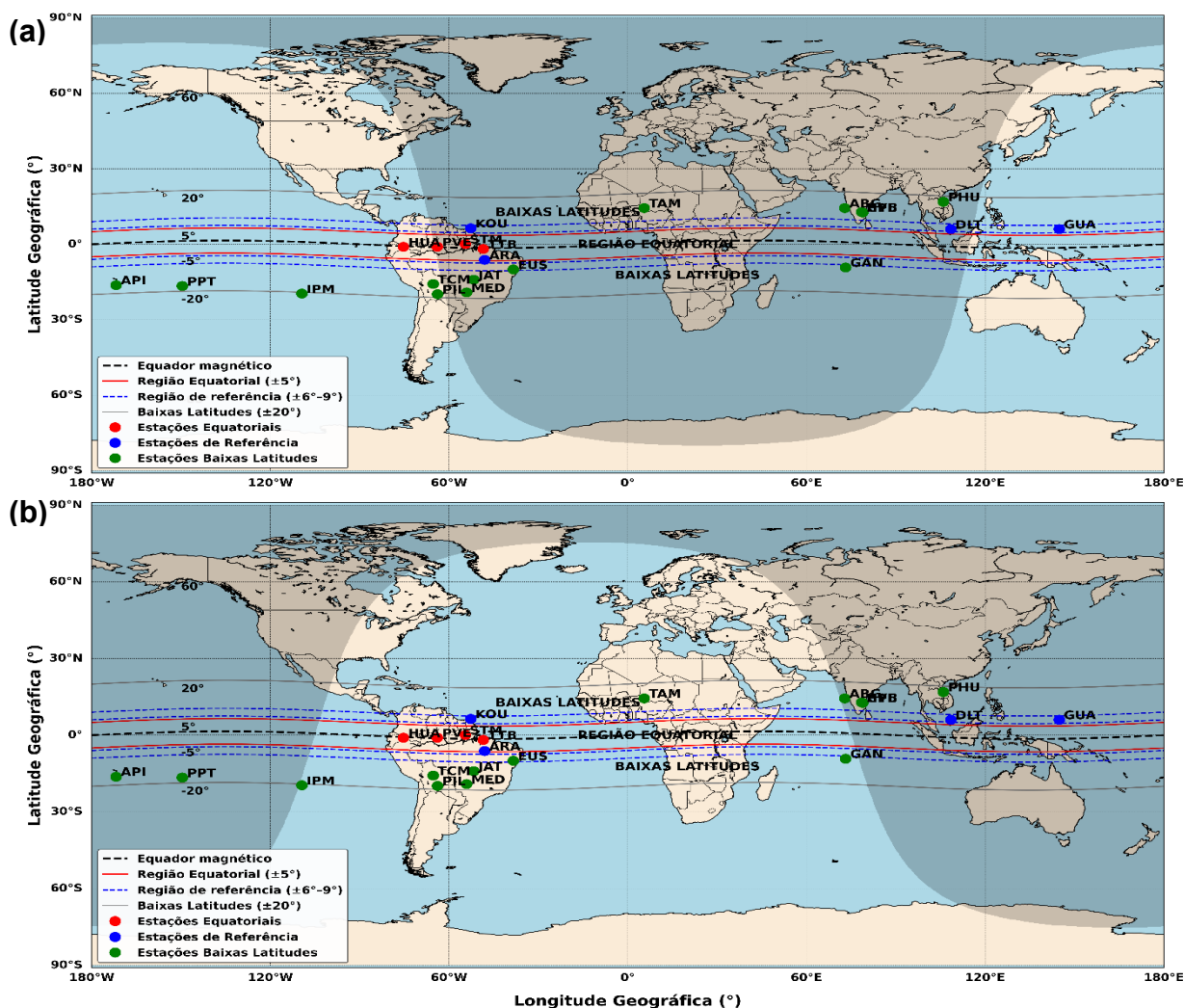
Esse atraso pode ser interpretado como resultado do acoplamento entre a atmosfera neutra superior e a ionosfera, uma vez que a energia absorvida na forma de radiação requer alguns minutos para ser convertida em correntes elétricas organizadas. Por fim, a variabilidade espacial das respostas entre diferentes estações pode ser atribuída a fatores como tempo local, ventos neutros e variações sazonais, os quais modulam o acoplamento ionosférico e influenciam a intensidade e o momento das perturbações geomagnéticas observadas.

5.3 ELETROJATO EQUATORIAL

Para se calcular a corrente do EEJ consideraram pares formados por uma estação equatorial e outra próxima, permitindo estimar com maior precisão a contribuição ionosférica sobre a componente horizontal do campo magnético (ΔH), conforme mostra a Equação 1 na seção 3.2.

A Figura 32 mostra a disponibilidade das estações de magnetômetros. O par TTB–KOU constitui a melhor combinação para esse cálculo. As informações sobre estação, longitude, latitude e dip latitude pode ser encontradas no Apêndice C.

Figura 32 - Mapa das estações de magnetômetros disponíveis para a análise do Eletrojato Equatorial. (a) corresponde ao dia 22 de fevereiro de 2024 e (b) ao dia 9 de fevereiro de 2024. As estações de referência são indicadas em azul, as estações equatoriais em vermelho e as estações de baixa latitude em verde.



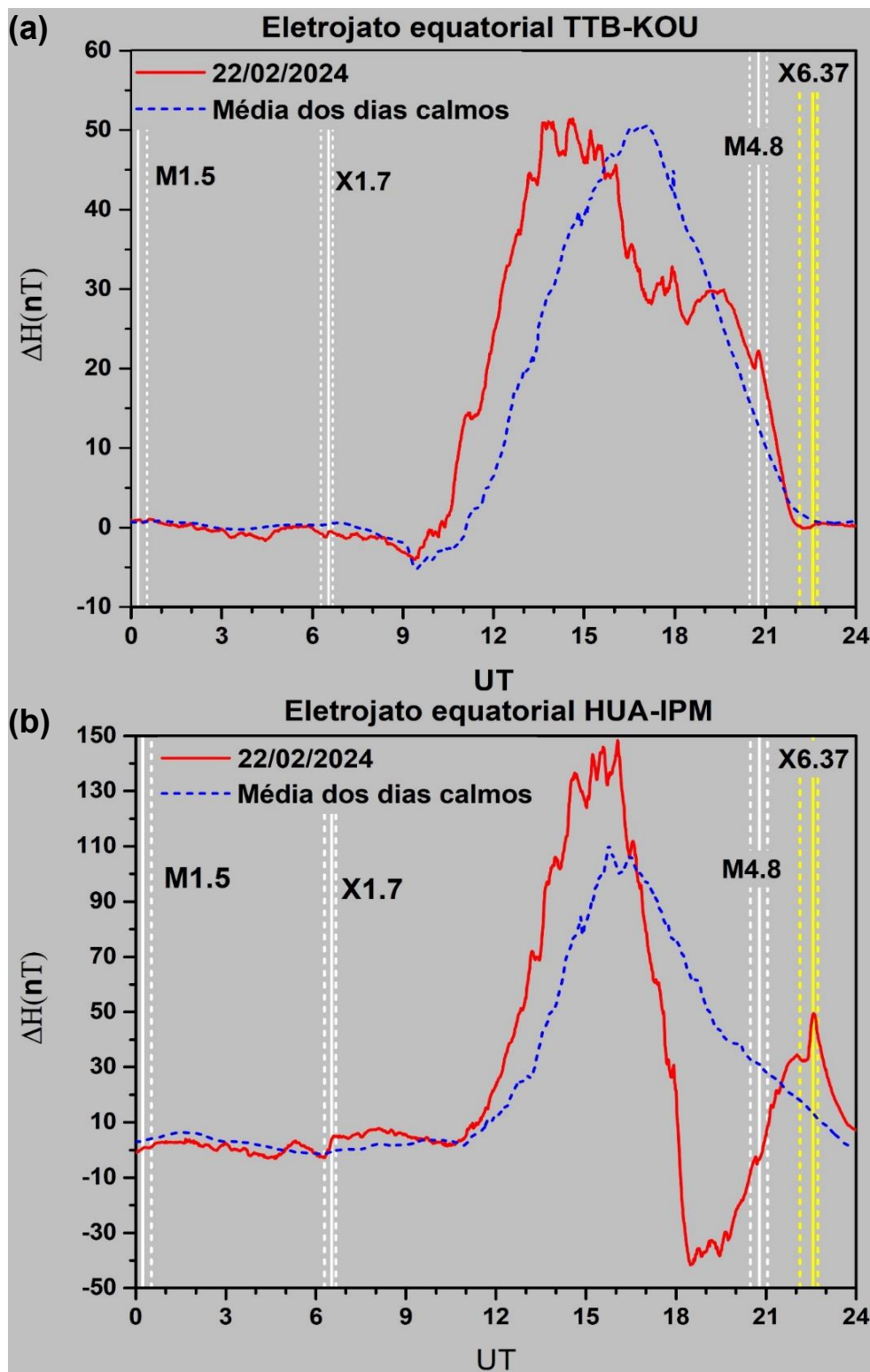
Fonte: A autora

Observa-se que, no dia 22, o par de estações TTB–KOU encontrava-se no período noturno, condição na qual a influência do EEJ é naturalmente reduzida. A Figura 33a mostra que, nesse caso, a resposta associada ao EEJ não foi significativa. Nos casos em que o *flare* ocorre no setor noturno local, o efeito sobre o EEJ é consideravelmente reduzido, devido à ausência de radiação ionizante direta.

Nesse dia, o setor iluminado dispunha de um número limitado de estações adequadas para a estimativa do EEJ. Assim, foi realizada uma segunda análise utilizando a estação IPM ($-19,6^\circ$ de latitude magnética) como estação de referência não equatorial. Embora essa estação se encontre fora da faixa considerada ideal, ela era uma das mais próximas da estação HUA (única estação equatorial iluminada disponível neste dia), foi possível identificar a influência do SF sobre o EEJ, conforme ilustrado na Figura 33b. Tais observações confirmam que a resposta do EEJ depende fortemente da geometria de iluminação solar e da localização das estações em relação ao equador magnético.

As respostas não foram uniformes nas estações analisadas. Na Figura 33a, observa-se um pico modesto por volta de 20:46 UT, seguido por um decaimento característico do contraeletrojato até a ocorrência do flare de classe X. Na Figura 33b, embora também ocorra o contraeletrojato após o evento principal, nota-se um aprofundamento mais intenso por volta de 16:00 UT, evidenciando diferenças locais na variabilidade eletrodinâmica.

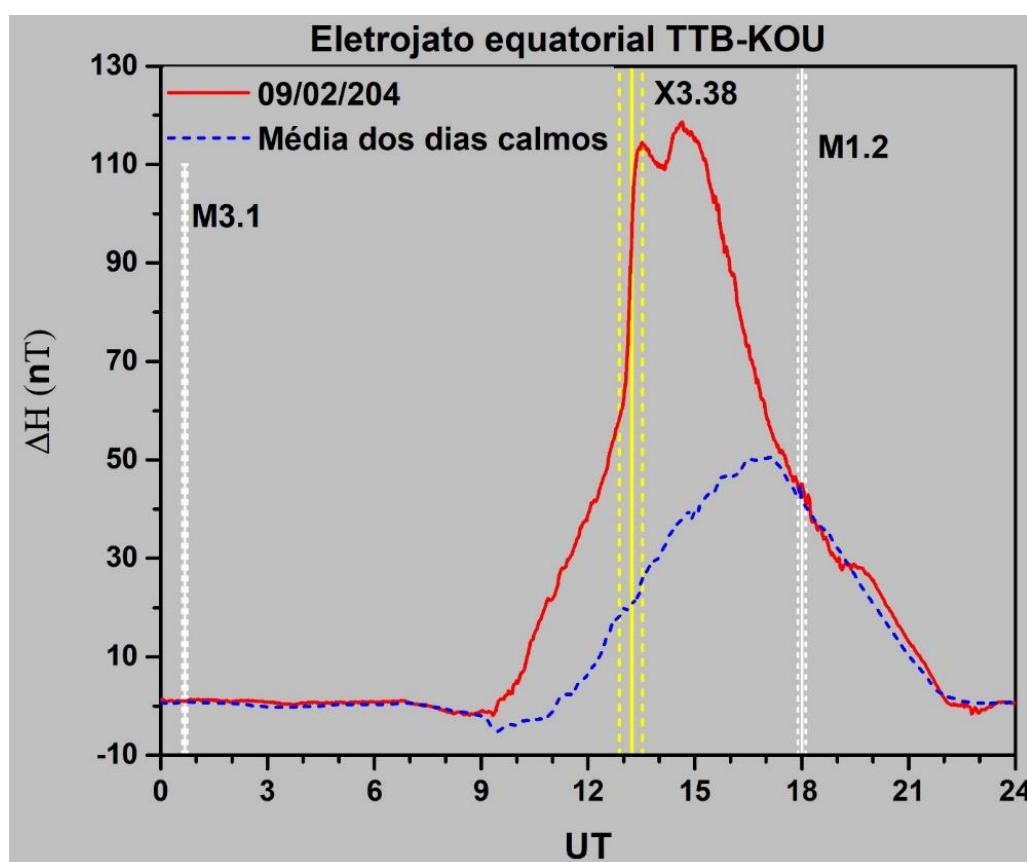
Figura 33 - Variação do Eletrojoato Equatorial no dia 22 de fevereiro. (a) estações e magnetômetros TTB – KOU e (b) estações de magnetômetros HUA-IPM. A linha vertical amarela corresponde ao *flare* estudado e as linhas verticais brancas os outros *flares* que ocorrem no dia. As linhas verticais contínuas representam o máximo do *flare* e as pontilhas início e fim do evento.



Fonte: A autora

Para o dia 09/02, as estações TTB e KOU, as melhores para essa análise estavam na parte iluminada, como pode ser visto na Figura 34. Por conta do *flare* nesse dia ter ocorrido em um horário de máxima incidência solar, é possível ver o aumento do EEJ, conforme a mostra a Figura 35, onde o aumento nesse caso pode ser responsável pelo SF.

Figura 34 - Variação do Eletrojoato Equatorial no dia 09 de fevereiro. A linha vertical amarela corresponde ao *flare* estudado e as linhas verticais brancas os outros *flares* que ocorrem no dia. As linhas verticais contínuas representam o máximo do *flare* e as pontilhas início e fim do evento.



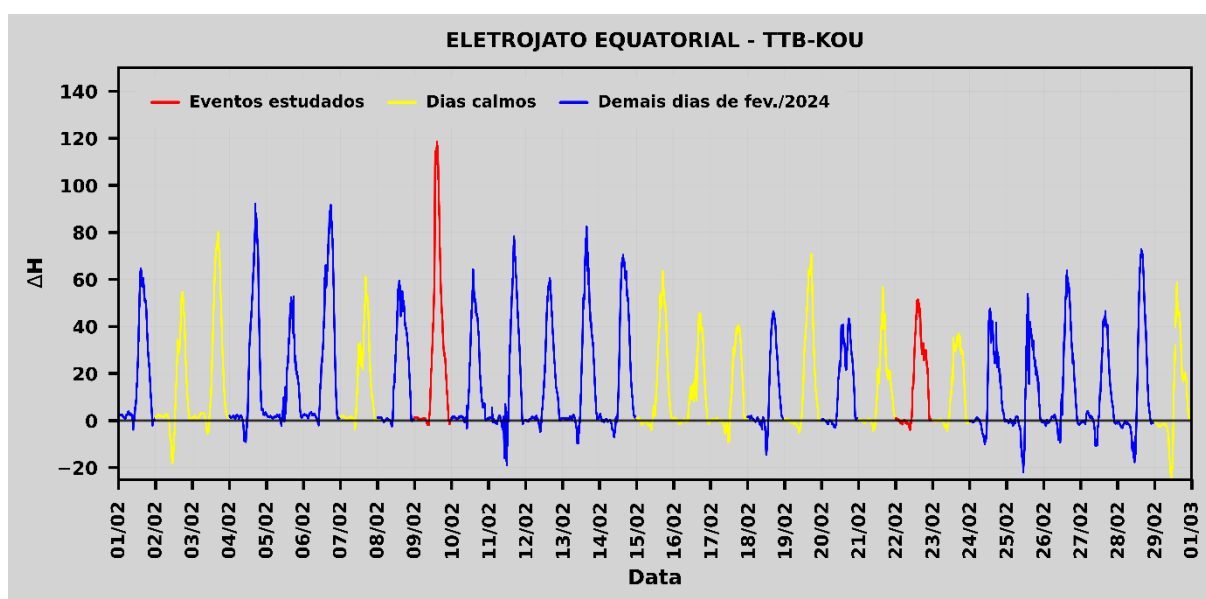
Fonte: A autora

As séries temporais de ΔH apresentadas nas Figuras 33 e 34 exibem um comportamento consistente com o descrito na literatura, caracterizado pelo aumento da intensidade do EEJ aproximadamente entre 09 e 18 UT. Esse intervalo coincide com o período de máxima condutividade da camada E da ionosfera e com o horário de maior incidência da radiação solar. Os resultados indicam ainda que a natureza da resposta do EEJ a um SF depende do histórico temporal das perturbações geomagnéticas que antecedem e acompanham a observação do evento, conforme discutido por [Abdu et al. \(2017\)](#).

Em comparação ao evento de 22 de fevereiro, a análise do *flare* ocorrido em 9 de fevereiro, a partir do par de estações TTB–KOU (Figura 35), evidencia uma resposta mais clara do EEJ, associada ao horário de ocorrência do evento, próximo ao período de máxima incidência solar. Essa condição resultou em uma intensificação mais pronunciada do EEJ, observada no pico registrado nesse dia em relação ao evento de 22 de fevereiro, destacando a forte dependência da resposta do EEJ em relação à geometria de iluminação solar e às condições ionosféricas prévias.

De modo geral, as séries temporais revelam um aumento pronunciado da corrente durante a fase principal do *flare*, seguido por fases de contraeletrojato. Esses resultados reforçam o papel do EEJ como um importante indicador eletrodinâmico da resposta ionosférica a distúrbios impulsivos induzidos por SFs.

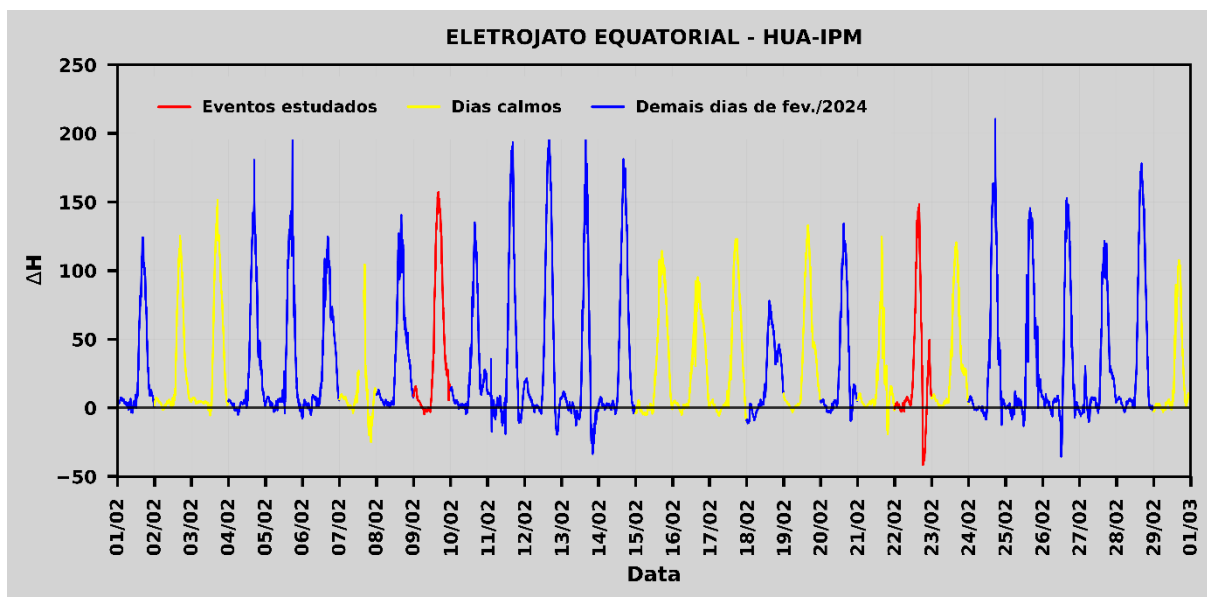
Figura 35 - Variação do Eletrojoato Equatorial (TTB-KOU) no mês de fevereiro. A cor vermelha indica os dias estudado, amarelo os dias calmos do mês de fevereiro e azul os demais dias do mês.



Fonte: A autora

Nos outros pares usados como comparação para o dia 22 de fevereiro, HUA-IPM, a variação mensal (Figura 36) nesse caso EEJ deu mais alto, o que pode ter relação com a escolha de estação que estava fora da restrição do cálculo.

Figura 36 - Variação do Eletrojato Equatorial (HUA-IPM) no mês de fevereiro. A cor vermelha indica os dias estudado, amarelo os dias calmos do mês de fevereiro e azul os demais dias do mês.



Fonte: A autora

5.4 TEC VERTICAL E TAXA DE VARIAÇÃO DO TEC

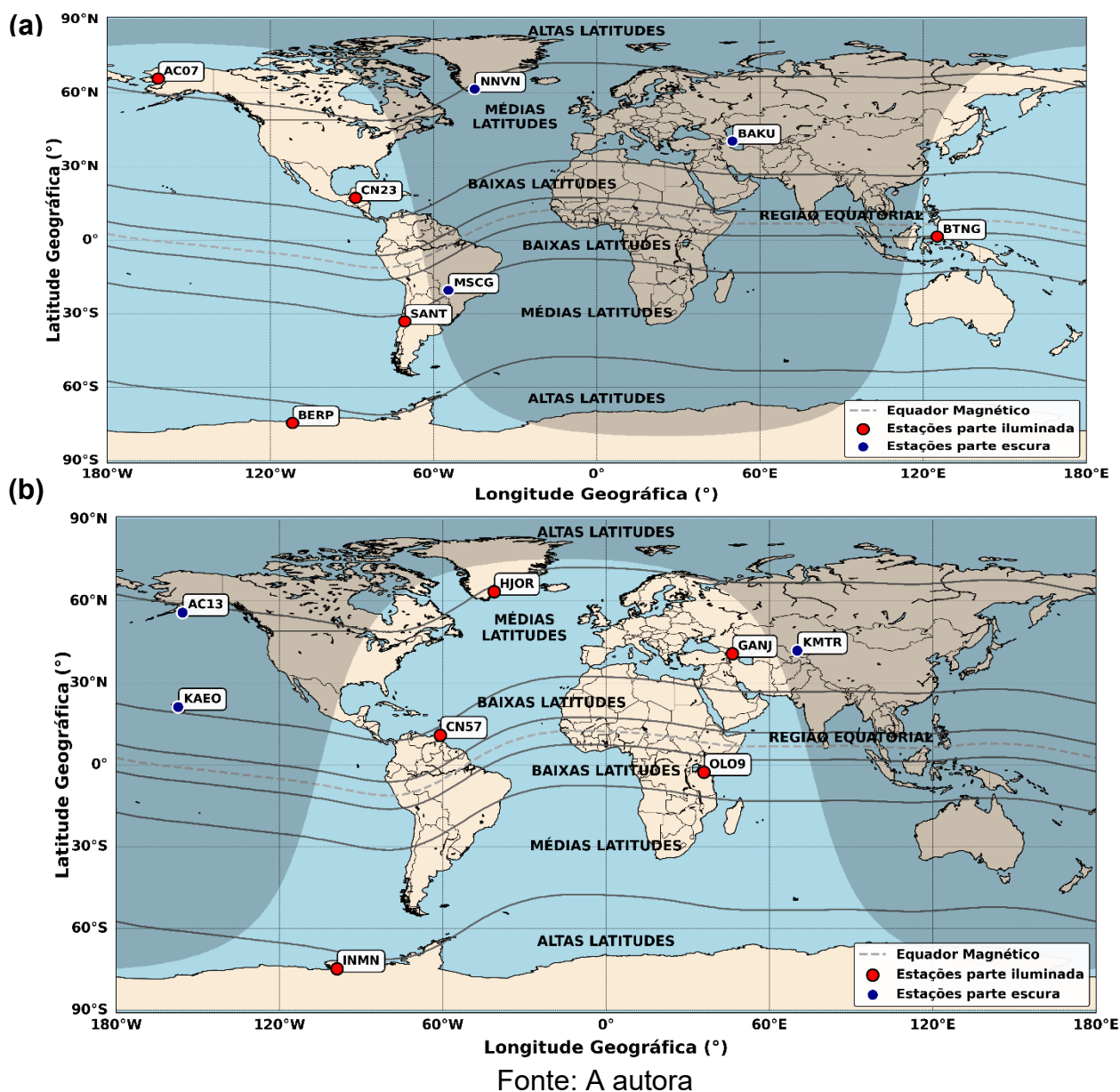
A análise das perturbações espaço-temporais da ionosfera foi realizada a partir de dados das redes GNSS, utilizando valores de TEC obtidos a partir de observações de satélites com ângulo de elevação superior a 30° . A partir desses dados, foram estimados o VTEC e de sua taxa de variação temporal, ROT, conforme descrito na Seção 4.2.1 gerados através do software UTECDA da Univap. O VTEC permite caracterizar variações na densidade eletrônica sobre as coordenadas geográficas de cada receptor, enquanto o ROT, correspondente à derivada temporal do VTEC, evidencia mudanças abruptas associadas a perturbações ionosféricas.

A escolha das estações GNSS seguiu o mesmo critério adotado para os magnetômetros, abrangendo diferentes regiões latitudinais, de modo a possibilitar uma análise espacial ampla. A Figura 37a apresenta as estações utilizadas para o dia 22 de fevereiro, enquanto a Figura 37b mostra as estações selecionadas para o dia 9 de fevereiro. A descrição detalhada da localização das estações empregadas encontra-se no Apêndice D.

Das 3133 estações listadas como disponíveis (Figura 11), muitas não apresentavam dados válidos para o período analisado. Assim, para o dia 22 de fevereiro (Figura 37a), foram selecionadas cinco estações de GPS-TEC localizadas na região iluminada (parte escura), sendo duas em altas latitudes (Polo Norte e Polo Sul), duas em médias latitudes (América Central e América do Sul) e uma em baixa latitude/região equatorial (Oceania). Para fins de comparação, também foram utilizadas três estações situadas na região não iluminada, sendo uma em baixa latitude (América do Sul) e duas em médias latitudes (América do Norte e Ásia).

No dia 9 de fevereiro, igualmente foram selecionadas cinco estações na região iluminada e três na região não iluminada (parte escura) do globo, conforme ilustrado na Figura 37b. Na região iluminada, as estações distribuíam-se em uma alta latitude (Polo Sul), duas médias latitudes (América do Norte e Ásia) e duas baixas latitudes (América do Sul e África). Já na região não iluminada, foram analisadas três estações localizadas em médias latitudes (América do Norte, Pacífico e Ásia).

Figura 37 - Estações de GPS-TEC usadas sendo os pontos vermelhos representando as estações na parte iluminada e os pontos azuis as estações na área não iluminadas. (a) dia 22 de fevereiro e (b) 09 de fevereiro.



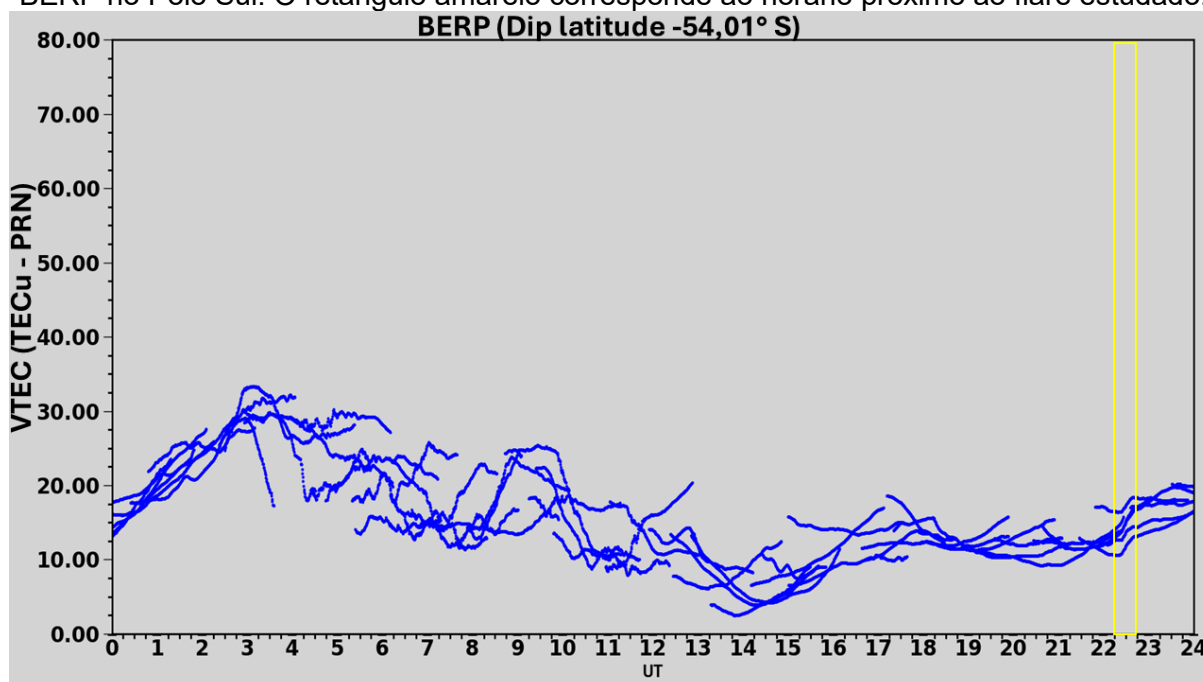
Para facilitar a interpretação das respostas as análises serão organizadas por evento, sendo a Seção 5.4.1 apresentará os resultados referentes ao evento do dia 22, enquanto a Seção 5.4.2 tratará do evento do dia 09.

5.4.1 SOLAR FLARE X.6.37 EM 22 DE FEVEREIRO 2024

Com o objetivo de caracterizar o comportamento da ionosfera antes, durante e após a ocorrência do SF, a análise foi conduzida considerando janelas de 24 horas de dados de VTEC. Essa abordagem permite identificar a variabilidade ionosférica

que se manifesta de forma suave e contínua do VTEC ao longo do dia. A Figura 38 ilustra um exemplo representativo desse comportamento ionosférico. Em geral, espera-se um aumento e sincronização do VTEC durante a ocorrência de um *flare*, entretanto, esse efeito nem sempre é claramente identificável em janelas diárias, como observado no exemplo apresentado.

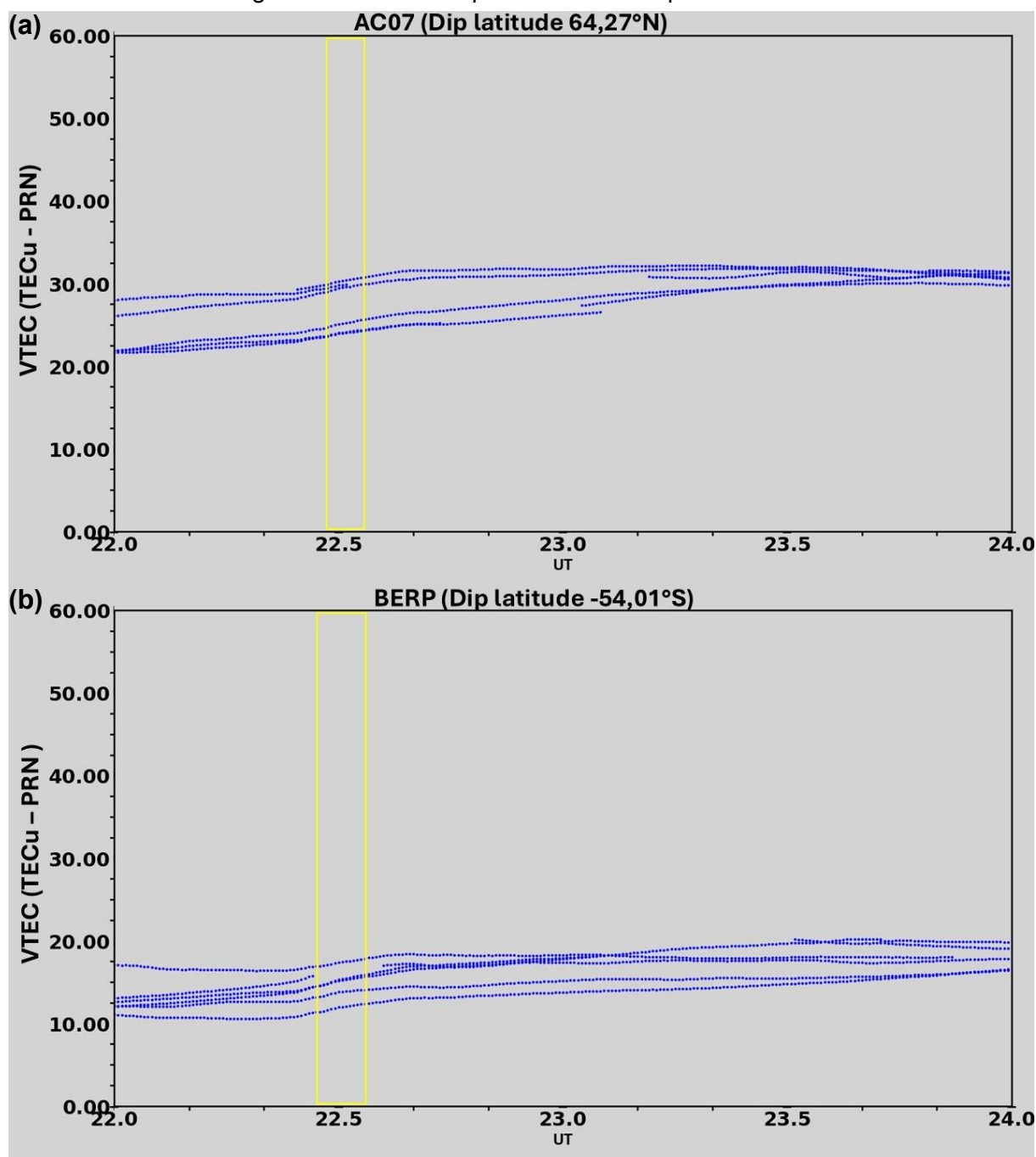
Figura 38 - Variação do VTEC ao longo de 24 horas no dia 22 de fevereiro para a estação BERP no Polo Sul. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.



Fonte: A autora

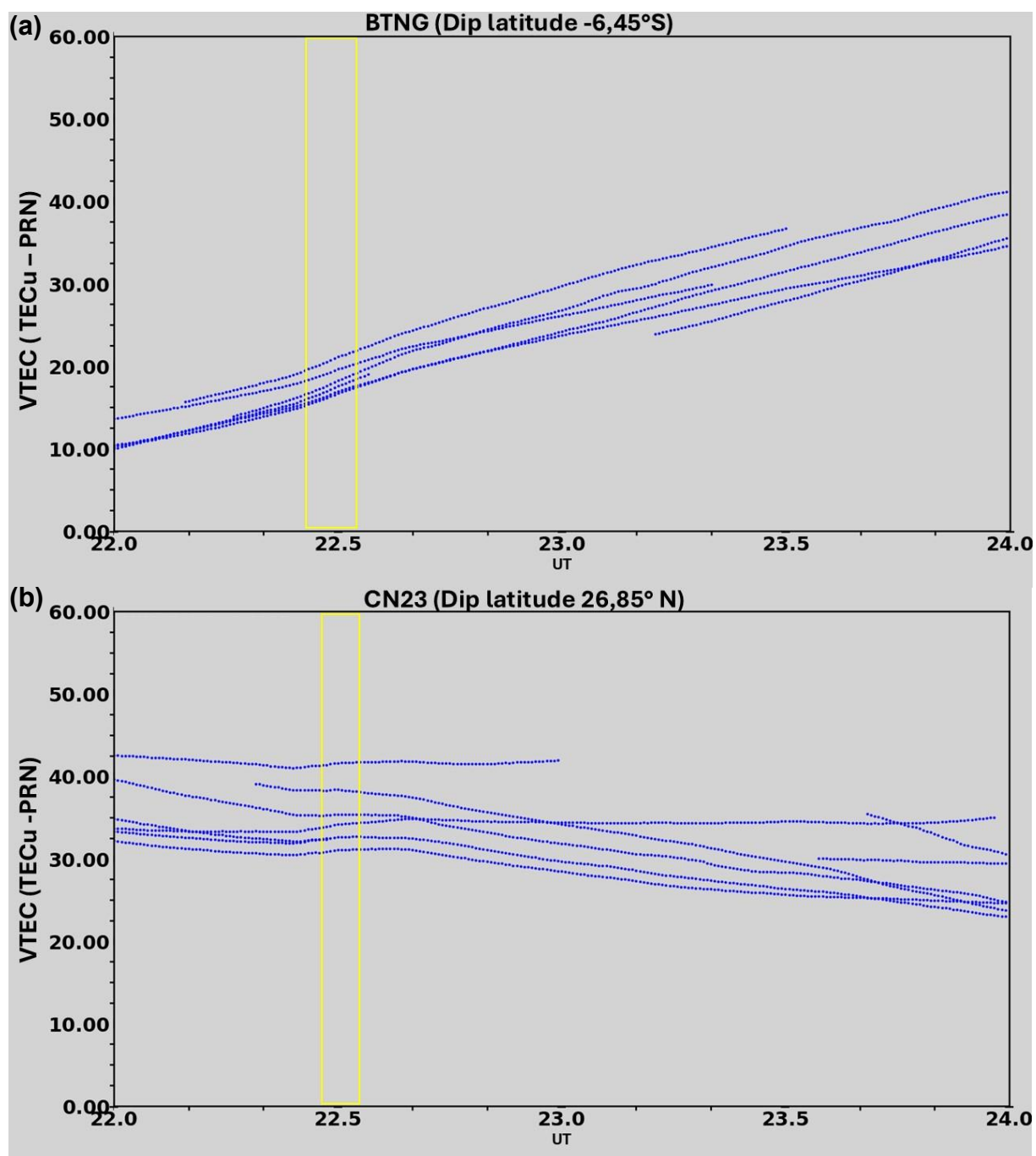
Para uma investigação mais detalhada, a análise do VTEC foi centralizada no intervalo temporal centrado nas horas próximas à ocorrência do *solar flare*, entre 22 e 24 UT, conforme apresentado nas Figuras 39 a 41. Essa abordagem possibilita examinar com maior resolução temporal a existência de possíveis sincronizações entre o aumento da radiação solar e a resposta do conteúdo eletrônico ionosférico.

Figura 39 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)AC07 e (b) BERP no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado.



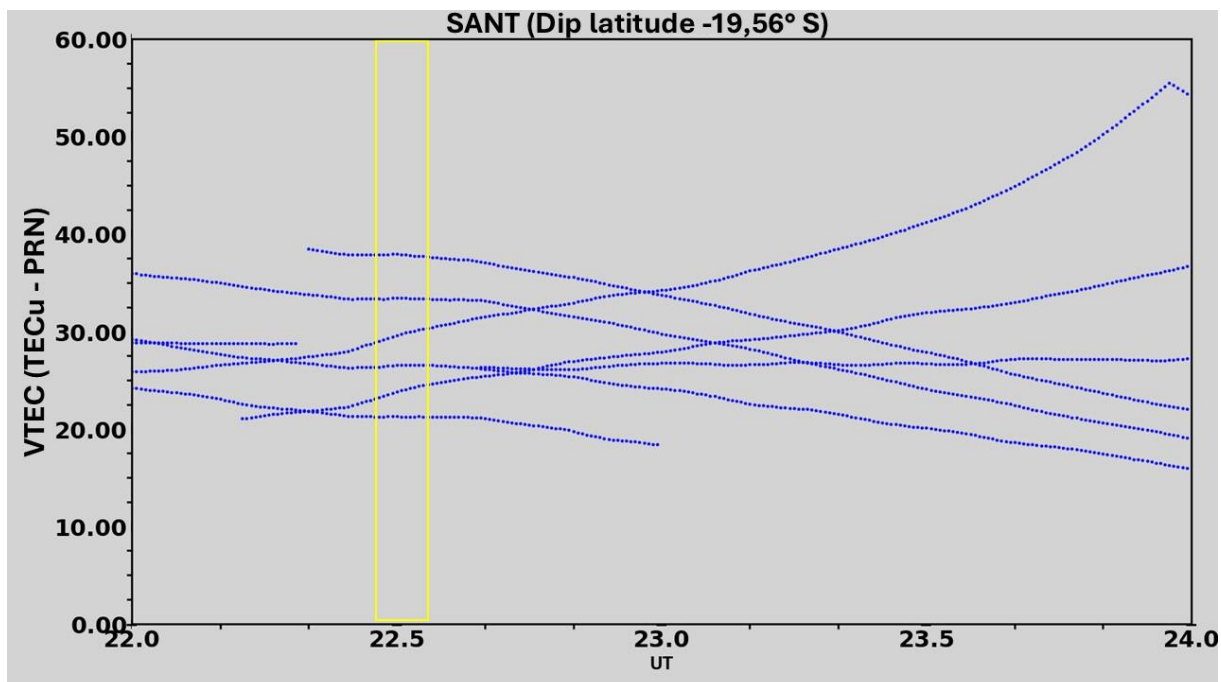
Fonte: A autora

Figura 40 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)BTNG e (b) CN23 no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

Figura 41 - Variação do VTEC para a estação GNSS SANT no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



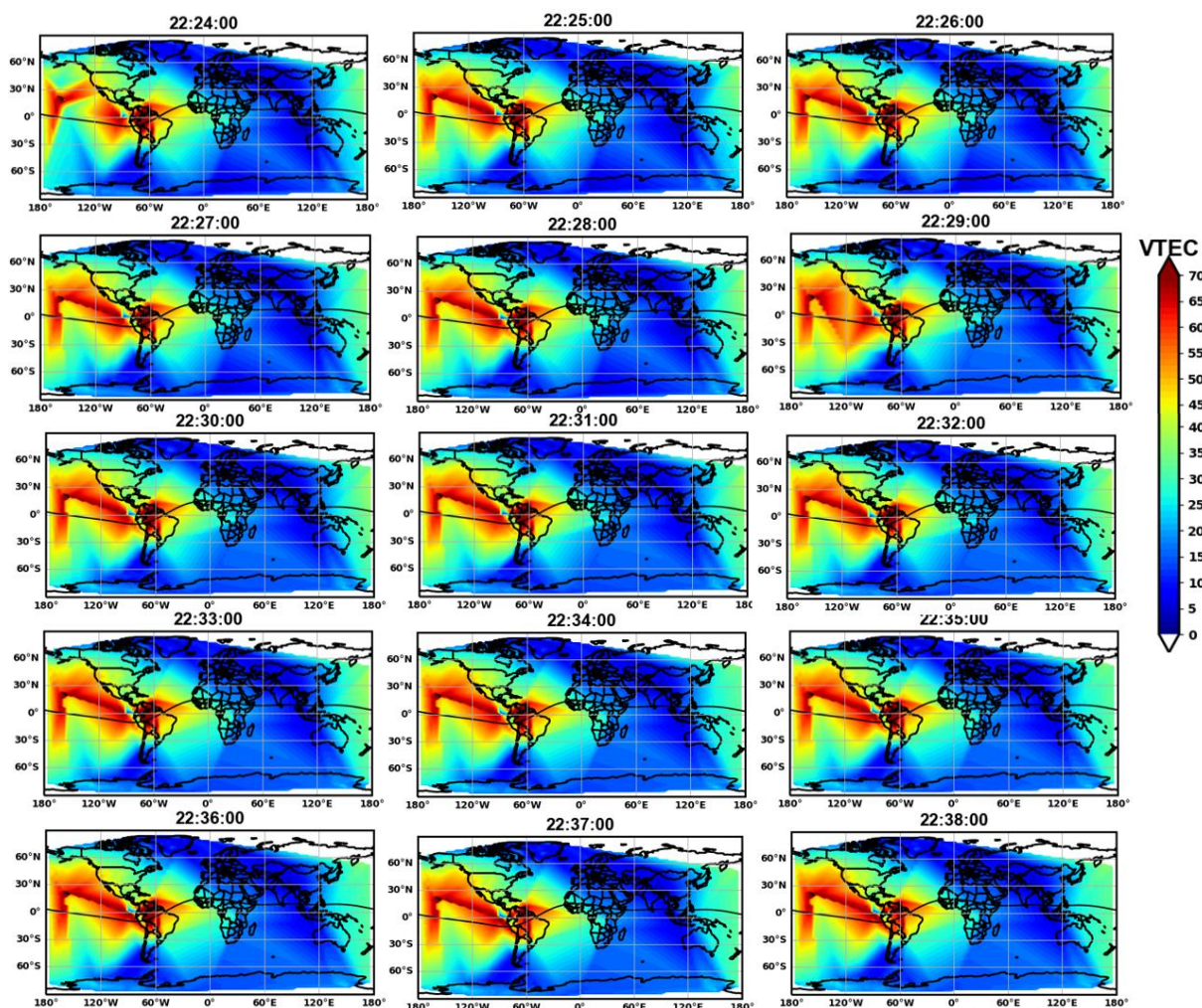
Fonte: A autora

Como pode ser observado, as variações do VTEC nesse intervalo manifestam-se principalmente como pequenas inflexões na taxa de crescimento do TEC, sem a presença de picos abruptos bem definidos. Estudos recentes indicam que as variações do VTEC associadas a SFs são, em geral, de difícil identificação devido à sua baixa amplitude e à forte sobreposição com variações da ionosfera, especialmente aquelas induzidas pela maré diurna. [Fagundes et al. \(2024a\)](#) demonstraram que, nessas condições, a assinatura temporal do *flare* no VTEC tende a permanecer praticamente oculta, o que limita a eficácia desse parâmetro na investigação de perturbações ionosféricas impulsivas. Resultados semelhantes foram reportados por [Yasykevich et al. \(2018\)](#) e [Chakraborty et al. \(2021\)](#), que analisaram *flares* de classes X2.2 e X9.3 e observaram ausência de mudanças significativas no TEC durante o evento de menor intensidade.

A Figura 42 apresenta mapas das variações espaço-temporais do VTEC, de polo a polo do globo, no intervalo de 22:24 a 22:38 UT. Esses mapas ilustram a distribuição latitudinal e longitudinal do VTEC ao longo de um período de 14 minutos, com resolução temporal de 1 minuto. Observa-se que os maiores valores de VTEC concentram-se na região iluminada, enquanto valores reduzidos predominam no setor

noturno. No entanto, conforme discutido anteriormente, essas variações espaciais do VTEC não se mostram suficientemente para a identificação da assinatura do *flare*.

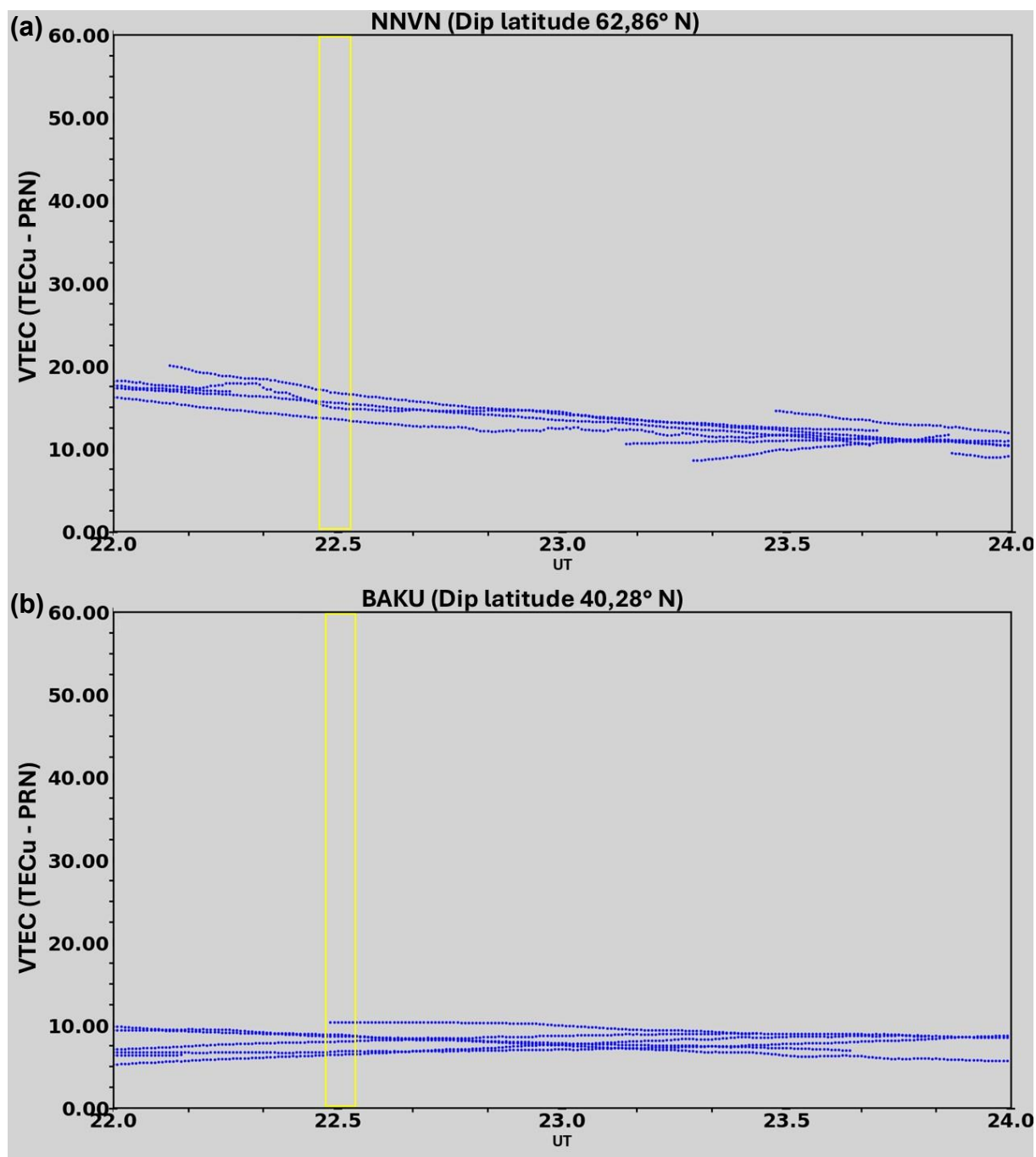
Figura 42 - Distribuição global do VTEC em resolução temporal de 1 minuto no dia 22 de fevereiro, durante o intervalo associado ao SF. As cores representam a magnitude do VTEC.



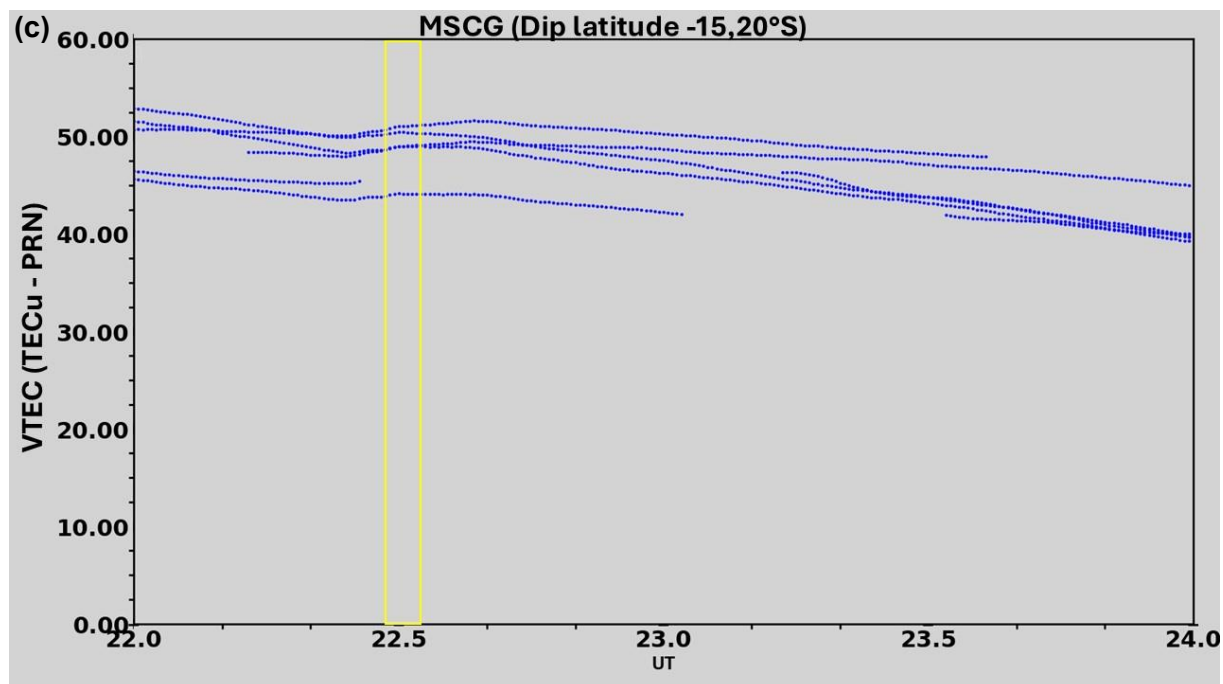
Fonte: A autora

Abaixo, são analisadas as estações localizadas em regiões não iluminadas no momento da ocorrência do *flare*. Nessas áreas, a ausência de radiação solar direta resulta em níveis reduzidos de ionização local, o que se reflete em um comportamento mais estável do VTEC ao longo do intervalo analisado. De modo geral, não são observadas inflexões significativas associadas ao horário do *flare* (Figura 43), o que reforça a forte dependência da resposta ionosférica em relação à incidência direta da radiação ionizante.

Figura 43 – Variação do VTEC para as estações GNSS (a) NNVN, (b)BAKU e (c)MSCG no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora



Fonte: A autora

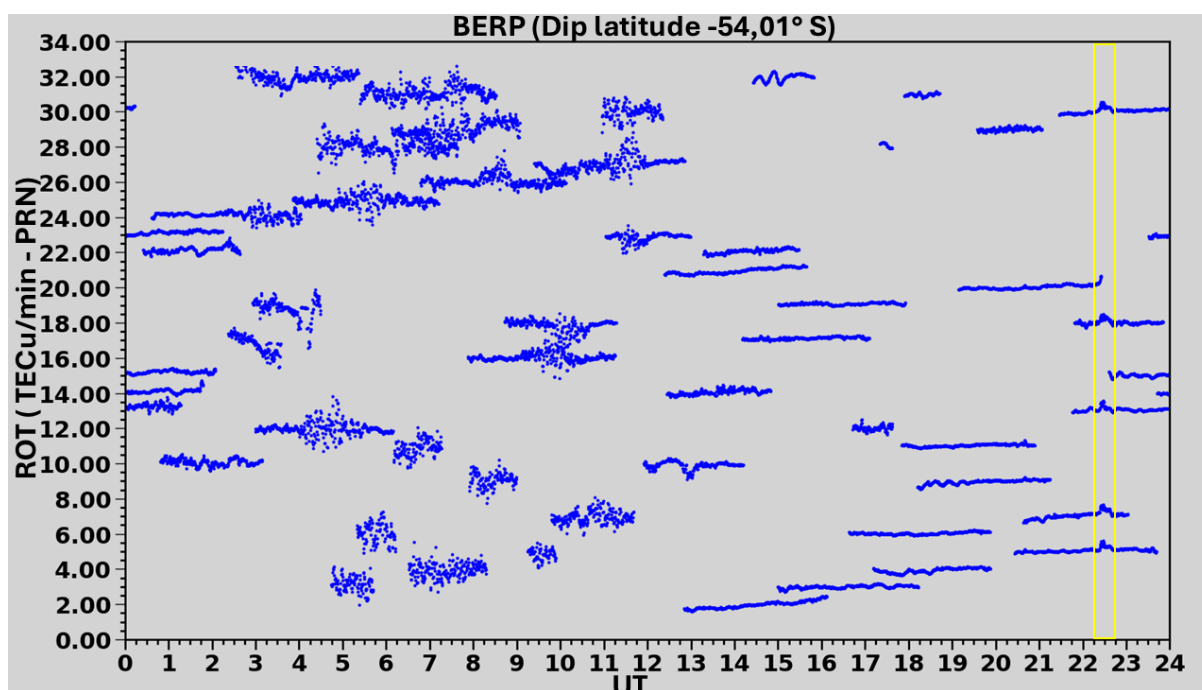
Diante das limitações observadas na análise do VTEC, o uso do ROT, mostra-se mais apropriado para a detecção de irregularidades ionosféricas de pequena escala. O ROT é calculado a partir da diferença temporal do TEC, conforme descrito na Seção 4.3, e apresenta elevada sensibilidade a flutuações rápidas associadas a gradientes da densidade eletrônica. A amplitude dessas flutuações depende tanto da intensidade das irregularidades ionosféricas quanto do nível de densidade eletrônica ao longo do caminho de propagação do sinal.

Para essa análise, foram construídos gráficos de flutuação de fase do ROT utilizando os mesmos receptores empregados na estimativa do VTEC, o que permite uma comparação direta entre ambos os parâmetros. Nesses gráficos, o tempo universal (UT) é representado no eixo horizontal, enquanto os códigos pseudoaleatórios de ruído (PRN) dos diferentes satélites GNSS ocupam o eixo vertical. Cada conjunto de pontos horizontais coloridos corresponde ao ROT associado a um satélite específico, cujo comprimento indica o intervalo de tempo durante o qual o satélite permaneceu no campo de visão (Field of View – FOV) do receptor.

Na ausência de irregularidades ao longo do caminho satélite–receptor, as flutuações do ROT manifestam-se como linhas horizontais quase retílineas, com baixa dispersão vertical. Em contraste, a presença de irregularidades ionosféricas é

caracterizada por uma dispersão vertical significativa dos pontos ao longo do tempo, indicando flutuações rápidas e aleatórias da fase do sinal, como ilustrado na Figura 44. Como essas irregularidades são fenômenos locais e altamente dinâmicos, sinais provenientes de diferentes satélites (PRNs distintos) podem atravessar regiões perturbadas em instantes distintos, resultando em inícios e términos não simultâneos das flutuações observadas.

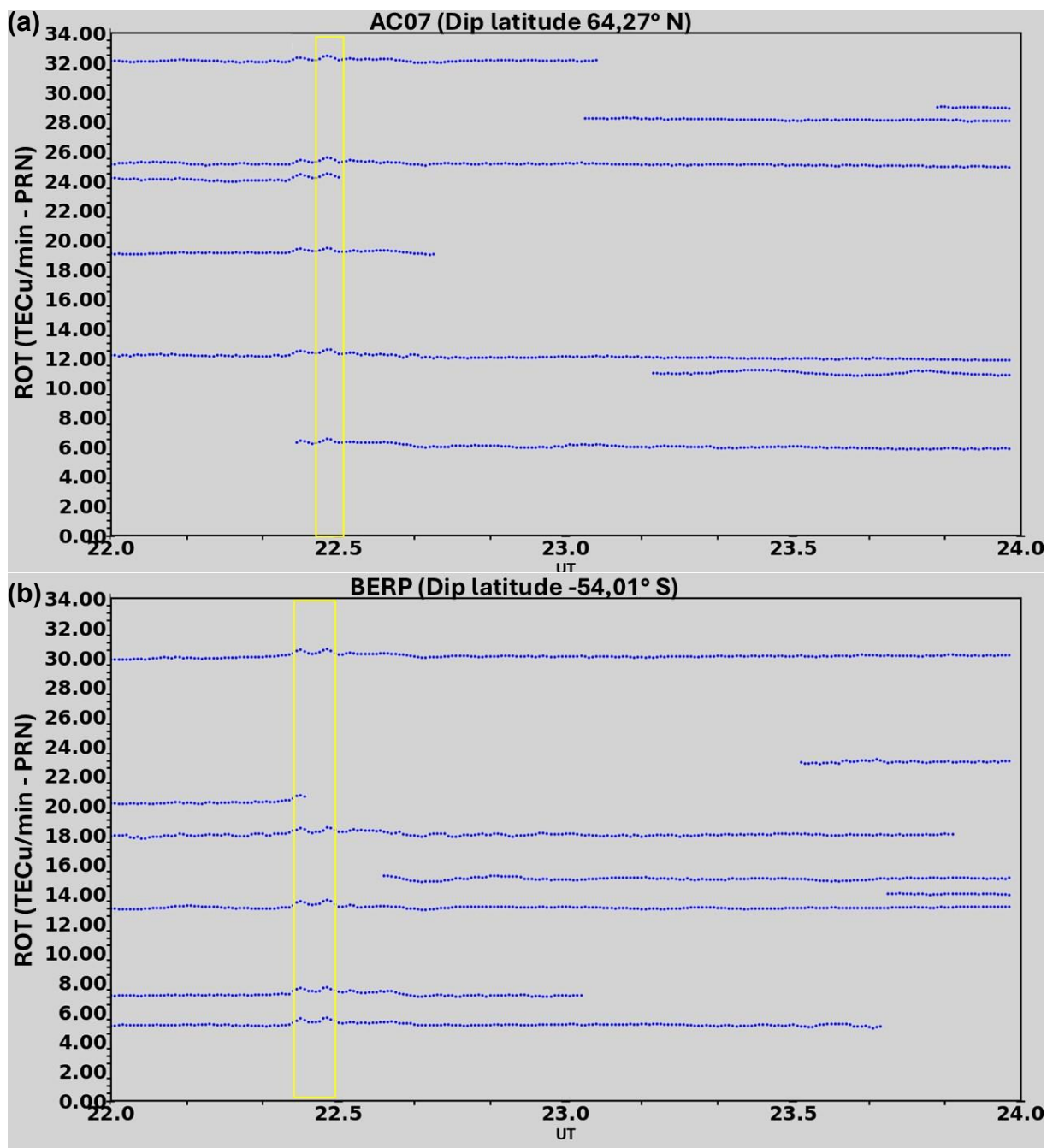
Figura 44 - Variação do ROT ao longo de 24 horas no dia 22 de fevereiro para a estação BERP. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

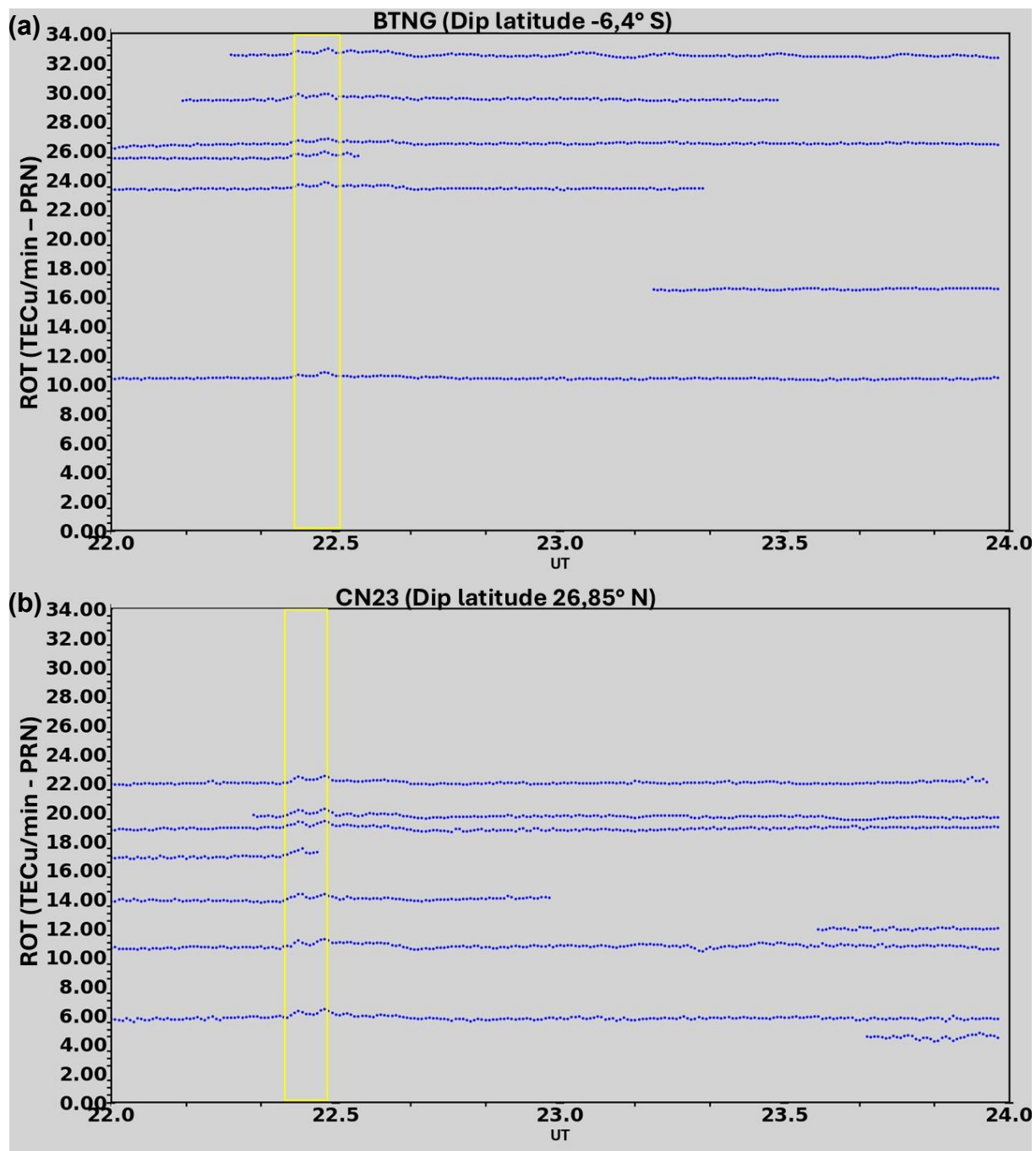
Durante o intervalo do *flare*, observa-se um aumento na dispersão vertical do ROT, evidenciando flutuações rápidas da densidade eletrônica associadas ao evento. Os gráficos de ROT nas estações localizadas na região iluminada (Figura 45 a 47) mostram flutuações mais intensas e bem definidas nos minutos próximos ao pico do SF. A recorrência desse padrão em todas as estações iluminadas analisadas confirma que as perturbações observadas são diretamente induzidas pela ionização impulsiva causada pelo *flare*.

Figura 45 - Variação do ROT para as estações (a)AC07 e (b)BERP. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



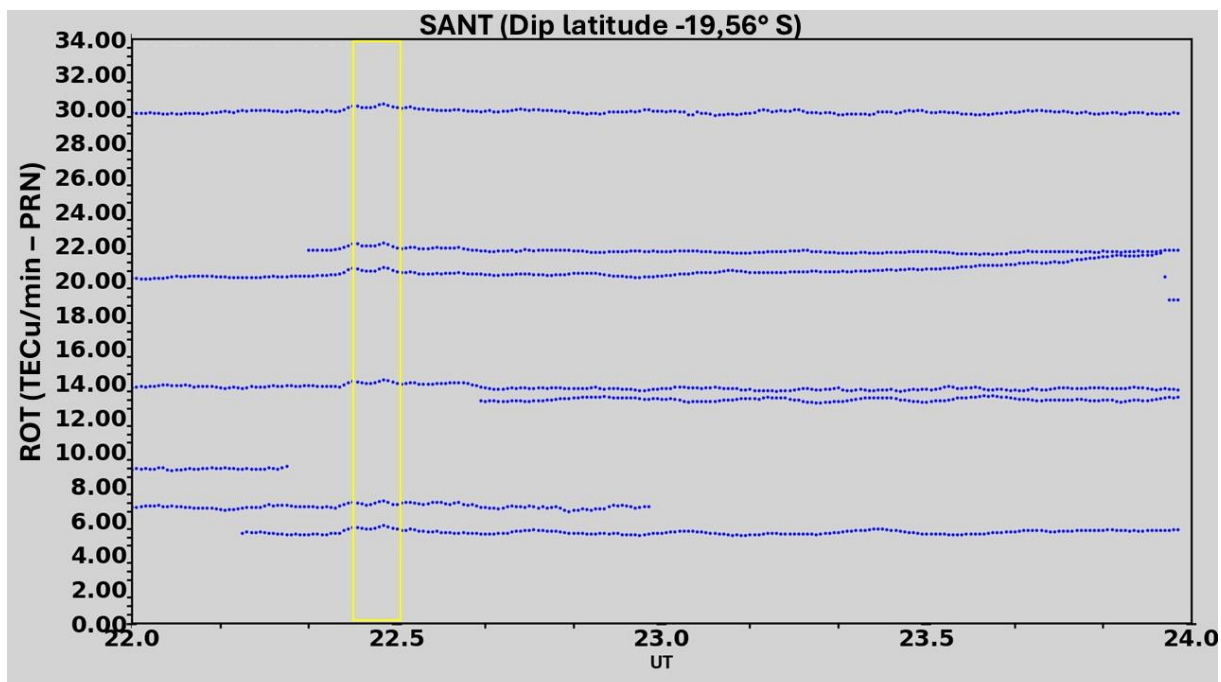
Fonte: A autora

Figura 46 - Variação do ROT para as estações (a)BTNG e (b)CN23. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

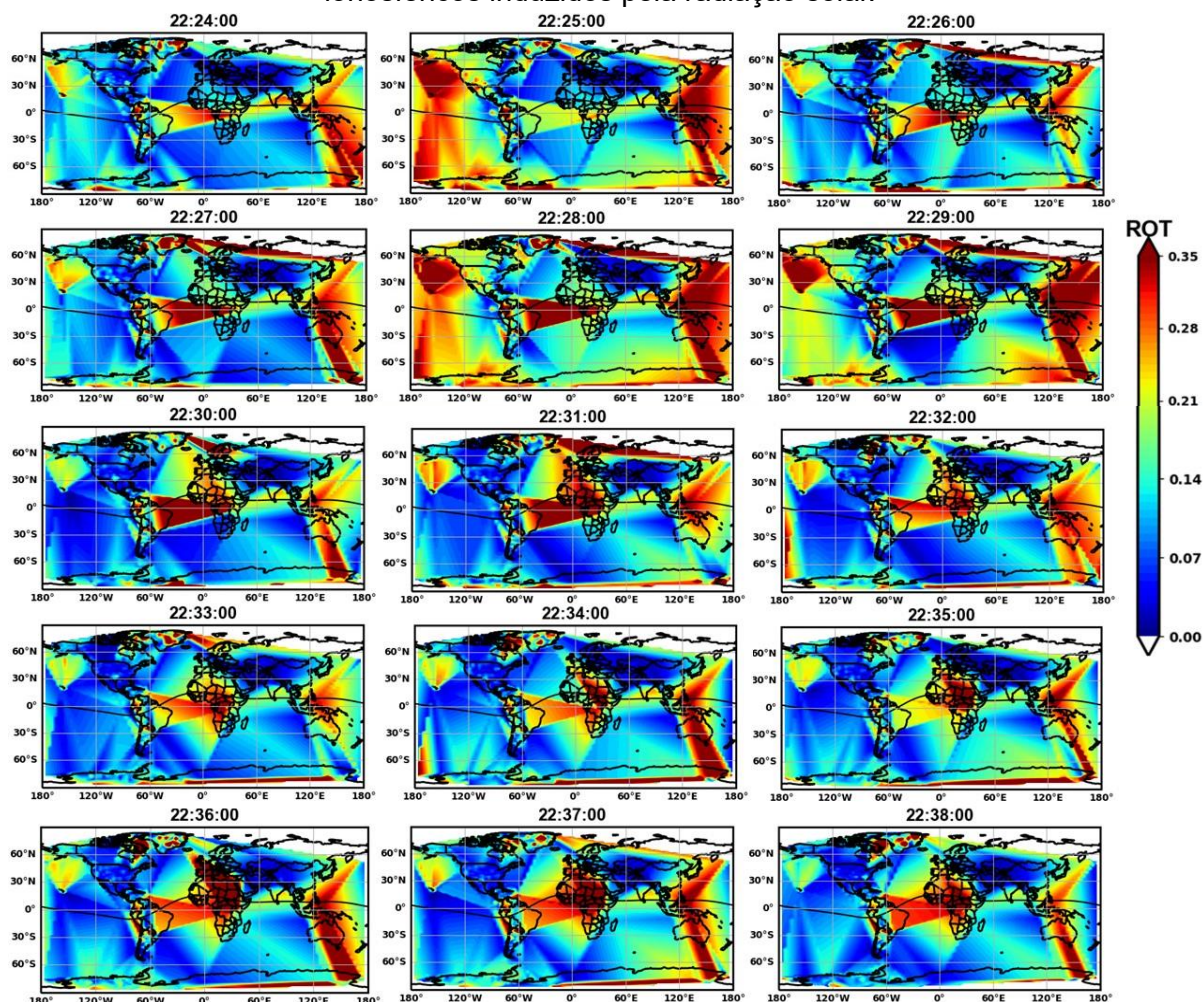
Figura 47 - Variação do ROT para a estação SANT. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao flare estudado



Fonte: A autora

A Figura 48 apresenta mapas das variações espaço-temporais do ROT, de polo a polo do globo, no intervalo de 22:24 a 22:38 UT. Esses mapas ilustram a distribuição latitudinal e longitudinal do ROT ao longo de um período de 14 minutos, com resolução temporal de 1 minuto. Observa-se que os maiores valores de ROT concentram-se a partir das 22:25 até 22:29 na região que estava iluminada na Terra, o que reflete a resposta rápida da ionosfera à ionização impulsiva induzida pela radiação de RX e EUV durante o SF.

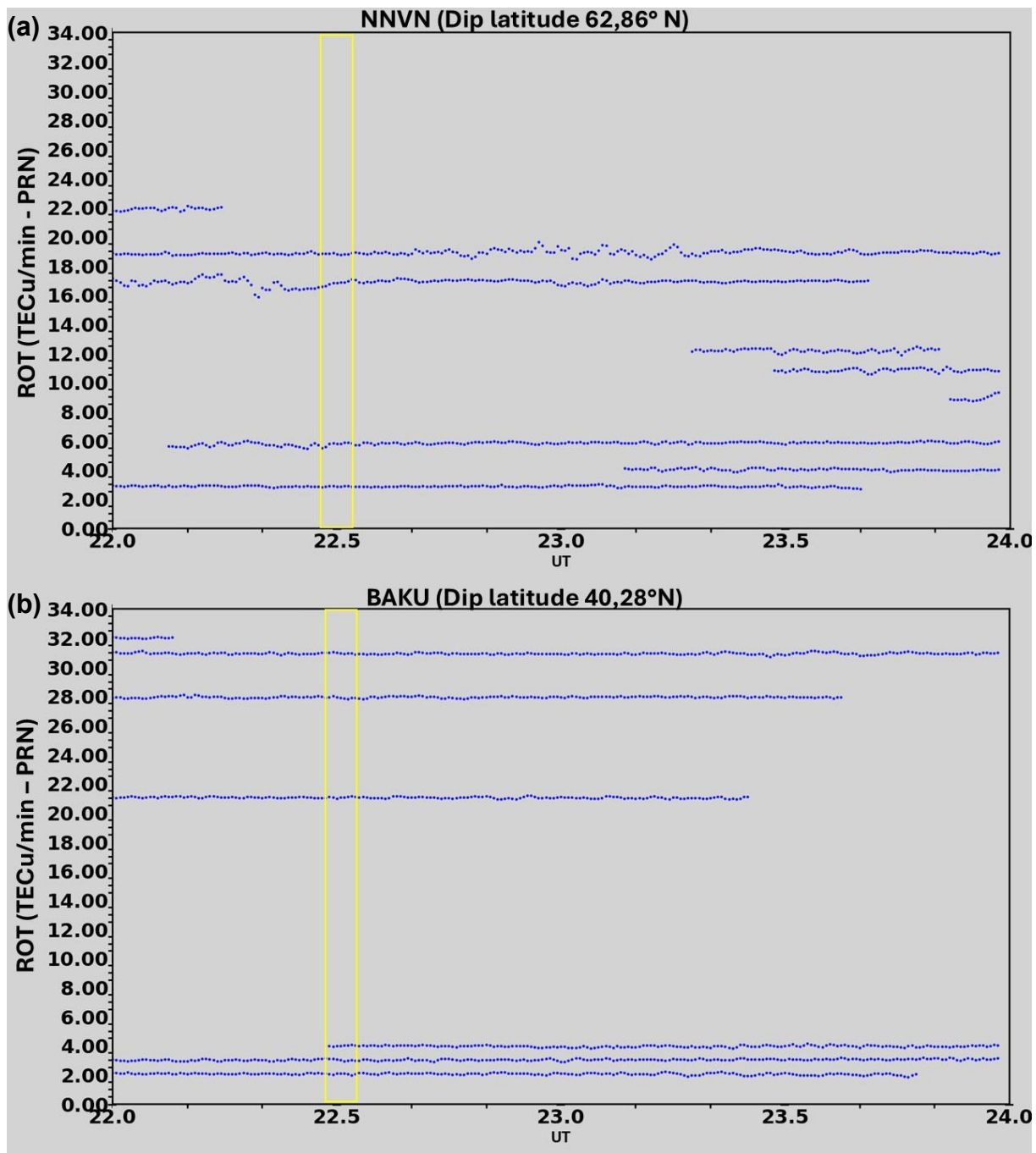
Figura 48 - Distribuição global da taxa de variação do ROT, com resolução temporal de 1 minuto, no dia 22 de fevereiro, durante o intervalo do *flare*. As cores indicam a intensidade das flutuações temporais do TEC em TECU/min, sendo valores elevados (cores quentes) associados a variações rápidas da densidade eletrônica e à presença de distúrbios ionosféricos induzidos pela radiação solar.



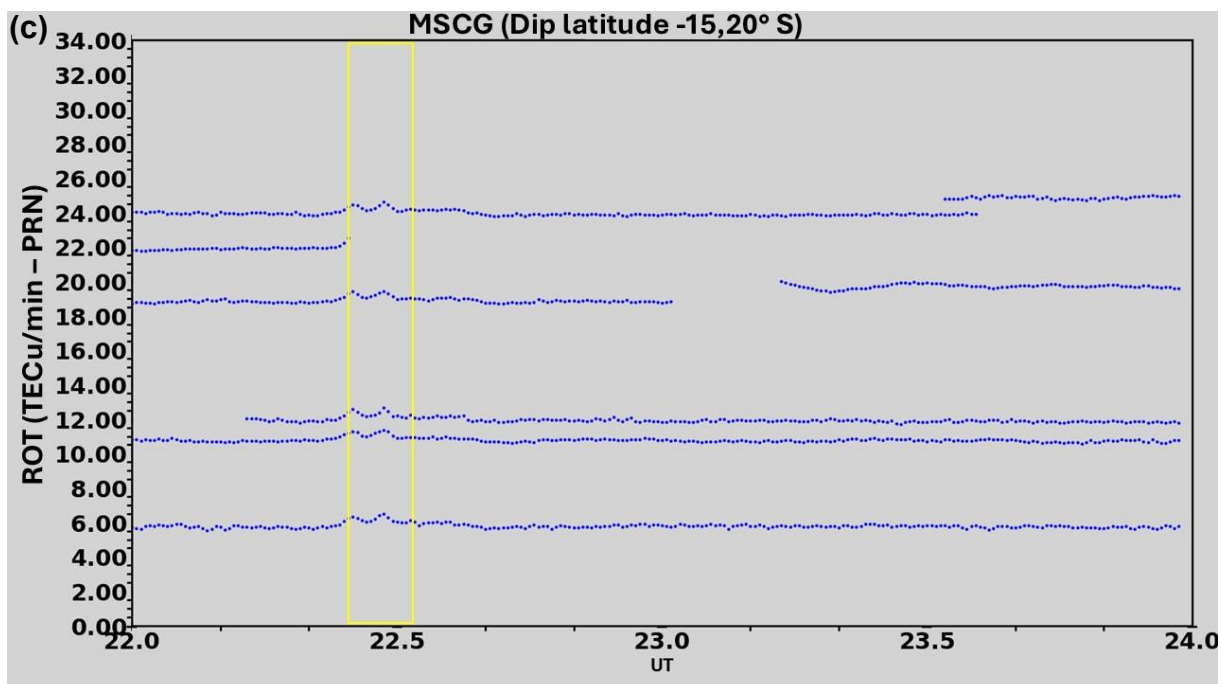
Fonte: A autora

Nos gráficos de ROT nas estações não iluminadas, as flutuações foram mais fracas ou praticamente ausentes (Figura 49), caracterizando um regime de maior estabilidade ionosférica. Na Figura 49c, é possível notar os picos que podem ser associados ao *flare*, pois essa estação estava na transição de iluminação. Eventuais variações observadas podem estar associadas a processos eletrodinâmicos de acoplamento global ou à propagação de perturbações a partir de regiões iluminadas, mas não apresentam a mesma coerência temporal e intensidade observadas nas estações sob iluminação direta.

Figura 49 – Variação do VTEC para as estações GNSS (a) NNVN, (b)BAKU e (c)MSCG no dia 22 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



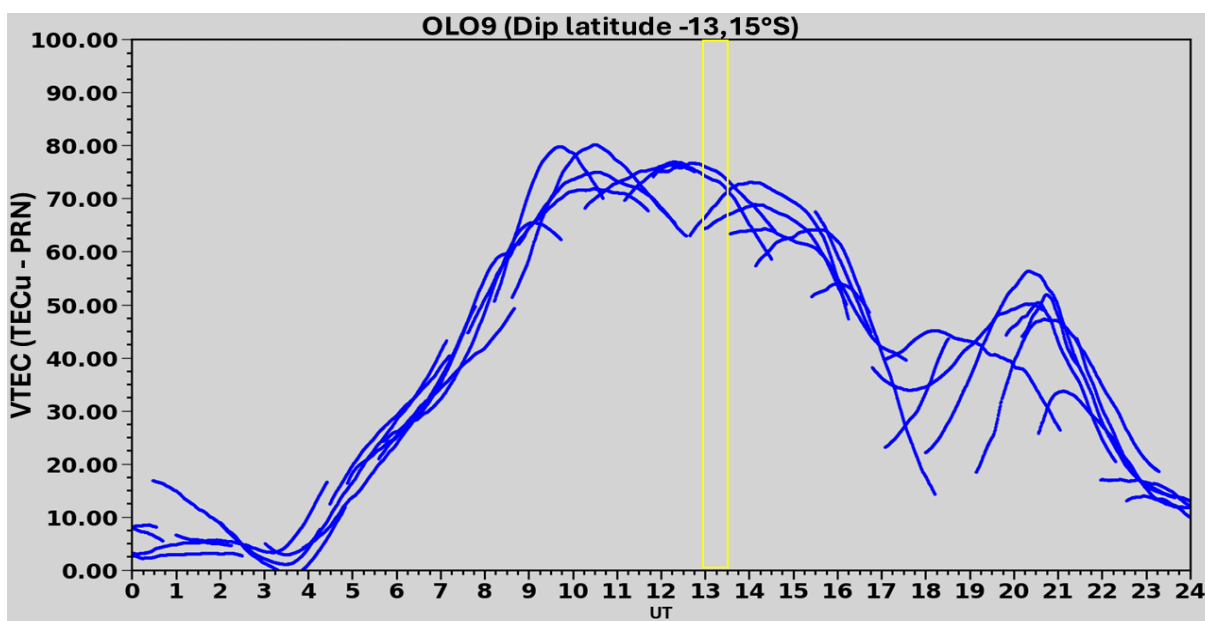
Fonte: A autora



5.4.2 SOLAR FLARE X.6.37 EM 09 DE FEVEREIRO 2024

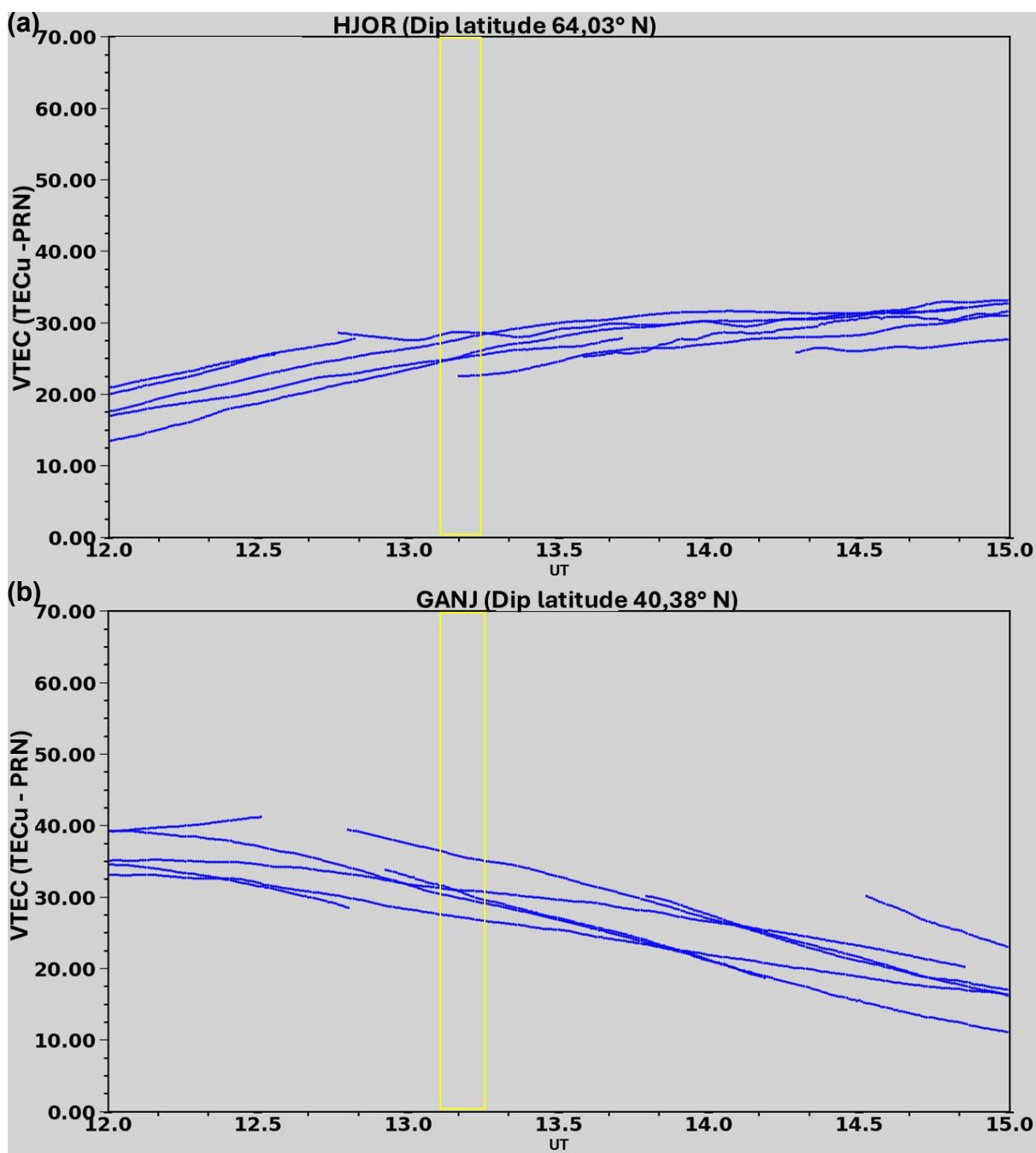
Assim como no dia 22, a análise do evento de 9 de fevereiro foi realizada a partir de janelas de 24 horas de dados, conforme Figura 50, com o objetivo de caracterizar o comportamento de fundo da ionosfera antes, durante e após a ocorrência do *flare*.

Figura 50 - Variação do VTEC ao longo de 24 horas no dia 09 de fevereiro para a estação OLO9 na África. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



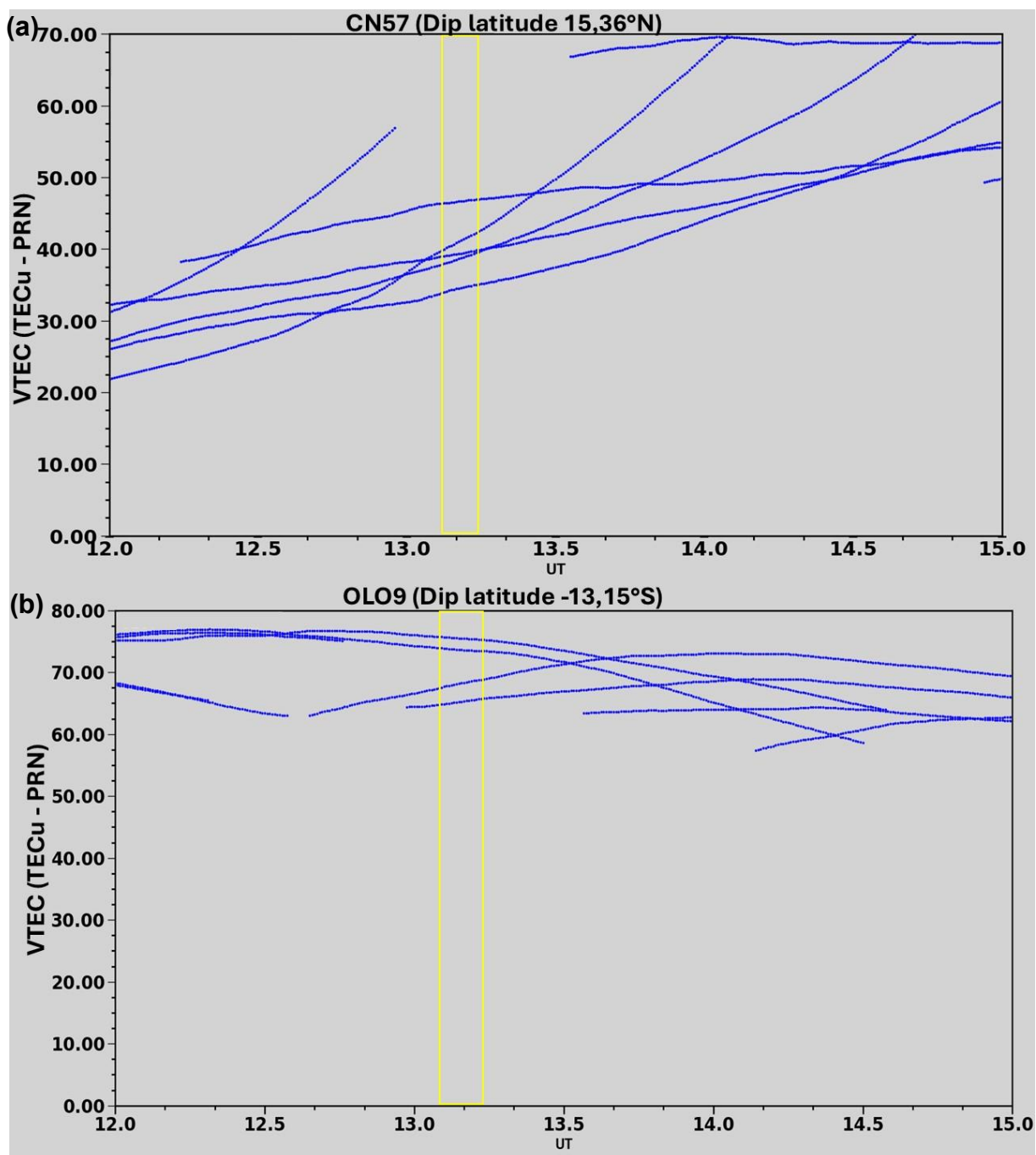
Para uma investigação mais detalhada, a análise do VTEC também foi centralizada nas horas próximas à ocorrência do *flare*, entre aproximadamente 12 e 15 UT, conforme apresentado nas Figuras 51 a 53. As séries temporais de VTEC indicaram a ausência de uma assinatura clara associada ao *flare*, como observado no evento de 22 de fevereiro.

Figura 51 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)HJOR e (b) GANJ no dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



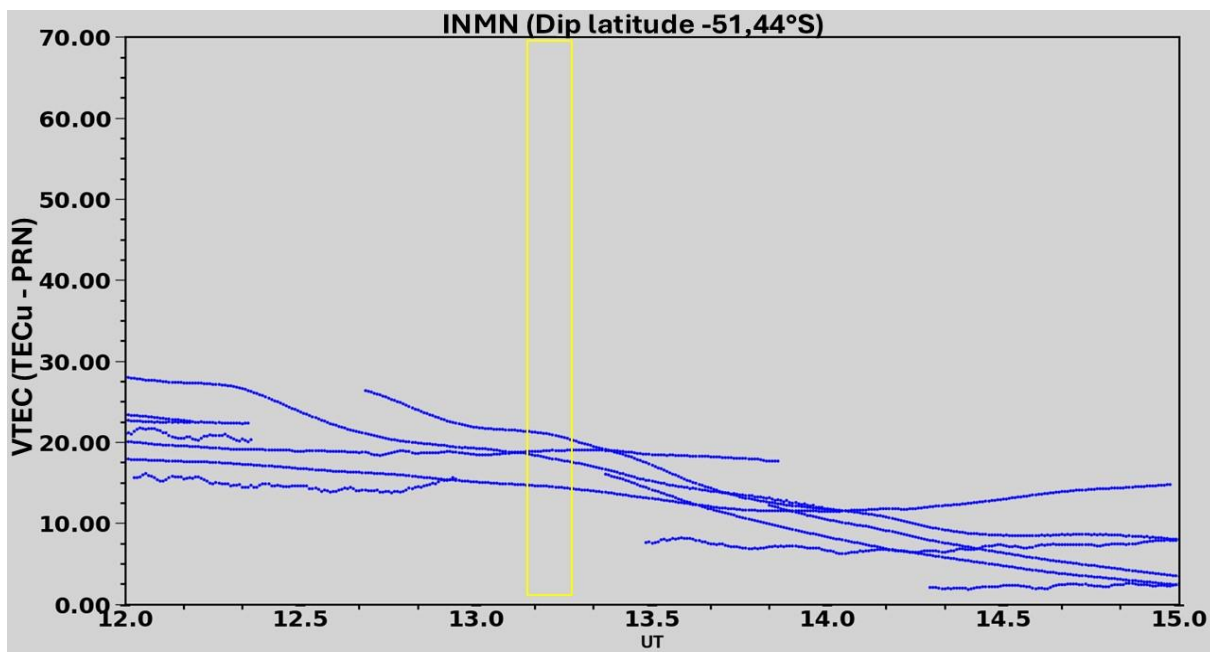
Fonte: A autora

Figura 52 - Variação do VTEC para as estações GNSS (a)CN57 e (b)OLO9 no dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* Estudado.



Fonte: A autora

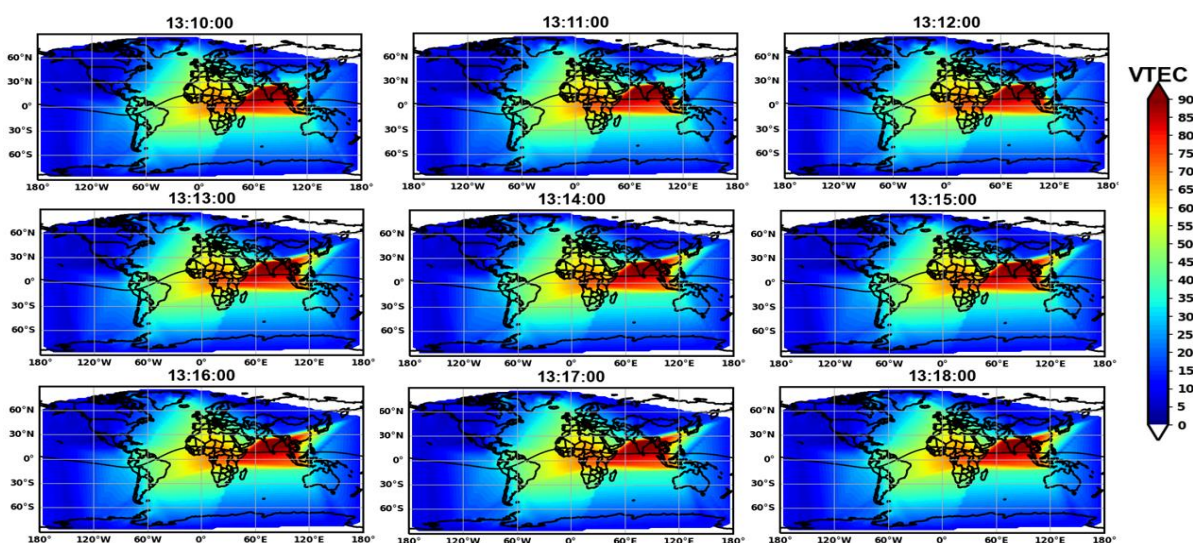
Figura 53 - Variação do VTEC para a estação GNSS INMN para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

A Figura 54 apresenta mapas das variações espaço-temporais do VTEC, de polo a polo do globo, da distribuição latitudinal e longitudinal, com resolução temporal de 1 minuto, no intervalo de 9 minutos, das 13:10 à 13:18 UT. Observa-se que os maiores valores de VTEC concentram-se na região da Ásia. No entanto, conforme já discutido mostram-se que as variações espaciais do VTEC não são suficientes para a identificação da assinatura do *flare*.

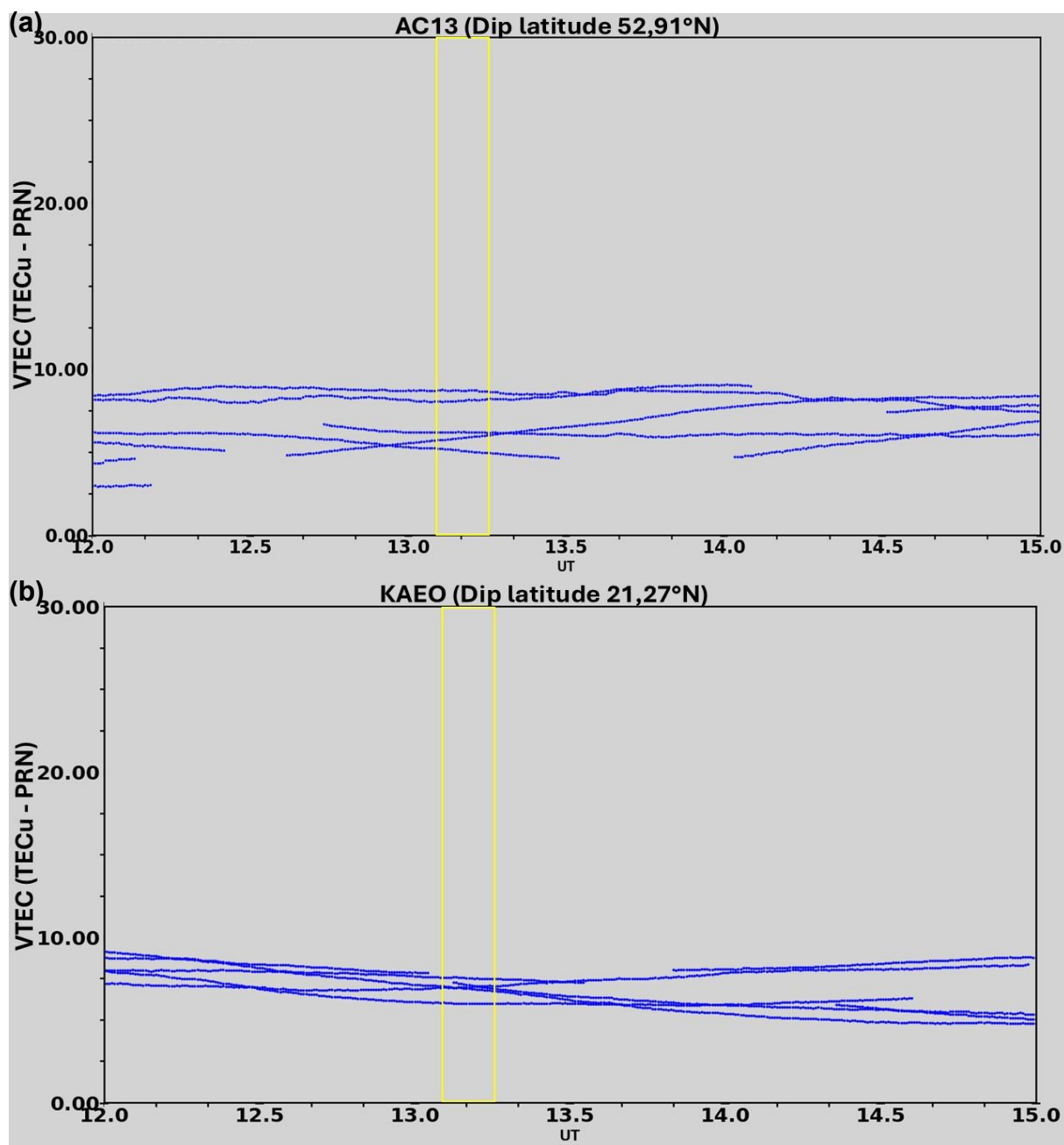
Figura 54 - Variação VTEC em resolução temporal de 1 minuto no dia 09 de fevereiro de 2024, durante o intervalo associado ao SF. As cores representam a magnitude do VTEC



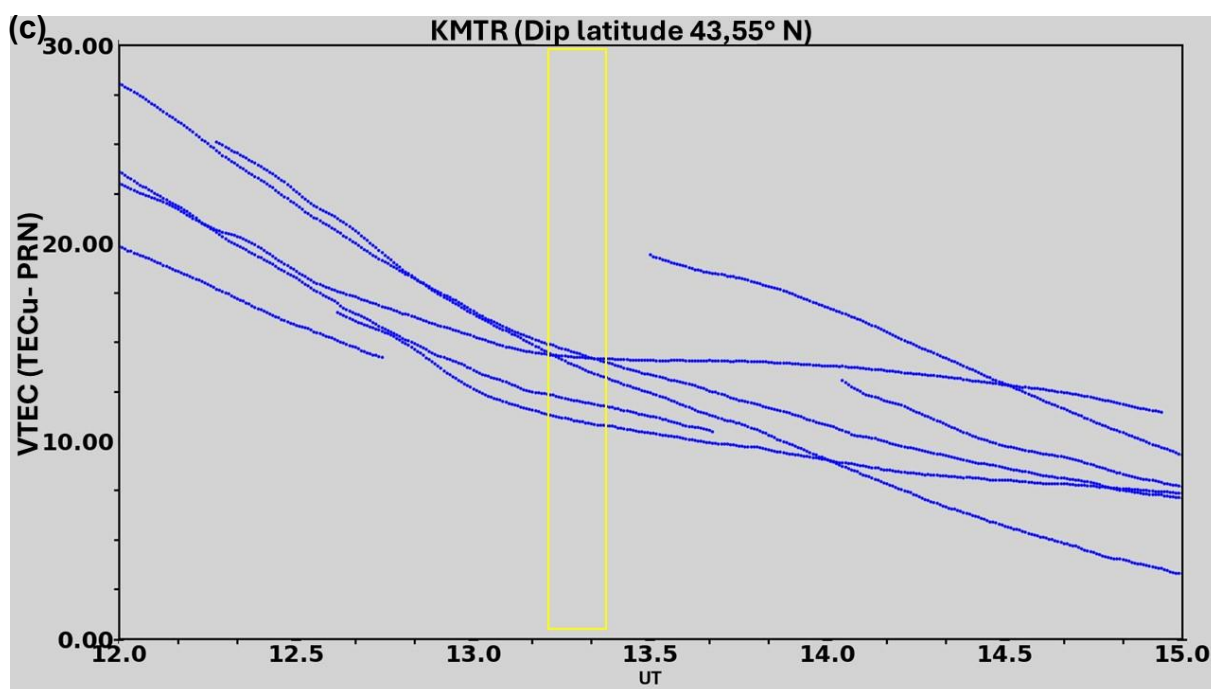
Fonte: A autora

Nas estações localizadas em regiões não iluminadas (Figura 55), o VTEC não apresentou alterações significativas associadas ao horário do *flare*.

Figura 55 - Variação do VTEC para as estações GNSS, (a) AC13, (b) KAEO e (c) KMTR para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

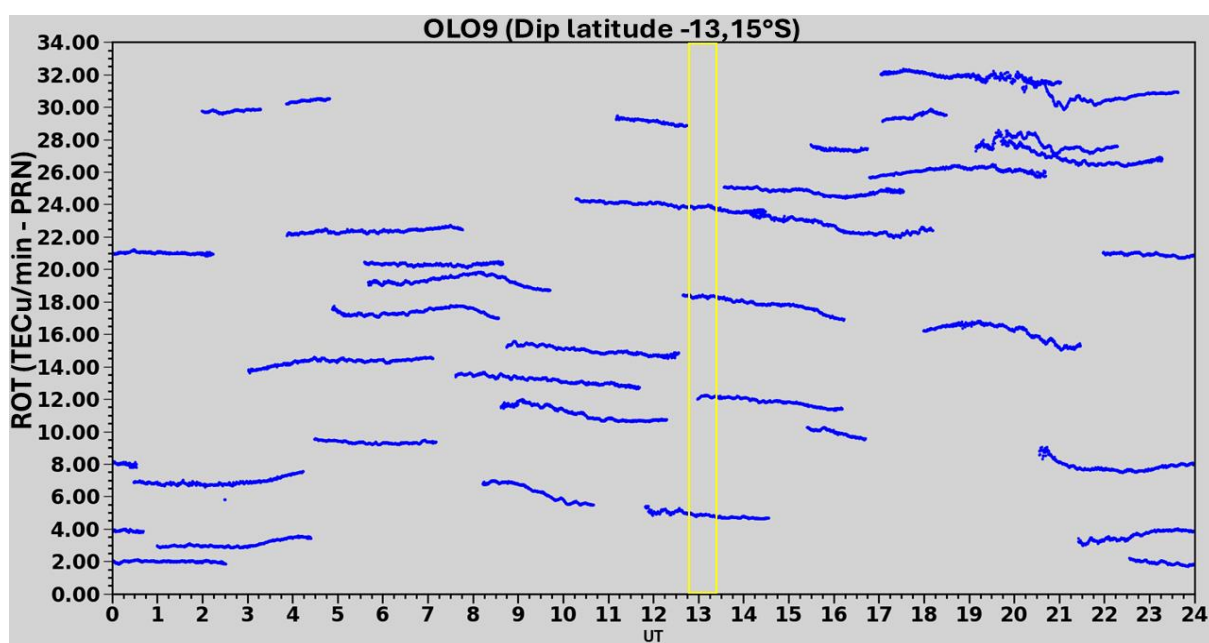


Fonte: A autora

Diante das limitações observadas na análise do VTEC, o mesmo adotado para o evento de 22 de fevereiro foi aplicado ao *flare* ocorrido em 9 de fevereiro.

Conforme exemplificado na Figura 56, as assinaturas do ROT associadas ao evento do dia 9 mostram-se menos intensas e menos bem definidas quando comparadas às observadas no evento de 22 de fevereiro.

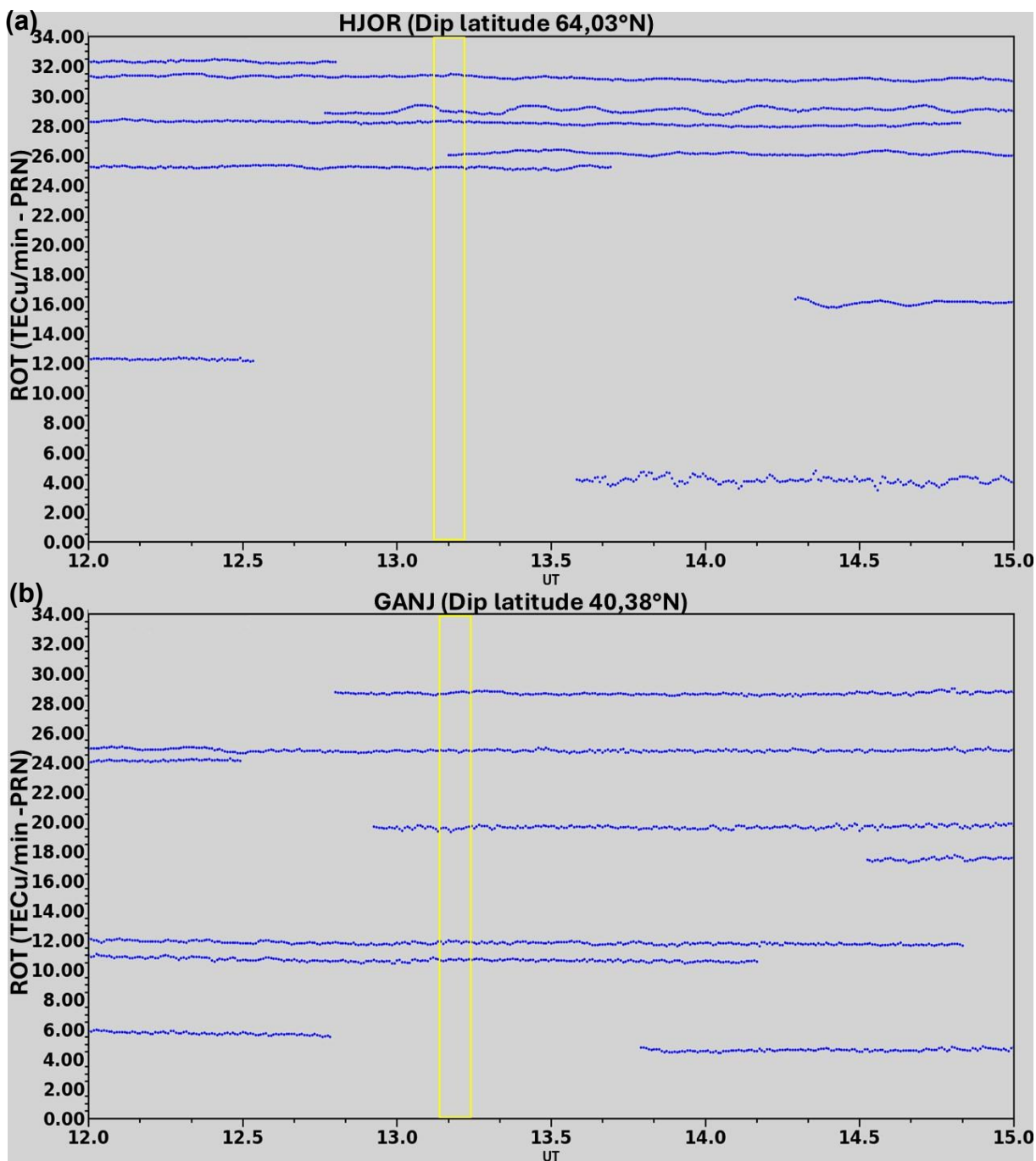
Figura 56 - Variação do ROT ao longo de 24 horas no dia 09 de fevereiro para a estação OLO9. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

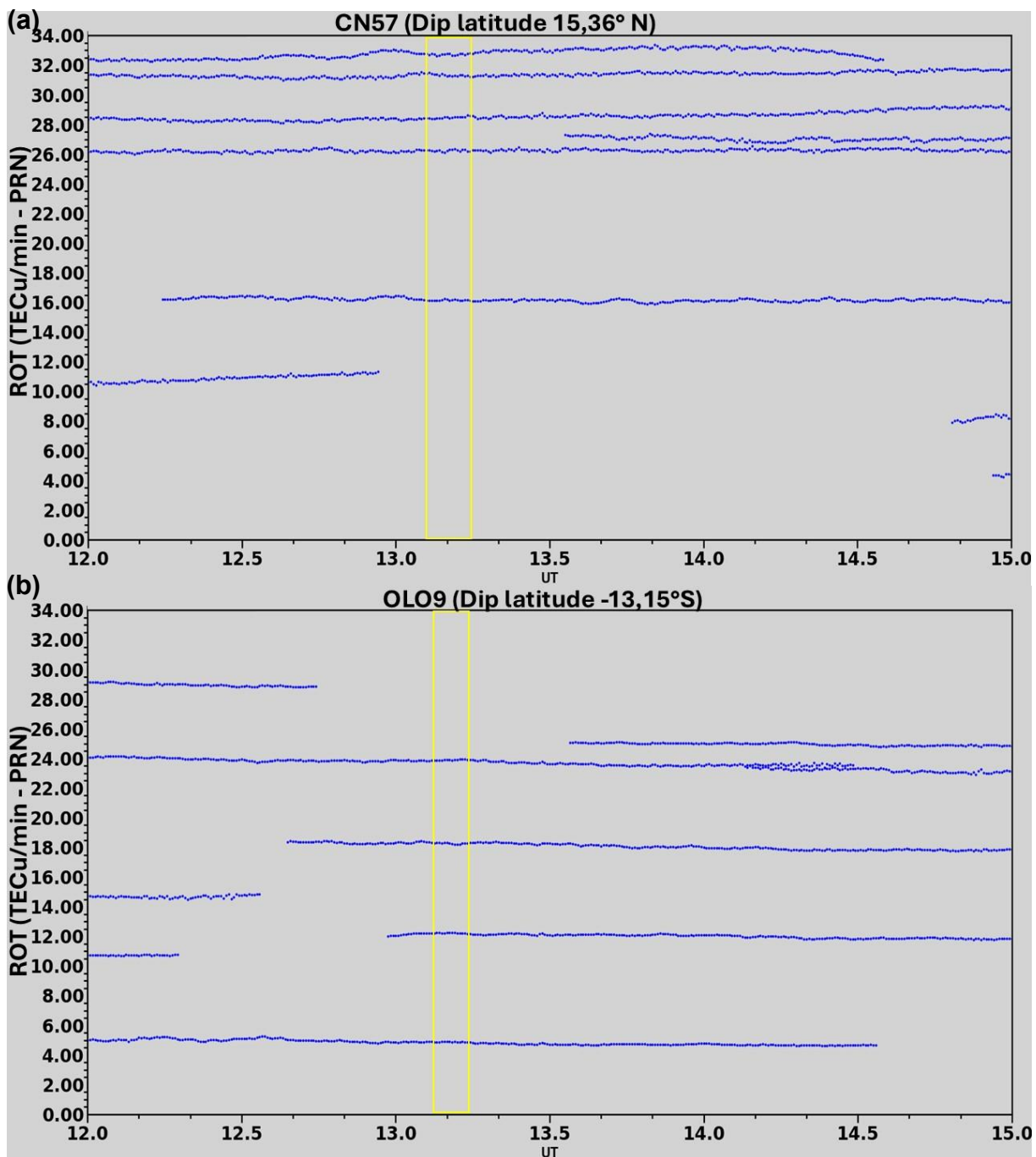
Os gráficos de ROT das estações localizadas na região iluminada (Figuras 57 a 59), com foco no horário do *flare*, mostram flutuações menos intensas e menos bem definidas, o que pode ser atribuído à menor intensidade do evento e, conseqüentemente, a uma resposta ionosférica mais fraca.

Figura 57 - Variação do ROT para as estações (a)HJOR e (b)GANJ. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



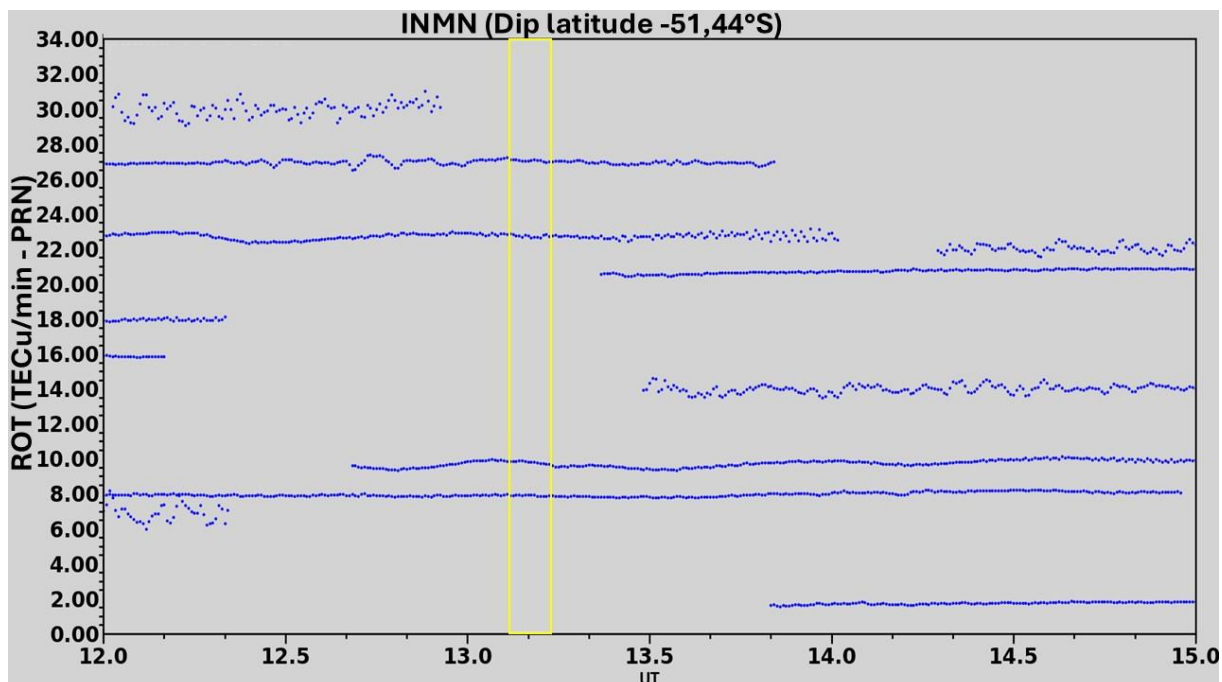
Fonte: A autora

Figura 58 - Variação do ROT para as estações (a)CN57 e (b)OLO9. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

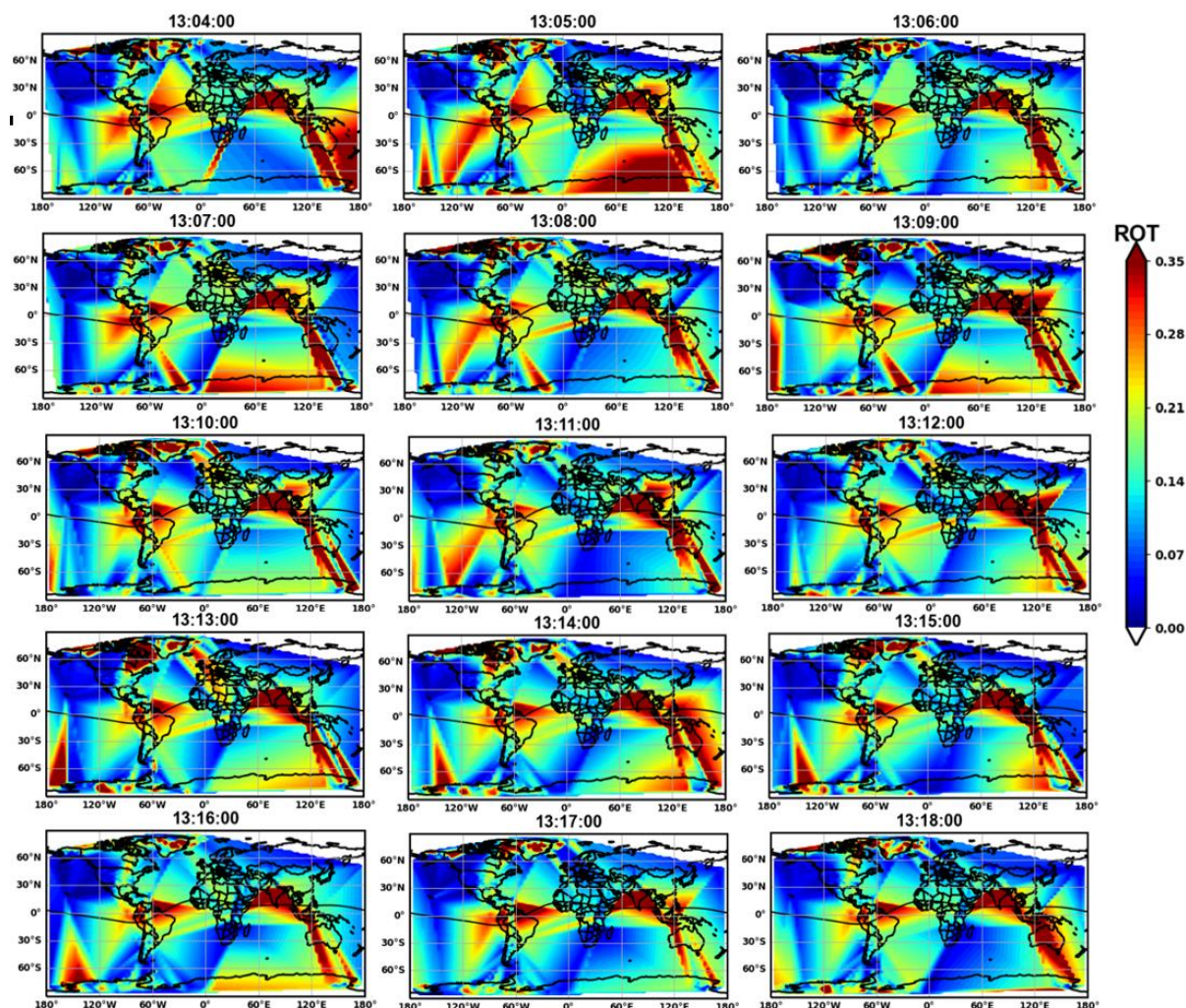
Figura 59 - Variação do ROT para a estação INMN. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare* estudado.



Fonte: A autora

A Figura 60 apresenta mapas das variações espaço-temporais do ROT, de polo a polo do globo, da distribuição latitudinal e longitudinal, com resolução temporal de 1 minuto, no intervalo de 9 minutos, das 13:10 à 13:18 UT. Observa-se que os maiores valores de ROT concentram-se no setor iluminado, particularmente sobre a América Central e Oceania, indicando uma resposta ionosférica localizada e menos intensa, compatível com a menor magnitude do *flare*.

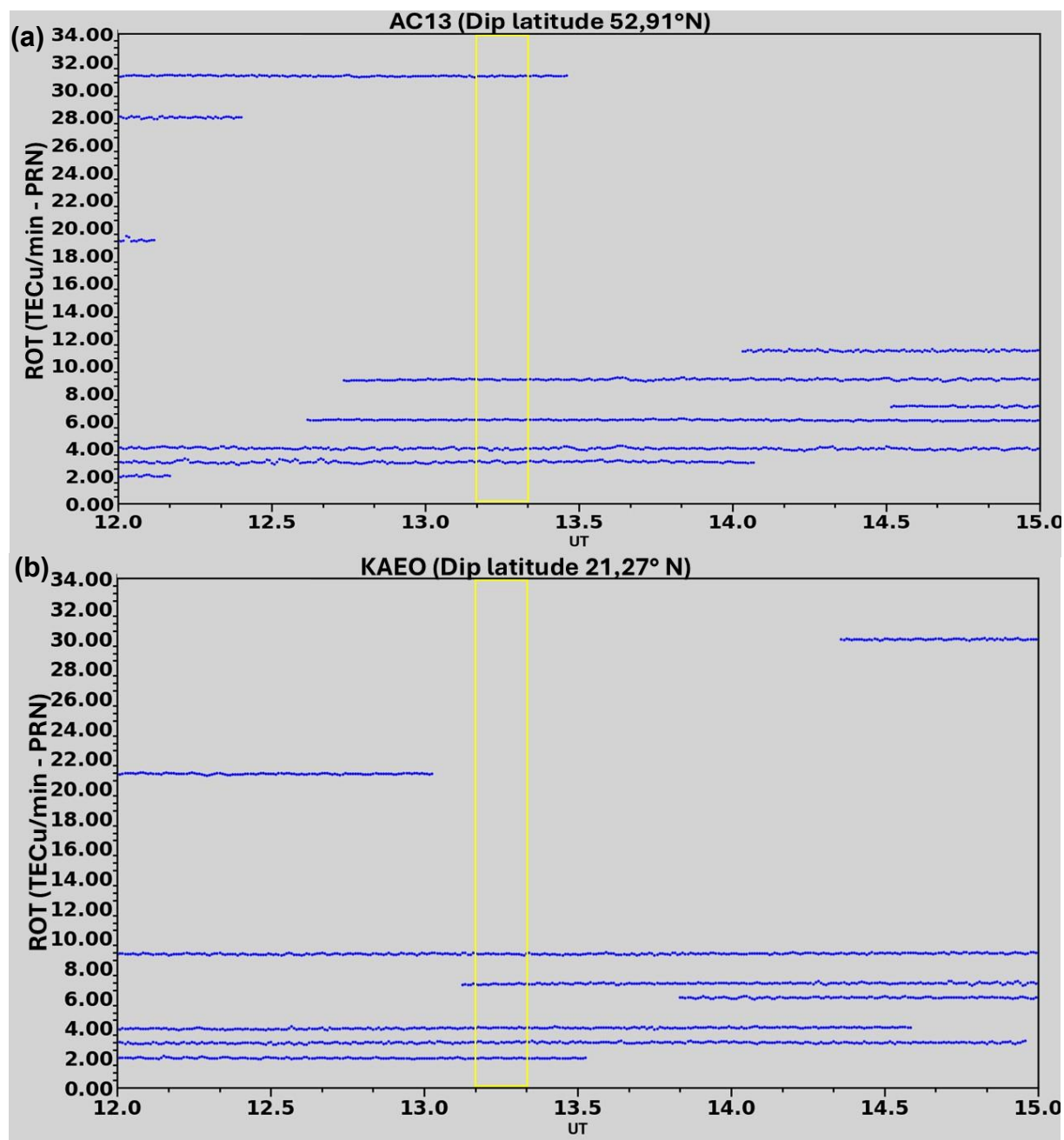
Figura 60 - Distribuição global da taxa de variação do ROT, com resolução temporal de 1 minuto, no dia 09 de fevereiro, durante o intervalo do *flare*. As cores indicam a intensidade das flutuações temporais do TEC em TECU/min, sendo valores elevados (cores quentes) associados a variações rápidas da densidade eletrônica e à presença de distúrbios ionosféricos induzidos pela radiação solar.



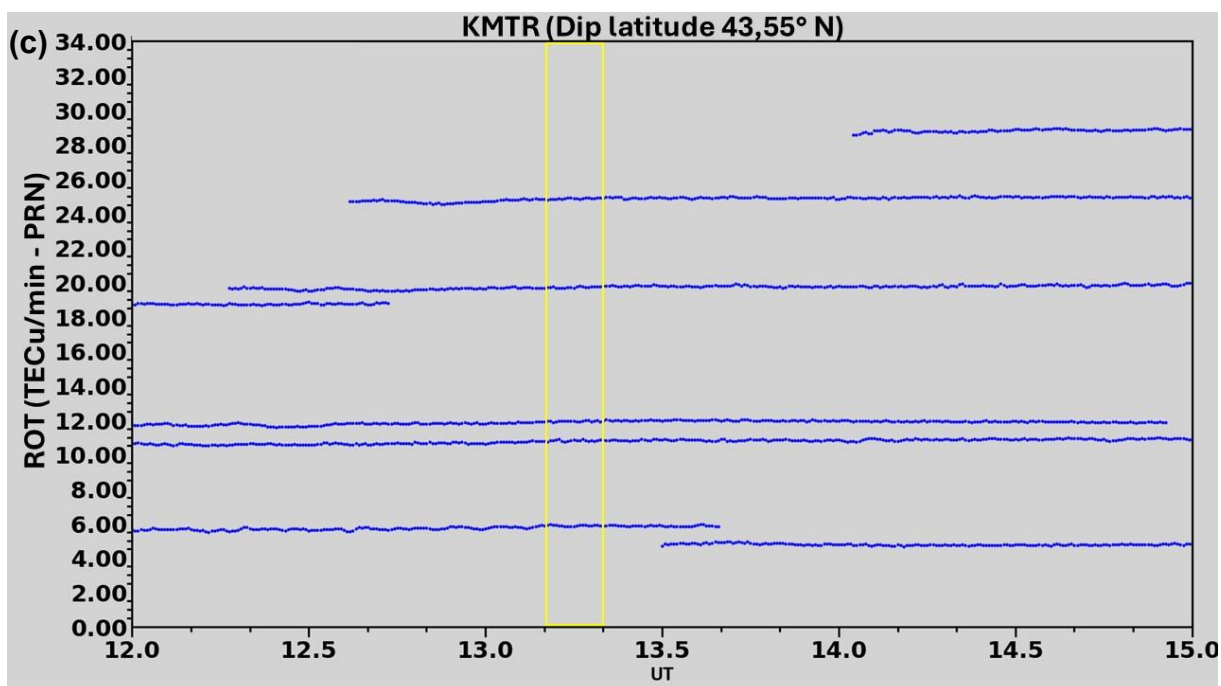
Fonte: A autora

Nas regiões não iluminadas, as flutuações do ROT mantiveram-se constantes ao longo do intervalo analisado, conforme ilustrado na Figura 61. Esse comportamento sugere que a ionosfera estava estável, já que a ausência de radiação solar reduz a ocorrência de variações rápidas na densidade eletrônica.

Figura 61 - Variação do ROT para as estações GNSS, (a)AC13, (b) KAE0 e (c) KMTR para o dia 09 de fevereiro. O retângulo amarelo corresponde ao horário próximo ao *flare*.



Fonte: A autora



6 CONCLUSÃO

Foi realizada uma revisão e análise dos efeitos de SF sobre o campo geomagnético e a ionosfera, com ênfase nas respostas das componentes ΔH e ΔZ do campo magnético terrestre durante eventos ocorridos em fevereiro de 2024. De forma geral, observou-se que essas componentes responderam de maneira sincronizada às erupções solares analisadas, apresentando pequenos atrasos temporais em relação ao máximo da radiação em RX quando comparados à radiação EUV. Essas defasagens, da ordem de poucos minutos, sugerem um forte acoplamento entre a ionização súbita da ionosfera, induzida pela radiação solar de alta energia, e as correntes ionosféricas responsáveis pelas variações geomagnéticas observadas à superfície.

A resposta dos distúrbios ionosféricos induzidos por erupções solares, na ionosfera ainda não é plenamente compreendida em sua totalidade. Essa resposta resulta da interação de diversos fatores, como a intensidade do *flare*, a condição local do ambiente ionosférico, a estação do ano e o nível de atividade solar. Conseqüentemente, cada evento apresenta características próprias, reforçando a necessidade de análises individualizadas para aprofundar o conhecimento sobre esses fenômenos.

Foram identificados padrões distintos nas respostas geomagnéticas de acordo com a localização geográfica das estações analisadas. Em latitudes altas, as respostas mostraram-se mais ruidosas e menos bem definidas, possivelmente devido à influência adicional de correntes aurorais, maior variabilidade eletrodinâmica e à geometria do campo magnético nessas regiões. Em contraste, estações localizadas em baixas latitudes e na região equatorial apresentaram respostas mais organizadas e coerentes, com a presença clara do padrão característico de SFE, associado à intensificação súbita do sistema de correntes Sq.

A análise dos dados GNSS mostrou que o VTEC, embora útil para caracterizar o comportamento ionosférico, não se mostrou um parâmetro confiável para a detecção direta de perturbações ionosféricas impulsivas associadas aos *flares* analisados. Em contrapartida, o ROT demonstrou elevadas flutuações rápidas da densidade eletrônica, permitindo identificar com maior clareza a resposta ionosférica durante a fase impulsiva dos eventos de maior intensidade.

Observou-se ainda que o campo geomagnético não apresentou variações significativas durante os eventos de classe M, que foram analisados previamente, indicando que *flares* de intensidade moderada não foram suficientes para gerar perturbações detectáveis acima do nível de ruído instrumental nas componentes geomagnéticas estudadas. Esse resultado reforça a ideia de que *flares* de maior intensidade, de classe X, são os principais responsáveis por induzir perturbações geomagnéticas mensuráveis em escala global, por meio do aumento abrupto da ionização ionosférica.

As diferentes respostas observadas ao longo das diversas regiões latitudinais destacam a importância de uma rede global, contínua e bem distribuída de observações geomagnéticas. A integração de dados de magnetômetros e GNSS mostrou-se essencial não apenas para a caracterização científica dos efeitos dos solar *flares*, mas também para o monitoramento e a mitigação de impactos sobre sistemas tecnológicos sensíveis, como comunicações por rádio e sistemas de navegação por satélite.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, pretende-se ampliar a análise para um conjunto maior de eventos, associados tanto as CMEs, quanto a SF ao longo do Ciclo Solar 25, cujo máximo está sendo previsto entre os anos de 2024, 2025 e 2026. Nesse período, espera-se a ocorrência de um número significativo de *flares* da classe X, o que possibilitará uma comparação mais abrangente e estatística da resposta ionosférica sobre diferentes condições de atividade solar e geomagnética.

Além dos SIDs, eventos como os distúrbios ionosféricos propagante de grande escala (TIDs), os distúrbios ionosféricos em média escala (MSTIDs), também são associados a tempestades geomagnéticas e solar *flares*, e exercem influência significativa na variabilidade ionosférica. Nesse contexto, serão investigadas perturbações ionosféricas positivas e negativas, a anomalia de ionização equatorial (EIA), bem como TIDs, MSTIDs e SIDs durante períodos geomagneticamente perturbados, com o objetivo de aplicar e aprimorar as técnicas de análise de dados desenvolvidas ao longo do mestrado.

Além das ferramentas já utilizados neste trabalho, propõe-se a incorporação de dados de ionossondas como instrumento complementar. Essa integração permitirá investigar de forma mais abrangente e detalhada a resposta ionosférica a esses eventos extremos, permitirá investigar parâmetros fundamentais, como a frequência crítica da camada F2 (f_oF2) e a estrutura vertical da ionosfera, contribuindo para uma interpretação mais completa dos efeitos por *flares* e CMEs.

REFERÊNCIAS

- ABDU, M. A. *et al.* Equatorial electrojet responses to intense solar flares under geomagnetic disturbance time electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, p. 3570–3585, 2017. DOI: 10.1002/2016JA023667.
- ARCANJO, M. O.; PILLAT, V. G. Desenvolvimento de programa para auxiliar na análise do conteúdo eletrônico total (TEC) sobre o território brasileiro. In: **ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVAP (INIC)**, XXII, 2019, São José dos Campos. Anais. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2018/anais/arquivos/RE_0052_0494_01.pdf. Acesso em: dez. 2025.
- BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy – Part B**. United Kingdom: Academic Press, 1973.
- BRANCO, P. de M. **A Terra em números**. 2016. Ministério de Minas e Energia – Governo Brasileiro. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/web/guest/a-terra-em-numeros>. Acesso em: dez. 2025.
- CAMPBELL, W. H. **Introduction to geomagnetic fields**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- CHAKRABORTY, M. *et al.* Solar flares and geomagnetic storms of September 2017: their impacts on the TEC over 75°E longitude sector. **Advances in Space Research**, v. 68, p. 1825–1835, 2021. DOI: 10.1016/j.asr.2021.04.012.
- CHENG, N. *et al.* Investigation of solar flares impact on GPS/BDS/GALILEO broadcast ionospheric models. **Radio Science**, v. 54, p. 91–103, 2019. DOI: 10.1029/2018RS006591.
- DE PAULA, E. R. *et al.* Solar flare and radio burst effects on GNSS signals and the ionosphere during September 2017. **Radio Science**, v. 57, 2022. DOI: 10.1029/2021RS007418.
- DENARDINI, C. M. *et al.* The Embrace magnetometer network for South America: first scientific results. **Radio Science**, v. 53, 2018. DOI: 10.1002/2018RS006540.
- EASTWOOD, J. P. *et al.* The economic impact of space weather: where do we stand? **Risk Analysis**, v. 37, n. 2, p. 206–218, 2017. DOI: 10.1111/risa.12765.
- EMBRACE. **Glossário de termos científicos**. Disponível em: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/glossario/>. Acesso em: jul. 2025.
- EMBRACE. **Variação de H**. 2024. Disponível em: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/variacao-de-h/>. Acesso em: jul. 2025.

FAGUNDES, P. R. **Física espacial**. São José dos Campos: UNIVAP, 2024. Material de aula (slides).

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric disturbances in a large area of the terrestrial globe by two strong solar flares of September 6, 2017. **Advances in Space Research**, v. 66, n. 7, 2020. DOI: 10.1016/j.asr.2020.06.032.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Ionospheric storm due to solar coronal mass ejection in September 2017 over the Brazilian and African longitudes. **Advances in Space Research**, v. 71, n. 1, 2023. DOI: 10.1016/j.asr.2022.07.040.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Pole-to-pole ionospheric disturbances due to solar flares during low solar activity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 129, n. 7, 2024. DOI: 10.1029/2024JA032597.

FAGUNDES, P. R. *et al.* Solar flares and the intricate response of Earth's outer geomagnetic field variation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 129, n. 9, 2024. DOI: 10.1029/2024JA032903.

FORBES, J. M. The equatorial electrojet. **Reviews of Geophysics**, v. 19, n. 3, p. 469–504, 1981. DOI: 10.1029/RG019i003p00469.

GPS.GOV. **Systems**. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems>.

GONZALEZ, W. D. *et al.* What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, 1994. DOI: 10.1029/93JA02867.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

HOFMANN-WELLENHOF *et al.* **GPS: theory and practice**. 5. ed. Wien: Springer-Verlag, 2001.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2009.

LUO, Y. *et al.* The geomagnetic response to the X-class solar flares of September 2017. **Advances in Space Research**, v. 72, n. 11, p. 4911–4922, 2023. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.043.

MITRA, A. P. **Ionospheric effects of solar flares**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1974.

NASA. **Solar science**. 2016. Disponível em: <https://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/solar-science/>. Acesso em: dez. 2025.

NOGUEIRA, P. A. B. *et al.* Modeling the equatorial and low-latitude ionospheric response to an intense X-class solar flare. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, p. 3021–3032, 2015. DOI: 10.1002/2014JA020823.

OLIVEIRA FILHO, K. de S.; SARAIVA, M. de F. O. **Astronomia e astrofísica**. 4. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

RAO, S. S. *et al.* Observations of geomagnetic crochet at high latitudes due to X1.5 class solar flare on 3 July 2021. **Space Weather**, v. 22, 2024. DOI: 10.1029/2023SW0037.

SANTARINE, G. A.; DOMINGOS, R. N. Tempestades geomagnéticas e o evento Carrington. **Holos Environment**, v. 14, n. 1, p. 103–113, 2014. DOI: 10.14295/holos.v14i1.8080.

SEEMALA, G. K.; ALLADARESC. E.V. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008, **Radio Science**, v. 46, RS5019, 2011. Doi:10.1029/2011RS004722.

SILVA, A. V. R. **Nossa estrela: o Sol**. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

SILWAL, A. *et al.* Global positioning system observations of ionospheric total electron content variations during solar eclipses. **Radio Science**, v. 56, 2021. DOI: 10.1029/2020RS007215.

SOLARCYCLESCIENCE. **Discover the solar cycle!** Disponível em: <http://solarcyclescience.com/solarcycle.html>. Acesso em: jul. 2024.

SPACEWEATHERLIVE. **Top 50 solar flares of the year 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/top-50-solar-flares/year/2024.html>. Acesso em: mar. 2024.

SpaceWeatlive. **What are solar flares?** 2020. Disponível em: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/what-are-solar-flares.html#:~:text=X%2Dclass%20solar%20flares%20are,Earth%20during%20the%20solar%20flare>. Acesso em: ago. 2024

TAVARES, M. Aprendendo sobre o Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 1, 2000. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_78.pdf. Acesso em: dez. 2024.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment**. Malabar: Orbit Book Company, 2005.

TSURUTANI, B. T. *et al.* **Reply to L. J. Lanzerotti: solar wind ram pressure corrections and estimation of viscous interaction efficiency**. 1992. Disponível

em: <http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.29.02.19.46/doc/5841.pdf>. Acesso em: jul. 2025.

VASCONCELOS, Y. Os impactos ambientais da computação. **Revista Pesquisa FAPESP**, ed. 349, mar. 2025. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/os-impactos-ambientais-da-computacao/>.

YASYUKEVICH, Y. *et al.* The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation. **Space Weather**, v. 16, p. 1013–1027, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001932.

APÊNDICE A: DADOS DAS ESTAÇÕES DE MAGNETÔMETRO

ACRÔNIMO	ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE	DIP LATITUDE 2024 (+ N)	FONTE
API	Apia, Samoa Ocidental	188,219	-13,816	-16,21	INTERMAGNET
ARA	Araguatins	-48,0735	-5,6513	-6,19	EMBRACE
ASP	Alice Springs, Austrália	133,883	-23,762	-35,92	INTERMAGNET
BSL	Centro Espacial Stennis, EUA	270,36	30,35	39,79	INTERMAGNET
BRW	Barrow, Usa	203,38	71,32	59,91	INTERMAGNET
CBB	Cambridge Bay, Canadá	254,969	69,123	78,56	INTERMAGNET
CMO	College, EUA	212,14	64,87	65,13	INTERMAGNET
CNB	Canberra, Austrália	149,36	-35,32	-48,18	INTERMAGNET
CSY	Casey, Austrália	110,533	-66,283	-75,48	INTERMAGNET
CTA	Charters Towers, Austrália	146,264	-20,09	-30,50	INTERMAGNET
DUR	Duronia, Itália	14,47	41,65	38,34	INTERMAGNET
ESK	Eskdalemuir, Reino Unido	356,794	55,314	52,57	INTERMAGNET
FRD	Fredericksburg, EUA	282,633	38,21	46,24	INTERMAGNET
FUR	Furstenfeldenbruck, Alemanha	11,28	48,17	45,58	INTERMAGNET
GDH	Qeqertarsuaq (Godhavn), Greenland	306,467	69,252	72,18	INTERMAGNET
GNG	Gingin, Austrália	115,715	-31,356	-47,17	INTERMAGNET
GUA	Guam, EUA	144,87	13,59	6,06	INTERMAGNET
HBK	Hartebeesthoek, África do Sul	27,71	-25,88	-41,03	INTERMAGNET
HER	Hermanus, África do Sul	19,23	-34,43	-45,07	INTERMAGNET
HUA	Huancayo, Peru	284,67	-12,05	-1	INTERMAGNET
HON	Honolulu, Usa	202	21,32	21,26	INTERMAGNET
IPM	Isal De Pascua, Chile	250,58	-27,171	-19,6	INTERMAGNET
JCO	Observatório Jim Carrigan, Alaska	211,201	70,356	71,59	INTERMAGNET

KAK	Kakioka, Japão	140,186	36,232	30,89	INTERMAGNET
KDU	Kakadu, Austrália	132,47	-12,69	-22,7	INTERMAGNET
KMH	Keetsmanshoop, Namíbia	18,11	-26,54	-44,16	INTERMAGNET
KNY	Kanoya, Japão	130,88	31,42	26,85	INTERMAGNET
KOU	Kourou, Guiana Francesa	307,27	5,21	6,37	INTERMAGNET
MAW	Mawson, Antártica	62,88	-67,6	-53,19	INTERMAGNET
MMB	Memambetsu, Japão	144,19	43,91	38,95	INTERMAGNET
NAQ	Narsarsuaq, Groenlândia	314,567	61,167	62,47	INTERMAGNET
NGK	Niemegk, Alemanha	12,68	52,07	49,99	INTERMAGNET
OTT	Ottawa, Canadá	284,448	45,403	53,35	INTERMAGNET
PAG	Panagjurishte, Bulgária	24,177	42,515	40,32	INTERMAGNET
PET	Paratunka, Rússia	158,248	52,971	47,48	INTERMAGNET
PPT	Pamatai, Taiti, França	210,426	-17,567	-16,55	INTERMAGNET
PVE	Porto Velho	-63,94	-8,835	-0,99	EMBRACE
SBA	Scott Base, Antártica	166,671	-77,829	-71,65	INTERMAGNET
SBL	Sable Island, Canadá	299,99	43,932	47,17	INTERMAGNET
SIT	Sitka, EUA	224,67	57,06	59,07	INTERMAGNET
SPT	San Pablo-Toledo, Espanha	355,65	39,55	34,32	INTERMAGNET
STT	São Teotónio, Portugal	351,272	37,547	31,71	INTERMAGNET
SUA	Surlari, Romênia	26,25	44,68	43,02	INTERMAGNET
TAM	Tamanrasset, Argélia	5,53	22,79	14,4	INTERMAGNET
TSU	Tsumeb, África do Sul	17,584	-19,202	-38,59	INTERMAGNET
TTB	Tatuoca, Brasil	311,487	-1,205	-1,84	INTERMAGNET
TUC	Tucson, EUA	249,27	32,17	39,39	INTERMAGNET
UPS	Uppsala, Suécia	17,353	59,903	58,36	INTERMAGNET
VIC	Victoria, Canadá	236,58	48,52	53,15	INTERMAGNET
VNA	Neumayer Station, Antártica	351,718	-70,683	-43,3	INTERMAGNET
VOS	Vostok, Antártica	106,835	-78,464	-66,03	INTERMAGNET
WNG	Wingst, Alemanha	9,053	53,725	51,49	INTERMAGNET
YKC	Yellowknife, Canadá	245,518	62,48	70,64	INTERMAGNET

APÊNDICE B: ESTAÇÕES COM FALHA DE DADOS NOS DIAS CALMOS

ACRÔNIMO	ESTAÇÃO	ΔH	ΔZ	OBSERVAÇÃO
ARA	Araguatins	19	19	-
BLC	Baker Lake, Canadá	-	02,03,07,15, 16,17,19,21	Dia 09 sem dados (ΔZ)
CHI	Chillan	Sem dados	Sem dados	-
CYG	Cheongyang, República da Coreia	21	21	-
EUS	Eusébio	19	19	-
FRD	Fredericksbu rg, EUA	02	02	-
FRN	Fresno, EUA	21,23	21,23	Sem dados no dia 22 (ΔH)
GUI	Guimar- Tenerife, Espanha	15,16,17,19, 21,23	15,16,17, 19,21,23	Sem dados no dia 22 (ΔZ)
LVV	Lviv, Ucrânia	23	23	-
MED	Medianeira	7,16,17,19, 21,23,29	7,16,17,19, 21,23,29	-
PST	Port Stanley, Ilhas Falkland	7,15,16,17, 19,21,23,29	Sem dados	-
RGA	Rio Grande	19	19	-
SJC	São Jose Dos Campos	02,03,21,23, 29	02,03,21, 23,29	Sem dados para o dia 22
SLZ	São Luís	29	29	-
SMS	São Martinho Da Serra	17,19	17,19	-
STM	Station Maglisn	02	02	-
TCM	Tucuman	15,17,19, 21,29	15,17,19, 21,29	-
THY	Tihany, Hungria	23	23	Sem dados a partir das 11h no dia 22 (ΔH)

APÊNDICE C: ESTAÇÕES ELETROJATO EQUATORIAL

ACRÔNIMO	ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE	DIP LATITUDE 2024 (+ N)
TTB	Tatuoca, Brazil	-48,51	-1,21	-1,84
KOU	Kourou, Guiana Francesa	-52,73	5,21	6,37
PVE	Porto Velho	-63,94	-8,84	-0,99
HUA	Huancayo, Peru	-75,33	-12,05	-1,0
IPM	Isal De Pascua, Chile	-109,42	-27,17	-19,6

APÊNDICE D: ESTAÇÕES USADAS PARA O VTEC E ROT

Estação	Longitude	Latitude	Dip Latitude
AC07	65,96	-161,29	64,27
AC13	55,82	-155,62	52,91
BAKU	40,37	49,81	40,28
BERP	-74,55	-111,89	-54,01
BTNG	1,44	125,19	-6,45
CN23	17,26	-88,78	26,85
CN57	10,84	-60,94	15,36
GANJ	40,68	46,36	40,38
HJOR	63,42	-41,15	64,03
INMN	-74,82	-98,88	-51,44
KAEO	21,21	-157,23	21,27
KMTR	41,87	70,20	43,55
MSCG	-20,44	-54,62	-15,20
NNVN	61,63	-44,90	62,86
OLO9	-2,75	35,87	-13,15
SANT	-33,15	-70,67	-19,56

ANEXO 1: COORDENADAS DOS OBSERVATÓRIOS DO DST

OBSERVATÓRIO	GEOGRÁFICO		GEOMAGNÉTICO
	Longitude(L)	Latitude	Dip. Latitude
Hermanus	19,22°	-34,40°	-33,3°
Kakioka	140,18°	36,23°	26,0°
Honolulu até abril de 1960	201,90°	21,30°	21,0°
1960 depois de abril de	201,98	21,32°	21,1°
San Juan até janeiro de 1965	293,88°	18,38°	29,9°
1965 depois de janeiro de	293,85°	18,01°	28,0°

Fonte: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>

ANEXO 2: OBSERVATÓRIOS GEOMAGNÉTICOS DO KP

OBSERVATÓRIO GEOMAGNÉTICO	CÓDIGO	INSTITUTO OPERACIONAL	PAÍS	DESDE	GEOGRÁFICO	
					Longitude	Latitude
Eyrewell	EYR	GNS Science	Nova Zelândia	1978	172,393	-43,474
Canberra	CNB	Geoscience Australia	Australia	1981	149,360	-35,320
Uppsala	UPS	Geological Survey of Sweden	Suécia	2004	017,353	59,903
Brorfelde	BFE	Technical University of Denmark	Dinamarca	1984	011,672	55,625
Wingst	WNG	GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung	Alemanha	1938	009,053	53,725
Niemegk	NGK	GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung	Alemanha	1988	012,680	52,070
Lerwick	LER	British Geological Survey	Reino Unido	1932	358,817	60,138
Eskdalemuir	ESK	British Geological Survey	Reino Unido	1932	356,794	55,314
Hartland	HAD	British Geological Survey	Reino Unido	1957	355,520	51,000
Ottawa	OTT	Natural Resources Canada	Canadá	1969	284,448	45,403
Meanook	MEA	Natural Resources Canada	Canadá	1932	246,653	54,616
Fredericksburg	FRD	United States Geological Survey	Estados Unidos	1957	282,633	38,210
Sitka	SIT	United States Geological Survey	Estados Unidos	1932	224,670	57,060

Fonte: <https://kp.gfz.de/en/about-kp>